

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du
Littoral



**MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ÉTAT
EN SCIENCES DE LA MER ET ET DU DIPLOME
START-UP**

**Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale
Option : Ingénierie de l'environnement marin et côtier**

Thème

**Analyse de la conformité environnementale des
stations de l'eau de mer : Cas de l'entreprise
« Beni Saf Water Company SPA »**

Présenté par :

BOUDJELTI Oumeima

MESSAOUD Oum Eldjilali

Soutenu le 08 Juillet 2025 devant le Jury suivant :

Mr. Kada Mohamed	MAA	ENSSMAL	Président
Mme. Djahnit Nora	MCA	ENSSMAL	Examinatrice
Mr. Grimes Samir	Professeur	ENSSMAL	Promoteur
Mr. Chaffi Mohamed	DG	BWC	Invité

Année universitaire : 2024-2025

Remerciement

Louange à Dieu qui, par sa grâce, fait aboutir les bonnes choses.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, source de sagesse, de force et de persévérance, qui nous a accompagné tout au long de ce parcours, nous permettant de mener ce travail à son terme.

Nous exprimons notre reconnaissance à notre chère patrie, l'Algérie, pour nous avoir offert un cadre éducatif solide, et à notre École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral ainsi qu'au Département de l'Environnement, pour la qualité de l'enseignement et l'environnement académique propice à l'épanouissement.

Un remerciement tout particulier, chargé d'estime et de considération, à notre encadrant Monsieur Grimes Samir, professeur expert international et pilier de l'Environnement marin et côtier. Son encadrement d'une qualité remarquable, sa rigueur scientifique, sa bienveillance humaine et son engagement sans faille ont profondément marqué notre parcours. Il a su, par son professionnalisme et sa vision, nous guider avec patience et exigence vers un travail abouti. Nous avons énormément appris à ses côtés, tant sur le plan académique qu'humain.

Nous exprimons notre respect et notre reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté de consacrer de leur temps et de leur expertise pour évaluer notre travail, Mr. Kada Mohamed et Mme. Djahnit Nora

Nos remerciements sincères s'adressent à l'ensemble du corps professoral, pour leurs efforts constants, leur bienveillance et leur rôle fondamental dans notre formation.

Nos remerciements distingués vont également à Monsieur Mohamed Chafi, Directeur Général de la station de dessalement Beni Saf Water Company SPA pour sa confiance, son ouverture et son appui tout au long de notre étude. Il représente avec fierté les cadres exemplaires de l'État algérien, un modèle de leadership, de sérieux et d'intégrité.

Nos sincères remerciements à l'ensemble de son équipe technique et administrative, ingénieurs, techniciens et agents, pour leur accueil chaleureux, leur collaboration précieuse et leur soutien constant.

Enfin, nous exprimons notre plus profonde reconnaissance à nos petites familles chéries, particulièrement nos parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leurs prières. Leur soutien a été notre force dans les moments d'effort et de doute.

Ce mémoire est aussi le fruit de notre complicité, notre amitié sincère et notre travail commun, que nous chérissons et dont nous sommes fières.

Dédicace

À ma chère maman

Ton amour est ma lumière, ton courage mon inspiration. Merci pour tes prières, tes mots doux et ton cœur immense. Ce travail est le fruit de tes sacrifices silencieux.

À mon père

Ta force, ta sagesse et ton soutien discret m'ont guidée tout au long de ce chemin. Tu es mon modèle de persévérance.

À mes sœurs et frères

Merci d'avoir toujours cru en moi, même dans les moments où moi-même je doutais. Ta présence m'a rassurée.

À mon frère Omar,

Celui qui, sans toujours le dire, sait être là quand il le faut.

Merci pour ton regard bienveillant, ton humour apaisant, et ta force silencieuse qui m'a tant aidée à avancer.

Ta présence a été un ancrage, ton soutien une véritable force.

Ce travail, je te le dédie avec tout l'amour et la reconnaissance d'une sœur fière et émue.

À mes amies (Oumeima, Souad, Nesrine, Asma, Wided)

Merci pour ton écoute, ton soutien moral et ta présence dans les moments difficiles. Ton amitié a rendu ce parcours plus doux.

À ma binome Oumeima boudjelti

Merci d'avoir été cette présence inébranlable, cette lumière douce dans les moments sombres, ce rire dans les instants d'épuisement.

Chaque ligne de ce travail porte un peu de toi, de ton intelligence, de ta patience et de ton amour.

Travailler à tes côtés a été bien plus qu'un simple projet : c'était une aventure humaine, tissée de complicité, de respect et de tendresse.

À tous ceux et celles qui m'ont soutenue de près ou de loin,

Ce travail est le reflet de votre confiance. Il vous est dédié, avec gratitude.

Messaoud Oum el djillali

À ma mère adorée,

Toi qui as été ma force silencieuse, mon refuge doux et ma lumière constante.
Ton amour et tes prières ont porté chacun de mes pas, la fleur de ma vie, prière de mes jours, silence qui m'a portée. Ton amour est le berceau de ma force et cette réussite, une goutte dans l'océan de tout ce que je te dois.

À mon père bien-aimé,

Merci pour ton soutien indéfectible, ton regard fier et ta patience d'orfèvre.

Ce travail est l'écho de vos sacrifices et de votre foi en moi.

À ma sœur Amani et mon frère Ibrahim Abdelmoumen,

Merci pour votre présence affectueuse, vos encouragements et votre complicité.

À mes grand-parents maternel, Jedou Nour eddine et Mimi,

Jedou, toi qui m'as transmis l'amour de la nature et le sens de la responsabilité environnementale, je te dois cette passion que j'ai poursuivie jusqu'ici.

À la mémoire de mes grands-parents paternels,

Ainsi qu'à mon oncle et ma tante disparus, je dédie ces pages avec tendresse et recueillement.

À tous les enseignants qui ont marqué mon parcours,

De la maternelle au lycée, merci pour chaque leçon et chaque mot d'encouragement.

Mention spéciale à Monsieur Aliat Toufik,

Mon professeur d'écologie durant le premier cycle de ma vie universitaire

A l'École Nationale Supérieure des Forêts – un guide inspirant dans mes premiers pas scientifiques.

À mes amies précieuses – Malak, Hadil, Ibtihel, Amani, Achraf,

À mes amies fidèles – Mouji, Nesrine, Souad, Asma, Widad, Djoumana

Merci pour les sourires partagés, les silences compris, et les souvenirs tissés au fil des années. Vous avez tous été des éclats de lumière sur mon chemin. Je vous porte dans mon cœur, avec gratitude et tendresse.

À toutes celles et ceux que je ne peux nommer, mais qui restent présents dans mon cœur.

Enfin, je réserve une dédicace toute particulière à mon amie, mon soutien, et ma coéquipière dans ce travail

À ma binome Messoud Oum El Djilali.

Mouji ton sérieux, ton âme lumineuse et ta belle énergie ont enrichi chaque étape de ce projet âme douce et présence fidèle,

Merci d'avoir été plus qu'une coéquipière un véritable appui, une amie sincère, un cœur qui comprend sans trop de mots. Ce travail est le fruit d'un chemin parcouru ensemble, dans le respect, la complicité et l'effort partagé.

Je te le dédie avec affection, fierté et gratitude.

Boudjelti Oumeima

Résumé :

Face à la crise hydrique croissante et au changement climatique, le dessalement de l'eau de mer s'impose en Algérie comme une solution stratégique pour sécuriser l'approvisionnement en eau potable. Ce mémoire évalue la **conformité environnementale** des stations de dessalement, avec un **étude de cas approfondie** sur la station de **Béni Saf Water Company SPA** (Chatt El Hillal). L'objectif est de mesurer les impacts écologiques liés à cette technologie et de vérifier le respect des **normes environnementales nationales et internationales**.

L'étude adopte une **approche multidisciplinaire** intégrant l'analyse réglementaire (CNUDM, Protocole de Barcelone, ISO 14001), les **impacts physico-chimiques et biologiques** (rejets hypersalins, pollution thermique et sonore), l'**évaluation de l'empreinte carbone**, ainsi que les **enjeux technologiques** associés à l'osmose inverse et aux procédés thermiques (MSF, MED, MVC, TVC). Les résultats révèlent une **empreinte carbone significative** et des perturbations locales sur les écosystèmes marins, notamment en zones de rejet. L'étude met aussi en lumière des efforts notables de l'entreprise en matière de **certification ISO**, de **gestion environnementale** et d'intégration des **énergies renouvelables**.

Enfin, le travail propose des **recommandations** pour renforcer la performance environnementale des unités de dessalement algériennes, via une meilleure gestion des déchets, une optimisation énergétique, une modélisation hydrodynamique des rejets, et la généralisation d'une gouvernance conforme aux standards ESG.

Mots-clés : Dessalement – Conformité environnementale – Osmose inverse – Empreinte carbone – Normes ISO – Énergies renouvelables – Développement durable.

Table des matières

Remerciement	II
Dédicace	III
Résumé :	V
Table des matières	VI
Liste des figures	XIII
Liste des tableaux	XIV
Liste des abréviations	XV
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PARTIE I.....	3
CADRE GENERAL ET ETAT DE L'ART	3
CHAPITRE 1	3
GENERALITES SUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN ALGERIE	3
1.1 Définition du dessalement	4
1.2 Origine du dessalement	5
1.3 Histoire du dessalement en Algérie.....	5
1.4 Le dessalement dans le monde.....	6
1.5 Situation actuelle du dessalement en Algérie	8
1.6 Le futur du dessalement en Algérie.....	8
1.7 Les procédés de dessalement de l'eau de mer	9
1.7.1 Les procédés membranaires	9
1.7.2 Les procédés thermiques par distillation.....	9
1.8 Intégration des énergies renouvelables dans le dessalement	13
1.8.1 Couplage avec des sources d'énergies renouvelables	13
1.9 Problèmes techniques rencontrés dans le dessalement.....	13
1.10 Avantages et inconvénients du dessalement	14
a. Émissions de gaz à effet de serre.....	15
b. Perturbation des écosystèmes côtiers.....	15
1.11 L'empreinte carbone	15
CHAPITRE 2	16
ÉTAT DE L'ART – CONFORMITE ENVIRONNEMENTALE DES STATIONS DE DESSALEMENT	16
2.1 Définition conceptuelle de la conformité environnementale	16
2.2. Cadre juridique et normatif : une architecture internationale en mutation	17
2.3 Focus algérien : état de la recherche nationale	17

2.3.1 Impacts environnementaux documentés	17
2.3.2 Bilan carbone et rendement énergétique	17
2.3.3 Vers une stratégie environnementale intégrée	17
2.4 Recherches internationales : impacts, solutions et innovations	18
2.4.1 Effets hydrodynamiques et physico-chimiques	18
2.4.2 Menace sur la biodiversité marine	18
2.4.3 Consommation énergétique et émissions de CO ₂	18
2.4.4 Technologies atténuatrices et pratiques durables	18
2.5 Tendances normatives et intégration ESG	18
PARTIE II	19
CONTEXTE ET STRATEGIE NATIONALE	20
CHAPITRE 3	20
ANALYSE DU CONTEXTE ET DE LA STRATEGIE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN ALGERIE	20
3.1 Programmes d'urgence du gouvernement algérien en matière de dessalement de l'eau de mer	20
3.1.1 Programme d'urgence de 2021-2024 : Construction de cinq nouvelles stations	20
3.1.2 Programme stratégique du Plan national de l'eau 2030	21
3.2 Vision et stratégie nationale du dessalement de l'eau de mer en Algérie	21
3.2.1 Présentation des besoins hydriques de l'Algérie et défis liés à la rareté de l'eau	21
3.2.2 Politiques nationales de l'eau et intégration du dessalement dans la stratégie hydrique	21
3.2.3 Stratégies gouvernementales et programmes de développement	22
3.2.4 Comparaison avec les stratégies adoptées par d'autres pays méditerranéens	22
3.3 Objectifs quantitatifs du dessalement de l'eau de mer en Algérie	24
3.3.1 Objectifs gouvernementaux en matière de production d'eau dessalée	24
3.3.2 Capacité actuelle et prévisions de production d'eau dessalée en Algérie	25
3.3.3 Contribution du dessalement à la couverture des besoins en eau potable	25
3.3.4 Évaluation des écarts entre les objectifs et la réalité des infrastructures	26
3.4 Contribution des eaux dessalées et des eaux mixtes dans l'approvisionnement en eau en Algérie	26
3.4.1 Répartition géographique des stations de dessalement et leur rôle dans l'approvisionnement en eau	27
3.4.2 Comparaison des différentes sources d'eau : eaux souterraines, eaux de surface, eaux dessalées	27

3.4.3	Évolution des besoins en eau et rôle croissant du dessalement	28
3.4.4	Cadre juridique, réglementaire et modèle de gestion du dessalement de l'eau de mer en Algérie	28
3.5	Les défis et contraintes de la mise en œuvre du dessalement en Algérie	30
3.5.1	Contraintes techniques	30
3.5.2	Entretien des membranes	30
3.5.3	Défis environnementaux	30
3.6	Obstacles économiques et financiers.....	31
3.6.1	Investissements initiaux	31
3.6.2	Dépendance aux entreprises étrangères	31
3.6.3	Contraintes institutionnelles et administratives	31
3.7	Acceptabilité sociale du dessalement en Algérie	32
3.7.1	Perception du public et acceptation du dessalement comme solution hydrique.....	32
3.7.2	Facteurs influençant l'acceptabilité sociale	32
3.7.3	Analyse des résultats d'études et enquêtes sur l'acceptation du dessalement.....	33
3.7.4	Stratégies d'amélioration de l'acceptabilité sociale du dessalement	33
Chapitre 4:	34
Scénarios de développement du dessalement de l'eau de mer en Algérie		34
4.1	Évolution du nombre de station de dessalement	35
4.1.1	Capacité de production totale du dessalement de l'eau de mer :.....	36
4.2.	Analyse économique	38
4.2.1	La production d'une station de 100 000 m ³ /j coûte 22 millions \$ par an	38
4.2.2	Une approche sociale de la tarification	39
4.2.3	Le dessalement, une solution coûteuse mais nécessaire	39
4.3	Le dessalement de l'eau de mer comme un réponse sur le changement climatique et le stress hydrique	39
4.3.1	Stress hydrique	40
4.3.2	Changement climatique	40
4.4	Évolution de la population et demande en eau	41
PARTIE III		43
ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET TECHNOLOGIES DURABLES		43
CHAPITRE 5		43
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES STATIONS DE DESSALEMENT		43
5.1	Analyse de l'empreinte carbone des installations	43

5.2 Les rejets et les déchets générés par le processus de dessalement	44
5.2.1 Émissions atmosphériques	44
5.2.2 Rejets chimiques	44
5.2.3 Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI	46
5.3 Impacts des rejets de dessalement	47
5.3.1 Effets dus aux produits de la corrosion	47
5.3.2 Effets des additifs antitartres	47
5.3.3 Effets des additifs antisalissure	47
5.3.4 Effets des additifs antimousses	47
5.3.5 Effets dus au prélèvement d'eau de mer	48
5.3.6 Effets potentiels des rejets de saumures concentrées	48
3.7 Impacts des rejets de saumures sur l'écosystème marin	48
5.4 Le Dessalement et le risque écologique	49
5.5 La pollution sonore	50
5.6 La pollution thermique	50
5.7 Stratégies d'Atténuation des Impacts Environnementaux du Dessalement	51
CHAPITRE 6	52
TECHNOLOGIES INNOVANTES ET PRATIQUES DURABLES	52
6.1 Innovations dans les membranes d'osmose inverse	52
6.2 Technologies de récupération d'énergie : échangeurs à pression isobarique	53
6.3 Intégration des énergies renouvelables dans les unités de dessalement	53
6.4 Intelligence artificielle et optimisation en temps réel	53
6.5 Approche d'économie circulaire et valorisation des rejets	53
6.6 Prétraitements membranaires hybrides	54
6.7 Systèmes d'exploitation par lots (Batch RO)	54
6.8 Études de cas internationales	54
6.9 Technologies émergentes : impression 3D de membranes	54
PARTIE IV	55
NORMES ET CADRE INTERNATIONAL	55
CHAPITRE 7	55
NORMES INTERNATIONALES DE CONFORMITE ENVIRONNEMENTALE	55
7.1 ISO 14001 et ISO 14064 : principes et application	55
7.2 Bonnes pratiques de gestion environnementale	56
7.3 Normes de rejet en milieu marin	56
7.4 Comparaison des normes : UE, USA, pays du Golf	56

7.5 Adaptation des normes internationales en Algérie.....	57
PARTIE V	57
APPROCHE METHODOLOGIQUE ET ETUDE DE CAS	57
CHAPITRE 8.....	57
METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	57
8.1. Approche méthodologique globale	57
8.2. Cadre Temporel et Spatial de l'Étude	58
8.3. Objectifs de la recherche	58
8.4. Revue de la Littérature et Analyse Documentaire (Analyse Bibliographique) .	59
8.4.1. Objectifs de la Revue de la Littérature.....	59
8.4.2. Sources d'Information et Processus de Collecte	59
8.5. Instruments de collecte des données	60
8.5.1. Questionnaire grand public (composante quantitative).....	60
8.5.2. Questionnaire professionnel (composante qualitative)	60
8.6. Validation et Fiabilité des Instruments	61
8.7. Échantillonnage et population cible	61
8.7.1. Grand public.....	61
8.7.2. Professionnels.....	61
8.8. Outils d'analyse des données	62
8.8.1. Données des questionnaires	62
8.9. Méthode de calcul de l'empreinte carbone	62
8.9.1. Sources d'émissions évaluées	63
8.9.2. Facteurs d'émission	63
8.9.3. Validations	63
8.10. Considérations Éthiques	64
8.11. Fiabilité et limites.....	64
CHAPITRE 9.....	65
ÉTUDE DE CAS – STATION DE DESSALEMENT BENI-SAF WATER COMPANY SPA (SITE DE CHATT EL HILLEL)	65
9.1 Contexte et Objectifs	65
9.2 Intérêt porté à la station de BWC	66
9.3 Présentation de la station de dessalement de Chatt El Hillel	66
9.4 Description des technologies utilisées.....	67
9.5 Analyse des impacts environnementaux.....	68
9.6 Synthèse de l'Audit Environnemental de la Station de Dessalement BWC (2017).....	68

9.6.1 Principaux axes évalués	69
9.6.2 Constats positifs	69
9.6.3 Axes d'amélioration identifiés	69
9.7 Analyse Critique Approfondie du Bilan Carbone 2023–Beni Saf Water Company SPA	69
9.7.1 Conformité aux normes internationales : une base solide.....	69
9.7.2 Diagnostic critique des résultats	70
9.7.3 Comparaison internationale (Benchmark)	70
9.7.4 Axes d'amélioration concrets	70
9.8 Système de Management Intégré et Certifications ISO de Beni Saf Water Company SPA	71
9.9 Évaluation hydrodynamique et dispersion environnementale des rejets de saumures.....	72
PARTIE IV	74
RESULTATS, DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS.....	74
CHAPITRE 10	74
RESULTATS ET DISCUSSION	74
10.1 Analyse de l’empreinte carbone de la station de dessalement de Béni Saf	74
10.1.1 Présentation du résultat global.....	74
10.1.2 Analyse des contributions par source d’émission.....	76
10.1.3 Mise en perspective comparative.....	76
10.1.4 Interprétation critique et facteurs explicatifs	77
10.1.5 Perspectives d’amélioration environnementale	77
10.1.6 Analyse comparative entre le bilan carbone 2023 de l’entreprise et notre estimation 2024.....	77
Différences méthodologiques structurantes	78
10.1.7 Discussion scientifique comparée et positionnement technologique....	79
10.2 Résultats et interprétation–Questionnaire professionnel	81
10.2.1 Cadre de l’enquête	81
10.2.2 Profil des répondants	81
10.2.3 Perception de la conformité environnementale	82
10.2.4 Systèmes de suivi et types de rejets	82
10.2.5 Impact environnemental perçu des rejets	83
10.2.6 Évaluation de l’empreinte carbone	83
10.2.7 Solutions proposées pour réduire l’empreinte carbone.....	83
10.2.8 Défis futurs et priorités stratégiques	84
10.2.9 Limites et remarques libres	84

10.2.10 Conclusion de la section.....	84
10.3 Analyse du questionnaire grand public	85
10.3.1 Interprétation détaillée des résultats du questionnaire	85
10.4 Conclusion comparative: Professionnels vs Grand Public	95
Chapitre 12.....	97
Recommandations et Perspectives	97
CONCLUSION GENERALE.....	99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	100
ANNEXES.....	111
Business Model Canvas	111

Liste des figures

Figure 1 : production d'eau douce sur les navires (source : Howarth, 1984, cité par Birkett (2012).	5
Figure 2 : Nouvelle capacité de Dessalement ajoutée chaque année dans le monde (1970-2020), par type de technologie selon GWI DesalData (2021).....	7
Figure 3 : Répartition mondiale de la capacité de production d'eau dessalée et répartition mondiale de l'utilisation par secteur d'activité (Alternatives économiques, 2010).	7
Figure 4 : Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie (Kettab, 2015).	9
Figure 5 : Principe de fonctionnement du dessalement par osmose inverse (BWT.com)	9
Figure 6 : Principe de fonctionnement du dessalement par procédés thermiques (Bandelier, 2016)	10
Figure 7 : Principe de fonctionnement du dessalement par détente successive (MSF) (Boukhriss, 2016).....	11
Figure 8 : Principe de fonctionnement du dessalement par multiple-effet (MED) (Boukhriss, 2016)	12
Figure 9 : Principe de fonctionnement du dessalement par MVC (Bahar & al, 2004).....	12
Figure 10 : Principe de fonctionnement du dessalement par TVC (Vassilis, 2016)	13
Figure 11 : Représentation des différents mécanismes de colmatage (Touati, 2023)	14
Figure 12 : Cadre conceptuel de la conformité environnementale des stations de dessalement : piliers réglementaires, technologiques et durables ; (Schéma conçu par les auteurs à titre de synthèse personnelle du contenu étudié).	19
Figure 13 : Lien entre croissance démographique, pression hydrique et dessalement en Algérie (Schéma conçu par les auteurs à titre de synthèse personnelle du contenu étudié).	26
Figure 14 : Méthodologie de l'étude (Approche mixte pour évaluation de la station de dessalement et de l'empreinte carbone)	58
Figure 15 : Localisation et vue générale de la station de dessalement de BWC	67
Figure 16 : Processus de dessalement de la SDEM de Beni SAF	67
Figure 17 : Image satellite de la station de dessalement de Beni Saf (Yousfi, 2024)	68
Figure 18 : Comparaison visuelle des rejets hypersalins de quatre stations de dessalement en Algérie à partir d'imagerie satellite (2023).....	73
Figure 19 : Répartition des émissions de CO ₂ eq par catégorie (KgCO ₂ eq/m ³)	76

Liste des tableaux

Table 1 : Principaux problèmes techniques rencontrés dans les systèmes de dessalement et leurs solutions	14
Table 2 : Le dessalement de l'eau de mer en Méditerranée : état des lieux, enjeux et perspectives (source : Plan Bleu. 2024)	23
Table 3 : Les stations de dessalement en Algérie (MRE, 2024)	36
Table 4 : Capacités et volumes mobilisés des barrages en service en Algérie	42
Table 5 : Comparaison des normes : UE, USA, pays du Golf.....	56
Table 6 : Répartition des émissions de CO ₂ eq par catégorie (KgCO ₂ eq/m ³)	75
Table 7 : Comparaison quantitative des résultats.....	78
Table 8 : Comparaison méthodologique entre le GHG Protocol (2023) et la méthode adoptée dans cette étude (2024).....	79
Table 9 :Estimations moyennes nationales de l'empreinte carbone des stations de dessalement selon la technologie utilisée et la source d'énergie dominante (Jones, 2019)	80

Liste des abréviations

- WWF** : World Wide Fund Nature (fonds mondial pour la nature).
- ADE** : l'Algérienne Des Eaux.
- AEC** : Algerian Energy Company.
- AEP** : l'Alimentation en Eau Potable.
- NRC**: National Research Council.
- OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
Institution spécialisée des Nations Unies fixant les normes sanitaires, y compris celles de l'eau potable.
- ENSSMAL** : École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral
Établissement algérien spécialisé en sciences marines et gestion du littoral.
- MRE** : Ministère des Ressources en Eau
Ministère algérien chargé de la gestion des ressources en eau
- MSF** : Multi-Stage Flash
Technologie thermique de dessalement utilisant plusieurs étapes d'évaporation instantanée.
- MED** : Multi-Effect Distillation
Procédé thermique de dessalement utilisant plusieurs effets d'évaporation.
- GOR** : Gain Output Ratio
Indicateur de rendement énergétique des usines de dessalement thermique.
- GES** : Gaz à Effet de Serre
Gaz responsables du réchauffement climatique, émis notamment par les installations industrielles.
- CNUDM** : Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer
Traité international encadrant l'utilisation durable des ressources marines.
- ISO** : Organisation Internationale de Normalisation
Organisme fixant des normes internationales, dont celles de l'environnement et de l'eau.
- ESG** : Environnement, Social et Gouvernance
Critères d'évaluation de la durabilité et de la responsabilité des projets.
- GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
Organe scientifique de référence sur le changement climatique mondial
- ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
Organisme algérien en charge de la gestion et de la surveillance des ressources hydriques.
- APS** : Algérie Presse Service
Agence de presse officielle algérienne, source d'informations gouvernementales.
- PNUE** : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
Programme de l'ONU chargé de la coordination des politiques environnementales mondiales.
- PPP** : Partenariat Public-Privé
Mode de financement impliquant la collaboration entre l'État et le secteur privé.
- CNERIB** : Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment
Institution algérienne impliquée dans les projets de construction et d'infrastructure.
- SARPI** : Société Algérienne de Réalisation de Projets Industriels
Entreprise spécialisée dans les projets industriels en Algérie
- BOT** : Build-Operate-Transfer
Modèle de contrat : construire, exploiter, puis transférer au gouvernement.
- FNE** : Fonds National de l'Environnement
Mécanisme algérien de financement pour les projets environnementaux.
- FMES** : Fondation Méditerranéenne d'Études Stratégiques
Organisation de recherche spécialisée en géopolitique méditerranéenne.
- EPA** : Environmental Protection Agency
Agence américaine de référence en matière de protection de l'environnement.
- GHG** : Green House Gases
(Équivalent anglais de GES) Gaz responsables du changement climatique.
- IFI** : Institutions Financières Internationales
Banque Mondiale, FMI. Acteurs clés dans le financement de projets d'infrastructures.
- IREE** : Inspection Régionale de l'Environnement et de l'Énergie

CNERIB : Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

CIE : Compagnie Ivoirienne d'Électricité.

BIR : Bureau d'Information et de Recherche.

OWID : Our World in Data.

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

JECDD : Journées d'Études sur le Changement Climatique et le Développement Durable

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau est le secret de la vie, une ressource précieuse dont la raréfaction représente un défi majeur pour notre planète. Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une solution incontournable pour assurer la sécurité hydrique. Toutefois, cette technologie soulève des enjeux environnementaux qui nécessitent une évaluation rigoureuse. Ce travail s'inscrit dans cette perspective en analysant la conformité environnementale des stations de dessalement, afin d'assurer un équilibre entre innovation et préservation des écosystèmes marins (Plan Bleu, 2010).

La croissance démographique mondiale entraîne une demande croissante en eau potable. L'industrialisation, l'irrigation et l'élévation du niveau de vie augmentent galement cette consommation, en particulier dans les zones côtières où résident près de 50 % de la population mondiale, une proportion susceptible d'atteindre 75 % à court terme (NRC, 2008).

Dans la région méditerranéenne, cette dynamique s'accompagne d'une intensification des activités socio-économiques, exacerbant la rareté des ressources en eau. Cette situation a conduit certains pays méditerranéens à exploiter leurs ressources hydriques au-delà des seuils de renouvellement, et d'autres suivent une trajectoire similaire. La demande totale en eau dans cette région est passée de 300 milliards de mètres cubes par an en 1990 à une hausse de 32 % en 2010, et pourrait atteindre 460 milliards de mètres cubes d'ici 2025, soit une augmentation de 55 % (Plan Bleu, 2010).

L'Algérie fait partie des pays confrontés à une insuffisance chronique en ressources hydriques, une problématique qui risque de s'aggraver avec les effets du dérèglement climatique, menaçant tant la quantité que la qualité de l'eau disponible. La demande en eau connaît une augmentation constante, alimentée par la croissance démographique rapide, l'urbanisation croissante et les besoins accrus en irrigation pour l'agriculture. Devant ces enjeux, il est essentiel d'assurer une administration stricte des stations de dessalement, en accord avec les normes environnementales tant nationales qu'internationales (MRE, 2022).

Le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une solution stratégique pour répondre à ces défis. Toutefois, cette technologie soulève des préoccupations environnementales importantes. Selon le WWF, les rejets générés par les usines de dessalement modifient les paramètres physico-chimiques des milieux marins, affectant la faune et la flore aquatiques (WWF, 2019). Ces impacts potentiels nécessitent une sensibilisation accrue et des mesures rigoureuses pour garantir la conformité aux normes environnementales en vigueur et limiter les conséquences négatives sur les écosystèmes marins (Convention de Barcelone, 2018). Si le dessalement offre une réponse à la demande croissante en eau douce, il soulève néanmoins de vives interrogations quant à sa conformité aux réglementations environnementales. En effet, cette technologie, bien que mature, implique une consommation énergétique élevée, des rejets de saumure concentrée et des prélèvements importants d'eau de mer, susceptibles d'altérer les écosystèmes marins et côtiers. Il est donc primordial que les rejets provenant des stations de dessalement soient conformes aux normes de qualité établies par les autorités compétentes (ANE, 2021).

La stratégie d'implantation des stations de dessalement est considérée comme une option sécuritaire ; elle est destinée à l'alimentation en eau potable (AEP) pour les villes côtières et

intérieures et permet de libérer la quantité d'eau conventionnelle destinée à l'AEP pour l'agriculture afin d'atteindre la sécurité alimentaire. L'Algérie a construit 15 grandes stations de dessalement dans les principales villes (Alger, Oran, Annaba, Skikda) d'une capacité entre (200.000 m³/jour et 500.000 m³/jour) et 12 stations monoblocs d'une capacité entre (2500 et 7000 m³/jour), pour une capacité totale d'environ 913 hm³/an (Algerian Energy Company, 2023). Ces stations sont gérées par des sociétés de production pilotées par l'Algerian Energy Company (AEC), société créée par les groupes Sonatrach et Sonelgaz, et la production de l'eau dessalée est vendue à l'ADE (MRE, 2023).

L'impact environnemental des usines de dessalement est une question cruciale qui requiert une analyse minutieuse de leur respect des normes réglementaires. L'objectif de cette recherche est d'étudier la conformité environnementale de l'usine de dessalement située à Béni Saf, dans la localité de Chatt El Hillal (Ain Témouchent). Cette étude, vise à examiner les mesures mises en œuvre pour assurer la conformité aux normes environnementales, détecter d'éventuelles irrégularités et proposer des solutions de détecter d'éventuelles irrégularités et de formuler des suggestions pour optimiser la gestion environnementale de la station.

Dans un premier temps, nous exposerons le contexte réglementaire et les obligations environnementales liées au dessalement de l'eau de mer, avec un accent sur les standards nationaux et internationaux ainsi que les protocoles actuellement en place (Convention de Barcelone, 2018 ; Loi algérienne relative à l'environnement, 2021). Dans un second temps, notre étude se focalisera sur l'appréciation des conséquences environnementales liées à la conformité. Nous examinerons les rejets provenant du dessalement, leur incidence sur les écosystèmes marins et également les dispositions mises en œuvre pour adhérer aux limites environnementales prescrites par la législation (Ministère de l'Environnement, 2023). Pour terminer, dans une troisième section, nous réaliserons un examen approfondi de la station de dessalement de Béni Saf afin de détecter les aspects conformes et les éventuels points faibles, puis nous soumettrons des suggestions d'amélioration pour assurer une conformité accrue aux normes environnementales. Cette recherche se positionne dans une optique de développement durable, en s'efforçant d'équilibrer les besoins de production d'eau potable et la conformité aux normes environnementales pour garantir une gestion pérenne des ressources aquatiques (Stratégie Nationale de l'Eau, 2024).

PARTIE I

CADRE GENERAL ET ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN ALGERIE

La survie de l'humanité dépend directement de la disponibilité des ressources en eau. Cependant, la croissance démographique et l'amélioration du niveau de vie dans les pays émergents engendrent des problèmes majeurs liés à la quantité et à la qualité de l'eau accessible. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), en 2015, environ une personne sur dix n'avait pas accès à une source d'eau potable (Fonds des Nations Unies pour l'enfance, OMS, 2015). La même année, l'Institut des Ressources Mondiales, en s'appuyant sur des modèles de changements climatiques et des scénarios socio-économiques, a estimé quels pays risquent de subir une pénurie d'eau critique d'ici 2040. Bien que l'eau soit l'une des ressources les plus abondantes et renouvelables sur Terre, couvrant environ 75 % de la surface de la planète (Kalogirou, 2005), sa répartition est inégale. Environ 97 % de cette eau est salée, tandis que seulement 3 % est douce, principalement localisée sous forme de glace aux pôles (70 % de l'eau douce), dans les nappes souterraines (29,75 %) et dans les lacs et rivières (0,25 %). Face à cette abondance d'eau salée, le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres, moins salées mais impropres à la consommation, apparaît comme une solution stratégique. Cette approche est d'autant plus pertinente que près de 40 % de la population mondiale vit à moins de 100 kilomètres des côtes (MRE, 2024).

L'Algérie, située en Afrique du Nord, est le plus grand pays d'Afrique et du bassin méditerranéen en termes de superficie, couvrant 2 381 741 km². Elle est bordée par la mer Méditerranée au nord, par la Tunisie et la Libye à l'est, par le Niger et le Mali au sud, et par la Mauritanie, le Sahara Occidental et le Maroc à l'ouest. Son relief est diversifié, comprend des plaines côtières, des chaînes montagneuses comme l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, ainsi que le vaste désert du Sahara qui couvre 80 % du territoire, avec ses dunes, ses ergs, et des massifs tels que le Hoggar et le Tassili (MRE, 2024).

L'Algérie connaît un climat méditerranéen au nord, semi-aride dans les Hauts Plateaux, et désertique dans le Sahara. En matière de ressources hydriques, le pays dispose de nappes phréatiques, de barrages, et d'eaux de surface, mais il est confronté à un stress hydrique sévère en raison de la rareté des précipitations, des sécheresses récurrentes et de la pression démographique et économique croissante. Pour remédier à ces défis, l'Algérie a mis en place des politiques de gestion de l'eau, notamment le développement des stations de dessalement d'eau de mer, essentielles pour sécuriser l'approvisionnement en eau potable, en particulier dans les régions côtières (FAO, 2008).

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence entre l'agriculture, l'industrie et l'alimentation en eau potable (AEP) pour accéder à des ressources limitées entrave déjà les efforts de développement du pays. Les ressources en eau renouvelables sont estimées à environ 18 milliards de mètres cubes par an. Dans les régions du Nord, ces ressources atteignent 12,5 milliards de mètres cubes, dont 10 milliards proviennent des écoulements superficiels et 2,5 milliards des ressources souterraines renouvelables. Dans la région saharienne, les écoulements superficiels apportent environ 0,5

milliard de mètres cubes. Les eaux de surface sont principalement stockées dans des barrages. En 2002, l'Algérie disposait de 52 grands barrages avec une capacité totale de 5,2 milliards de mètres cubes. Depuis cette date, des efforts ont été déployés pour augmenter ces capacités. En 2024, elles devraient atteindre près de 9 milliards de mètres cubes grâce à la mise en service de nouveaux ouvrages. Ces dernières années, le problème de l'eau s'est aggravé en raison de sécheresses touchant l'ensemble du territoire, soulignant la nécessité d'accorder une attention particulière à la gestion de cette ressource vitale. Le découpage de l'Algérie du Nord en plusieurs régions repose sur des critères comme les caractéristiques géographiques et naturelles, ainsi que le regroupement des bassins versants et des sous-bassins hydrographiques. Ces divisions permettent de faciliter les transferts d'eau lorsqu'ils sont nécessaires (FAO, 2008).

Le thème du dessalement de l'eau de mer est d'une grande importance dans notre spécialité, celle de l'environnement marin et côtier, ainsi que pour l'école Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL). Il s'inscrit dans la gestion durable des ressources en eau, essentielle pour les zones côtières où les besoins augmentent face à la pression démographique et aux défis climatiques. Cette technologie offre une solution stratégique pour répondre à la demande en eau potable, tout en soulevant des enjeux environnementaux liés aux impacts sur les écosystèmes marins, un sujet central pour notre domaine. Pour l'ENSSMAL, ce thème reflète parfaitement sa mission de recherche et de formation en sciences marines et en gestion des littoraux. En étudiant le dessalement, nous contribuons à la recherche de solutions innovantes tout en renforçant les efforts de l'école pour promouvoir la durabilité environnementale.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre on va parler sur l'historique du dessalement de l'eau de mer dans le monde et en Algérie, par la suite donner un aperçu sur les stations mises en service ainsi les projets futurs mis en place par le gouvernement. Aussi nous présenterons le dessalement de l'eau de mer et ses différentes techniques, en particulier ses effets sur l'environnement, et à la fin nous parlerons sur l'empreinte carbone et son importance dans une usine de dessalement.

1.1 Définition du dessalement

Le dessalement, ou dessalage, est un processus visant à séparer l'eau des sels dissous présents dans une eau brute, qu'il s'agisse d'eau de mer ou d'eau saumâtre. Cette technologie consiste principalement à extraire le chlorure de sodium (NaCl) pour obtenir de l'eau douce, répondant ainsi aux besoins spécifiques et critiques en ressources hydriques. Le dessalement est une ressource alternative qui complète les autres solutions disponibles. Avant de recourir à cette technique, une évaluation technoeconomique est réalisée pour comparer son efficacité à d'autres options, comme le transfert d'eau douce.

Parmi ses avantages figurent :

- **Renforcement des ressources en eau** dans les zones arides.
- **Amélioration de la qualité** de l'eau potable distribuée.

Cette approche s'intègre dans la stratégie nationale de gestion intégrée et durable des ressources en eau.

Les techniques de dessalement se divisent principalement en deux grandes catégories: les procédés membranaires et les procédés thermiques. Quel que soit le procédé employé, le principe de fonctionnement reste similaire. Il consiste à introduire de l'eau de mer dans l'unité de dessalement, à fournir l'énergie nécessaire, puis à en extraire de l'eau douce ainsi qu'une saumure (Ghernaot, 2018).

1.2 Origine du dessalement

La formation d'eau douce à partir d'eau de mer se fait depuis toujours à travers le cycle naturel de l'eau. En effet, dans la nature, de la vapeur d'eau se forme à partir de l'évaporation des océans, sous l'action du soleil, et forme ainsi des nuages qui provoquent de la pluie ou de la neige lorsque qu'ils atteignent des régions plus froides. Le dessalement d'eau de mer fonctionne sur ce même principe, l'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qui, une fois liquéfiée, permet d'obtenir de l'eau douce, le sel n'étant pas volatil. Ce principe de dessalement est utilisé depuis l'antiquité pour l'approvisionnement d'eau potable à bord des navires. Les marins, en portant l'eau de mer à ébullition, liquéfiaient la vapeur produite sur de larges éponges froides (Birkett, 2012). Ils pouvaient ainsi récupérer de l'eau douce à partir des éponges comme le montre la figure suivante :

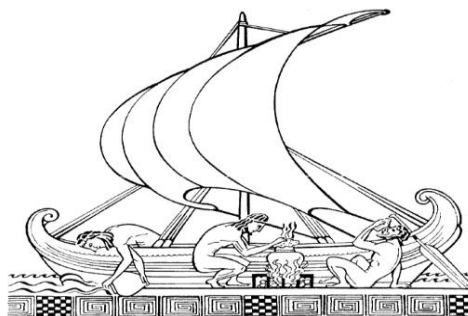


Figure 1: production d'eau douce sur les navires (source : Howarth, 1984, cité par Birkett (2012)).

Le dessalement de l'eau par distillation est une technique ancienne, utilisée depuis plus de deux millénaires. Ce n'est qu'à partir du XVIII^e siècle que des améliorations notables ont été apportées à ce procédé, notamment en matière de consommation énergétique, de rendement de production et de qualité de l'eau obtenue (Bandelier, 2016). Les technologies membranaires, quant à elles, sont apparues bien plus tard. Elles consistent à faire passer l'eau salée à travers une membrane semi-perméable, sous l'effet d'une pression, afin d'en extraire l'eau douce. Bien que des observations sur ce phénomène remontent à l'époque de Pline en 77, c'est en 1959, à l'Université de Californie, que le procédé d'osmose inverse a été concrètement mis au point (Loeb, 1981), en s'inspirant de travaux antérieurs liés à la séparation des sels dans les mélasses (Pastor et al, 1995). Ces deux grandes catégories de procédés, thermiques et membranaires, ont connu un développement industriel significatif à partir du milieu du XX^e siècle. Depuis, l'intérêt pour le dessalement s'est fortement accru, tant dans le domaine scientifique qu'industriel, contribuant à en faire une solution fiable, efficace et économiquement optimisée pour la production d'eau douce (Birkett, 2012).

1.3 Histoire du dessalement en Algérie

L'histoire du dessalement de l'eau de mer en Algérie remonte aux premières initiatives prises pour répondre à la pénurie d'eau potable dans les régions côtières et arides du pays. Confrontée à un climat majoritairement aride et à une pression croissante sur ses ressources

hydriques, l'Algérie a commencé à investir dans cette technologie dans les années 2000. La première grande étape a été le lancement d'un programme national de dessalement de l'eau de mer, visant à diversifier les sources d'approvisionnement en eau. Ce programme a été soutenu par des partenariats entre le gouvernement algérien et des entreprises internationales spécialisées dans le dessalement. L'objectif principal était de réduire la dépendance aux ressources traditionnelles, telles que les barrages et les nappes phréatiques, en augmentant la résilience face aux sécheresses fréquentes (MRE, 2020).

Le premier grand projet de dessalement en Algérie a été la mise en service de la station de dessalement d'Alger Centre en 2006. Depuis, plusieurs stations ont vu le jour, notamment à Hamma, Beni Saf, Mostaganem, Skikda, Ténès, et Tlemcen. Aujourd'hui, l'Algérie compte parmi les plus grands producteurs d'eau dessalée en Afrique et dans le bassin méditerranéen, avec des capacités de production dépassant les 2 millions de mètres cubes par jour. Ces stations, en grande partie basées sur la technologie de l'osmose inverse, permettent de fournir de l'eau potable à des millions d'habitants, en particulier dans les zones côtières où la densité de population est élevée. Le dessalement est désormais un pilier de la politique hydrique nationale et s'inscrit dans une stratégie de gestion durable des ressources en eau, bien qu'il soit accompagné de défis environnementaux et énergétiques. L'histoire du dessalement en Algérie reflète ainsi l'engagement du pays à répondre aux défis de l'eau tout en s'adaptant aux contraintes climatiques et géographiques (MRE, 2020).

1.4 Le dessalement dans le monde

Selon l'Association Internationale du Dessalement (IDA), organisation à but non lucratif affiliée aux Nations Unies et spécialisée dans les technologies de dessalement et de réutilisation de l'eau, plus de 300 millions de personnes dans le monde dépendaient, en 2019, de l'eau douce produite par dessalement pour satisfaire tout ou partie de leurs besoins quotidiens. Cette eau était générée par un réseau mondial de 20 516 usines de dessalement, représentant une capacité de production cumulée d'environ 122,32 millions de mètres cubes par jour (IDA, 2019). À ses débuts, en raison des coûts technologiques élevés, le recours au dessalement était essentiellement concentré dans les pays à hauts revenus tels que l'Arabie Saoudite et le Koweït, ainsi que dans certains petits États insulaires comme Chypre et la Barbade, où les ressources hydriques conventionnelles sont limitées. Toutefois, les avancées technologiques récentes ont permis une amélioration significative des performances des procédés de dessalement, tout en réduisant les coûts. Cela contribue aujourd'hui à positionner le dessalement comme une solution stratégique et viable pour répondre à la crise mondiale de l'eau (IDA, 2019).

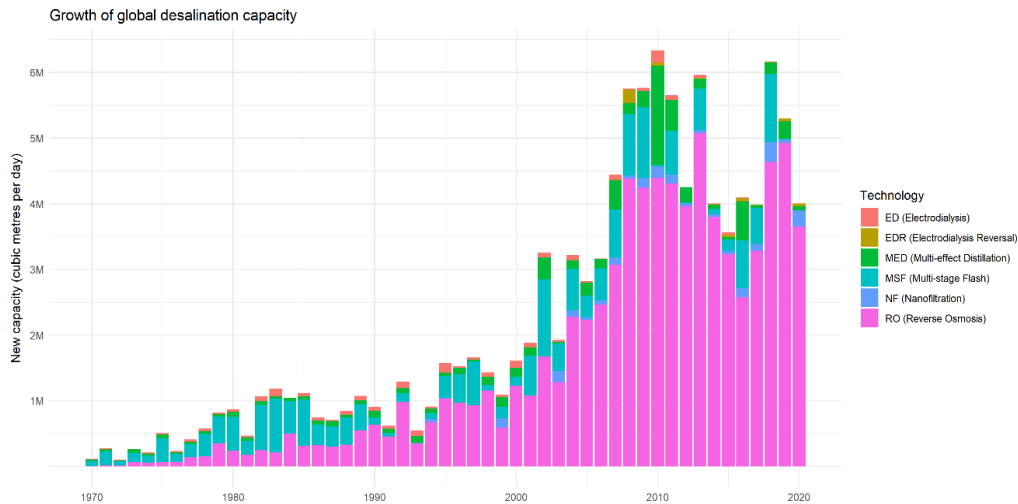


Figure 2: Nouvelle capacité de Dessalement ajoutée chaque année dans le monde (1970-2020), par type de technologie selon GWI DesalData (2021)

Les régions qui ont recours de manière significative au dessalement pour répondre à leurs besoins en eau douce incluent principalement le Moyen-Orient, l’Afrique du Nord, les États-Unis (notamment les États de la Floride et de la Californie), la Chine, l’Australie ainsi que certaines zones du continent européen (figure 2). À elles seules, les régions du Moyen-Orient et d’Afrique du Nord concentrent environ 48 % de la capacité mondiale de production d’eau douce issue du dessalement, ce qui en fait les principaux pôles d’exploitation de cette technologie à l’échelle internationale.

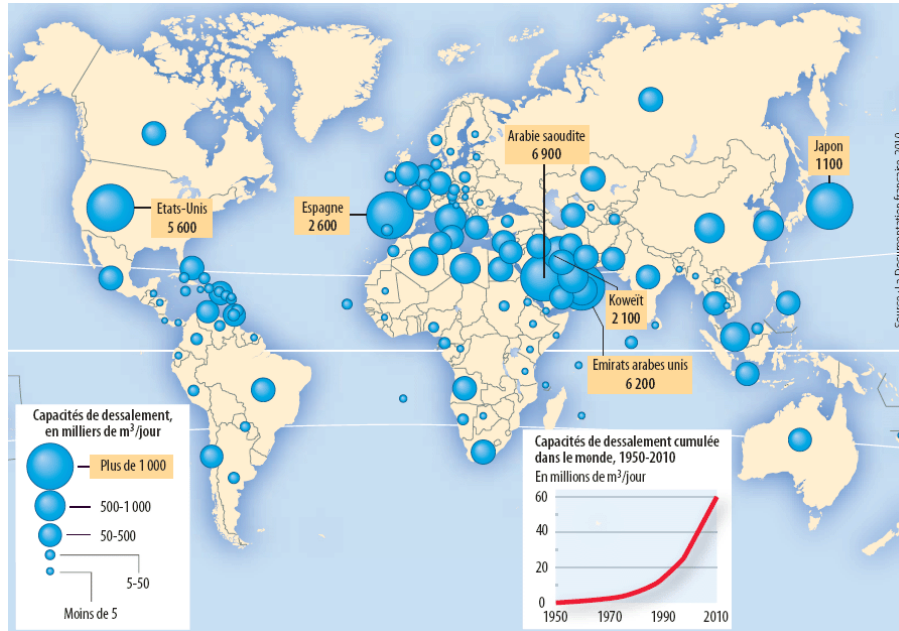


Figure 3: Répartition mondiale de la capacité de production d’eau dessalée et répartition mondiale de l’utilisation par secteur d’activité (Alternatives économiques, 2010).

La production d’eau dessalée est désormais largement répandue à l’échelle mondiale, avec une forte concentration au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, où les besoins en eau potable sont élevés. Dans d’autres régions, l’usage varie: en Asie, le dessalement alimente

principalement le secteur énergétique, tandis qu'en Amérique du Sud, en Amérique du Nord, en Europe et en Afrique australe, il est majoritairement utilisé à des fins industrielles. La majorité des installations se trouvent sur les zones côtières, permettant un accès direct à l'eau de mer et une production à plus grande échelle. Les unités situées à l'intérieur des terres sont moins fréquentes et généralement plus petites. Bien que près de la moitié des usines desservent des usages industriels, environ 62 % de l'eau dessalée produite dans le monde est destinée à la consommation humaine, ce qui illustre le rôle central du dessalement dans la gestion de la pénurie d'eau (Jones et al., 2019).

1.5 Situation actuelle du dessalement en Algérie

Entre 2002 et 2004, le Ministère des Ressources en Eau (MRE) a mené une étude globale pour définir une stratégie nationale de dessalement à court, moyen et long terme. Cette étude a couvert 30 wilayas, incluant 16 régions côtières et 14 zones intérieures, réparties en cinq grandes régions :

- Région d'Oran : Tlemcen, Aïn Témouchent, Oran, Mostaganem, Mascara.
- Région de Chlef : Relizane, Chlef, Aïn Defla.
- Région d'Alger : Tipaza, Alger, Boumerdès, Tizi Ouzou, Béjaïa, Blida, Médéa, Bouira.
- Région de Constantine : Jijel, Skikda, Annaba, El Tarf.
- Région du Sahara : comprenant des projets de dessalement d'eaux saumâtres et le transfert d'eau d'In Salah à Tamanrasset sur 750 km, opérationnel depuis plusieurs années.

Cette démarche illustre les efforts de l'Algérie pour surmonter le déficit hydrique en diversifiant ses ressources.

1.6 Le futur du dessalement en Algérie

Dans les années à venir, la capacité de production en eau dessalée en Algérie devrait atteindre environ 3,5 millions de mètres cubes par jour, permettant de couvrir les besoins des populations vivant dans un rayon de 50 km autour de la côte méditerranéenne. Grâce à ce vaste programme de développement, l'Algérie a progressé du 8^e au 6^e rang mondial en matière de capacités de dessalement. Elle occupe désormais la 1^{re} place en Afrique, la 3^e dans le monde arabe, et se positionne parmi les leaders mondiaux aux côtés de pays comme l'Australie et l'Espagne, notamment en termes de croissance rapide des infrastructures.

Ce positionnement stratégique est également favorisé par la longueur importante de son littoral méditerranéen, estimée à environ 2148 kilomètres, ce qui constitue un atout géographique majeur pour le déploiement des stations de dessalement le long des zones les plus peuplées du pays (MRE,2024).

Dans le cadre de la stratégie nationale de dessalement à l'horizon 2030, plusieurs nouveaux projets structurants sont en cours de réalisation, notamment les stations de Cap Djinet, El Tarf, Béni Saf II, Fouka II, Corso, Tighzirt, ainsi que Collo. Ces installations viennent s'ajouter aux unités existantes pour renforcer la sécurité hydrique nationale, en particulier dans les zones fortement urbanisées et confrontées à un stress hydrique chronique.

Ce développement s’inscrit dans une stratégie nationale visant à assurer une gestion durable et résiliente des ressources hydriques, tout en réduisant la vulnérabilité aux effets du changement climatique et aux pénuries d’eau.

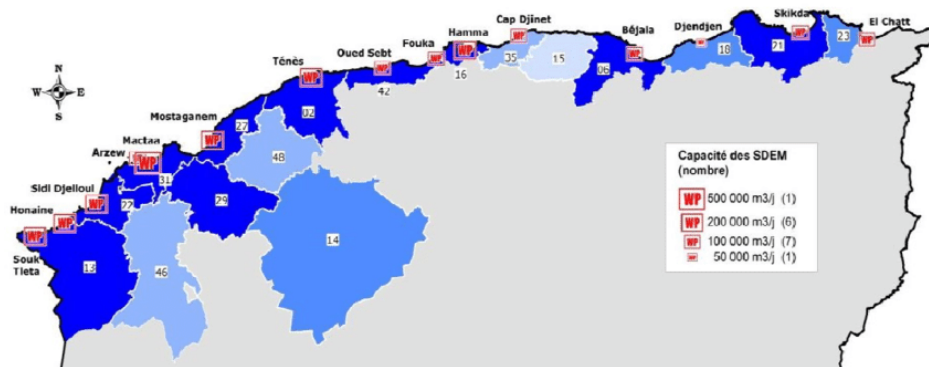


Figure 4: Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie (Kettab, 2015).

1.7 Les procédés de dessalement de l’eau de mer

1.7.1 Les procédés membranaires

a. Osmose inverse

L’osmose est un phénomène naturel où, à travers une membrane semi-perméable, l’eau migre d’une solution moins concentrée en sels vers une solution plus concentrée. En osmose inverse, le processus est inversé : une pression supérieure à la pression osmotique (environ 29 bars pour l’eau de mer) force l’eau douce à traverser la membrane, retenant les sels dissous. Les membranes modernes, constituées de polyamide aromatique, offrent un bon équilibre entre perméabilité et sélectivité, grâce à leur faible épaisseur et porosité optimisée. Le procédé fonctionne sous des pressions élevées, généralement de 60 à 70 bars, pour garantir un débit suffisant d’eau douce. Pour prévenir l’encrassement des membranes, les installations de dessalement nécessitent des systèmes de prétraitement et de pots-traitement efficaces (Kettab, 2011).

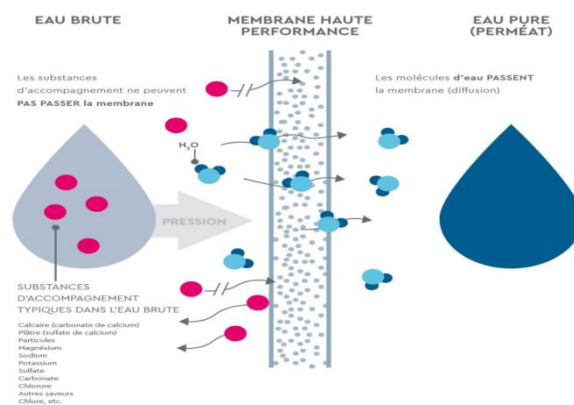


Figure 5 : Principe de fonctionnement du dessalement par osmose inverse (BWT, 2024).

1.7.2 Les procédés thermiques par distillation

La distillation est une technique ancienne qui utilise la chaleur pour vaporiser l'eau salée. Les sels, non volatils, restent dans le liquide, tandis que la vapeur est condensée pour obtenir de l'eau douce. Pour réduire la température d'évaporation et minimiser les risques d'entartrage et de corrosion, le procédé est réalisé sous pression réduite. Selon la technologie utilisée : (i) **Mufl-FLASH** : température de distillation inférieure à 120°C. (ii) **Multiple-effet** : température inférieure à 70°C, mais plus exposée à l'entartrage en raison des échangeurs de chaleur. La principale limite des procédés thermiques réside dans leur forte consommation énergétique. En effet, la vaporisation d'un kilogramme d'eau nécessite environ 2250 kJ (à 100°C), ce qui est directement lié à l'enthalpie de vaporisation (Bandelier, 2016).

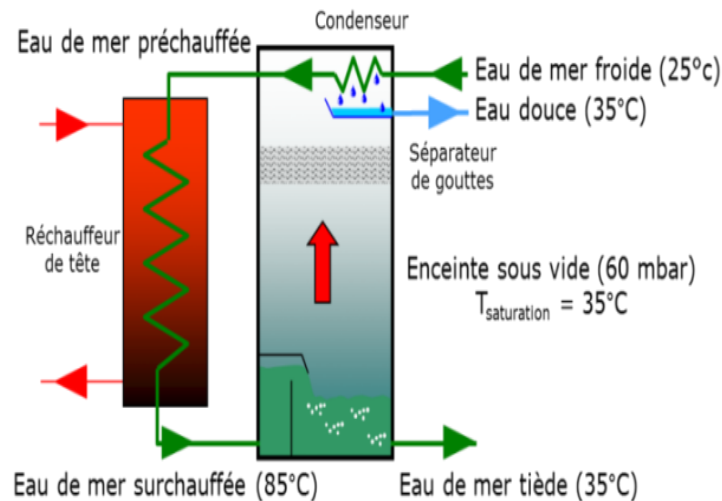


Figure 6 : Principe de fonctionnement du dessalement par procédés thermiques (Bandelier, 2016)

a. Distillation par détente successive (MSF)

La distillation par détente successive, ou vaporisation instantanée (MSF), est le procédé thermique le plus industrialisé pour la production d'eau douce à grande échelle. L'eau de mer est d'abord chauffée sous pression jusqu'à sa température de saturation, puis introduite dans une enceinte où la pression est inférieure, provoquant une vaporisation instantanée (flash). La vapeur produite est condensée sur des tubes situés dans l'enceinte, tandis que l'eau passe à un étage suivant à une pression encore plus basse. L'eau de mer est préchauffée en circulant dans les tubes des condenseurs, récupérant ainsi l'enthalpie de la vapeur condensée, ce qui réduit la consommation énergétique globale. Une installation industrielle peut compter jusqu'à 40 étages successifs, mais ce procédé manque de flexibilité et est adapté uniquement aux grandes capacités à régime constant. Les matériaux utilisés, comme le cupro-nickel ou le titane, sont choisis en fonction des températures de fonctionnement (Boukhriss, 2016).

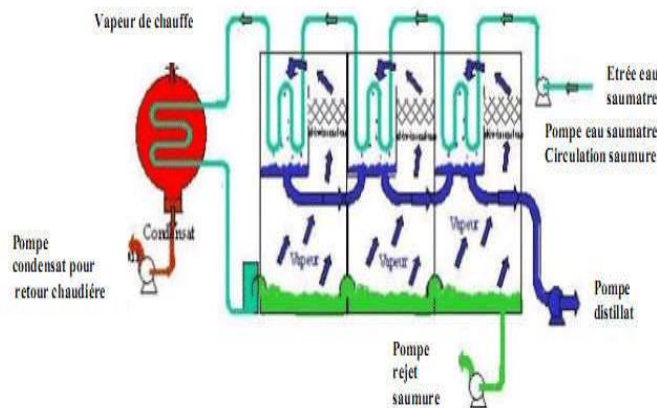


Figure 7 : Principe de fonctionnement du dessalement par détente successive (MSF)
(Boukhriss, 2016)

b. **Distillation par multiple-effet (MED)**

La distillation multiple-effet (MED) repose sur une série d'enceintes, appelées effets, à températures et pressions décroissantes. La vapeur produite dans un effet est condensée pour chauffer l'eau de mer dans l'effet suivant, ce qui entraîne une vaporisation en cascade. Ce recyclage thermique permet d'optimiser la consommation énergétique. L'eau de mer est chauffée progressivement grâce à des condenseurs et des réchauffeurs d'appoint, limitant l'apport d'énergie nécessaire pour atteindre la température de saturation. Chaque effet fonctionne avec un écart de température minimal pour garantir l'évaporation sans apport de chaleur supplémentaire, complété par un phénomène de détente flash de la saumure entre les effets. Pour améliorer les performances, les installations MED peuvent être associées à un système de thermos-compression de vapeur (TVC), qui réutilise la vapeur basse pression en la comprimant pour en faire une source d'énergie thermique. Cette technologie fonctionne comme une pompe à chaleur semi-ouverte. Les performances d'une installation MED sont mesurées par le GOR (Gain Output Ratio), indiquant la quantité d'eau douce produite par kilogramme de vapeur fourni. Bien que le procédé soit mature, des améliorations restent possibles, notamment pour réduire l'énergie requise au premier effet (Boukhriss, 2016).

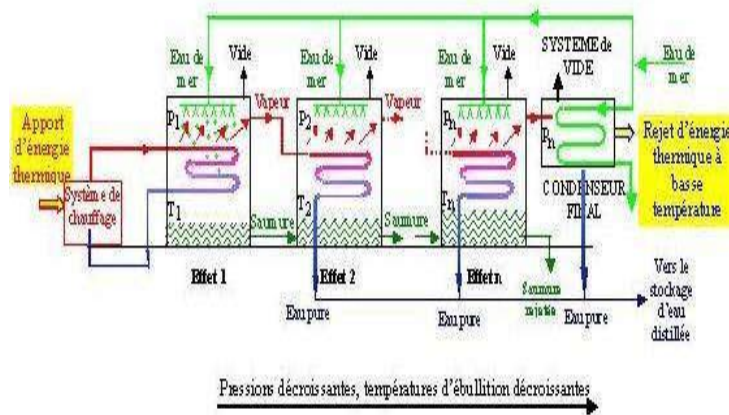


Figure 8 : Principe de fonctionnement du dessalement par multiple-effet (MED)
(Boukhriss, 2016)

c. Vaporisation par compression mécanique (MVC)

La vaporisation par compression mécanique (MVC) est un procédé thermique de dessalement qui repose sur la réutilisation de la vapeur produite pendant l'évaporation. Dans ce système, l'eau de mer est chauffée pour produire de la vapeur, laquelle est ensuite comprimée mécaniquement à l'aide d'un compresseur. Cette compression augmente sa température et sa pression, permettant de la réutiliser comme source de chaleur pour évaporer davantage d'eau. Le cycle est ainsi fermé et très économe en énergie. Ce procédé est particulièrement adapté aux unités de capacité moyenne à petite, comme celles utilisées dans les hôtels ou les installations industrielles isolées, car il consomme moins d'énergie thermique que les autres procédés de distillation. Sa consommation énergétique tourne autour de 7 à 12 kWh/m³ d'eau douce produite, ce qui est relativement bas pour un procédé thermique (El-Dessouky & Ettouney, 2002).

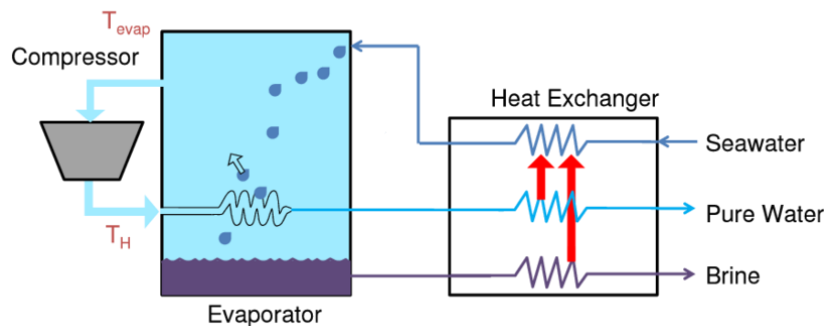


Figure 9: Principe de fonctionnement du dessalement par MVC (Bahar & al, 2004)

d. Vaporisation par compression thermique (TVC)

La vaporisation par compression thermique (TVC), aussi appelée distillation par recompression thermique de la vapeur, est un procédé de dessalement basé sur l'utilisation de la vapeur vive (souvent issue d'une chaudière) pour comprimer thermiquement la vapeur produite durant l'évaporation. Cette vapeur recomprimée, plus chaude, est ensuite réinjectée dans le système pour chauffer l'eau de mer à nouveau, réduisant ainsi la demande en vapeur fraîche. Bien que moins économe que le MVC en termes d'énergie, le TVC est souvent utilisé dans les unités à grande capacité, notamment combiné à la distillation à effets multiples (MED-TVC). Ce procédé est apprécié pour sa fiabilité et sa capacité à fonctionner avec de la vapeur de récupération industrielle. Cependant, sa consommation énergétique reste plus élevée, entre 20 et 40 kWh/m³, et dépend de la qualité de la source thermique disponible (Gude, 2015).

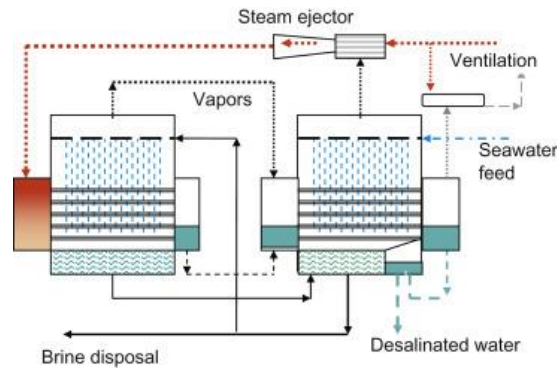


Figure 10: Principe de fonctionnement du dessalement par TVC (Vassilis, 2016)

1.8 Intégration des énergies renouvelables dans le dessalement

Actuellement, l'énergie utilisée pour alimenter les procédés de dessalement provient majoritairement de combustibles fossiles, ce qui pose des problèmes de durabilité environnementale et économique. Les alternatives durables incluent :

1.8.1 Couplage avec des sources d'énergies renouvelables

- 1) **Énergie solaire** : Utilisation d'installations photovoltaïques ou thermiques pour générer la chaleur ou l'électricité nécessaires.
- 2) **Énergie éolienne** : Production d'électricité pour des systèmes comme l'osmose inverse ou l'alimentation des pompes et compresseurs.
- 3) **Énergie géothermique** : Exploitation de la chaleur terrestre pour chauffer l'eau de mer dans les premiers stades du processus.
- 4) **Poly-génération** : Cette approche optimise l'utilisation de la chaleur produite par d'autres systèmes industriels, comme les rejets thermiques de centrales électriques ou d'incinérateurs. Elle permet de produire de l'eau douce, de l'énergie et d'autres utilités (eau chaude, froid) à partir d'une seule source énergétique.
- 5) **Modélisation en régime dynamique** : Les sources renouvelables, souvent variables, nécessitent des systèmes capables de s'adapter aux fluctuations de puissance et de température. Le procédé MED, en raison de sa flexibilité et de son efficacité énergétique, est particulièrement adapté pour ces scénarios.

1.9 Problèmes techniques rencontrés dans le dessalement

Dans les unités de dessalement, notamment celles utilisant des procédés membranaires comme l'osmose inverse, plusieurs problématiques techniques peuvent compromettre l'efficacité du traitement et la durabilité des équipements. Parmi les plus fréquentes figurent l'entartrage, le colmatage et la corrosion, qui affectent la performance globale des installations. Le tableau ci-dessous présente de manière comparative les causes, les conséquences et les solutions associées à chacun de ces phénomènes.

Table 1 : Principaux problèmes techniques rencontrés dans les systèmes de dessalement et leurs solutions

	Entartrage	Colmatage (fig. 11)	Corrosion
Cause	Précipitation de sels (CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaSO_4) sur les surfaces d'échange	Accumulation de matières organiques et formation de bio-films, particulièrement dans les membranes des procédés comme l'osmose inverse	Interaction chimique entre les métaux et l'eau salée
Conséquences	Réduction des performances des échangeurs, l'augmentation des pertes de charge, et l'obturation des conduites	Réduction de la capacité de production et augmentation des coûts d'entretien	Dégradation des matériaux (tuyaux, échangeurs), et la pollution de l'eau douce par des particules métalliques
Solutions	Traitements chimiques pour inhiber les dépôts ou amélioration des conditions de fonctionnement	Prétraitement adéquat (coagulation-floculation, filtration)	Usage de matériaux résistants à la corrosion, comme le titane ou des alliages spécifiques (cupro-nickel)

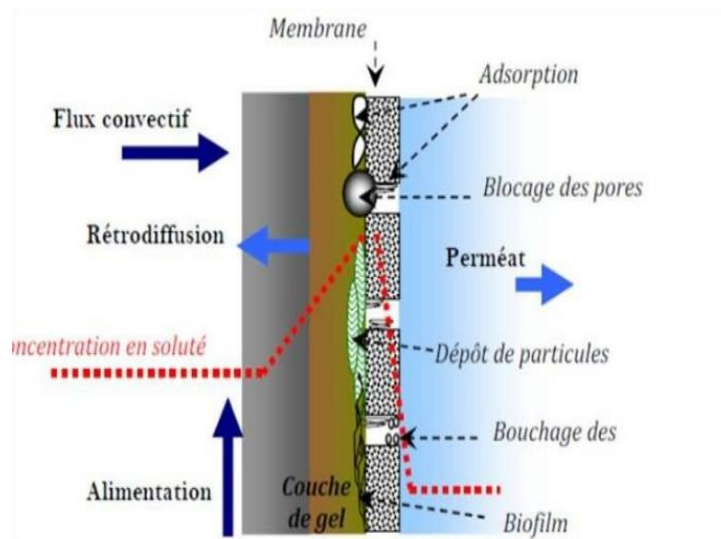


Figure 11 : Représentation des différents mécanismes de colmatage (Touati, 2023)

1.10 Avantages et inconvénients du dessalement

a. Avantages :

- Utilisation d'une ressource inépuisable et non polluante: l'eau de mer.
- La proximité des installations côtières avec les zones urbaines et industrielles réduit les coûts de transport d'eau.
- Progrès technologiques récents, notamment avec l'osmose inverse, qui améliorent les performances.

b. Inconvénients :

- Investissements initiaux et consommation énergétique élevés

Le dessalement nécessite des infrastructures lourdes et des technologies avancées, notamment pour les procédés comme l'osmose inverse. Cela implique des coûts initiaux très importants, non seulement pour la construction des usines mais aussi pour la maintenance à long terme. De plus, le processus est énergivore, surtout dans les régions où l'énergie provient encore de sources fossiles, ce qui augmente les coûts d'exploitation et l'empreinte carbone du système (Elimelech, 2011).

- **Impacts environnementaux significatifs**

- a. **Émissions de gaz à effet de serre**

L'utilisation d'énergie fossile dans la majorité des usines de dessalement contribue aux émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, exacerbant le changement climatique mondial. Bien que certaines installations intègrent des énergies renouvelables, cela reste encore limité à l'échelle mondiale (Jones, 2019).

- b. **Perturbation des écosystèmes côtiers**

Les rejets de saumure, fortement concentrés en sel et parfois en produits chimiques, peuvent perturber la faune et la flore marine. L'augmentation de la salinité dans les zones de rejet provoque la dégradation de certains habitats côtiers, notamment les herbiers marins et les récifs coralliens (Lattemann, 2008).

- c. **Contamination par les produits de nettoyage**

Les membranes utilisées dans le processus de dessalement doivent être régulièrement nettoyées avec des produits chimiques comme l'acide citrique ou l'hypochlorite. Ces substances, lorsqu'elles sont rejetées sans traitement suffisant, peuvent contaminer les eaux marines et menacer les organismes aquatiques (Khan, 2004)

- **Limites d'adoption sociale et territoriale**

Le dessalement est parfois perçu comme une technologie « de luxe » ou réservée aux pays riches. Dans certains contextes, les coûts et les impacts environnementaux soulèvent des objections sociales ou politiques. De plus, l'installation d'usines dans des zones touristiques ou à haute valeur écologique peut provoquer des conflits d'usage du territoire (Cooley, 2006).

1.11 L'empreinte carbone

L'empreinte carbone est un outil d'évaluation environnementale qui mesure la quantité totale de gaz à effet de serre (GES) émise par une activité humaine, un produit, un service ou une organisation, sur l'ensemble de son cycle de vie. Ces émissions sont généralement exprimées en kilogrammes ou tonnes équivalent dioxyde de carbone (kg CO₂-eq ou t CO₂-eq), ce qui permet de standardiser différents types de GES (comme le méthane CH₄ ou le protoxyde d'azote N₂O) selon leur pouvoir de réchauffement global (PRG) (Wiedmann & Minx, 2008).

Selon Wiedmann & Minx (2008), l'empreinte carbone se définit comme « la quantité totale d'émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre causées directement et indirectement par une activité ou cumulées tout au long des étapes du cycle de vie d'un produit ». Cette

approche s'inscrit dans le cadre plus large de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un système ou d'un produit tout au long de son existence, de l'extraction des matières premières à la gestion des déchets (Pandey & al., 2011).

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART – CONFORMITE ENVIRONNEMENTALE DES STATIONS DE DESSALEMENT

2.1 Définition conceptuelle de la conformité environnementale

La conformité environnementale désigne l'ensemble des mécanismes réglementaires, techniques et managériaux permettant aux installations industrielles notamment les stations de dessalement d'opérer dans le respect des exigences écologiques, légales et normatives. Elle implique l'application rigoureuse de réglementations environnementales (EIE, ISO 14001), la mise en œuvre de technologies propres et l'adoption d'approches durables (ISO, 2015 ; Elimelech & Phillip, 2011). Elle s'inscrit également dans une logique de prévention des risques écologiques et d'intégration de l'environnement dans les décisions industrielles.

2.2. Cadre juridique et normatif : une architecture internationale en mutation

Le système juridique international relatif aux activités de dessalement se fonde sur plusieurs textes fondamentaux :

La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) impose la protection du milieu marin (Article 192) face aux pollutions issues d'activités anthropiques telles que le dessalement.

La Déclaration de Rio (1992), via ses principes de précaution (n°15) et de responsabilité (n°16), recommande une internalisation des externalités environnementales.

Les Directives de la Banque mondiale (2010) rendent obligatoires les études d'impact, la participation des parties prenantes et la mise en place de plans de gestion environnementale.

Le Protocole de Barcelone, appliqué à la Méditerranée, fixe des seuils physico-chimiques stricts pour les rejets en mer.

Cette structure juridique tend vers un durcissement des normes environnementales, notamment dans le cadre des financements internationaux (Saeed & Al-Mutaz, 2022).

2.3 Focus algérien : état de la recherche nationale

2.3.1 Impacts environnementaux documentés

En Algérie, Bensadok et al. (2009) ainsi que Grimes (2015) soulignent une élévation significative de la salinité et de la température dans les zones de rejet, accompagnée d'une diminution de l'oxygène dissous, ce qui constitue une menace pour la biodiversité marine.

Selon le Plan Bleu (2024), la présence de produits de nettoyage, tels que les biocides et les antitartres, entraîne une toxicité aiguë, particulièrement préoccupante dans les zones à faible hydrodynamisme.

2.3.2 Bilan carbone et rendement énergétique

Une étude multi-sites (JECDD, 2023) portant sur 11 stations de dessalement algériennes révèle une empreinte carbone significative, essentiellement liée à l'usage de l'électricité fossile. Cela souligne l'importance d'intégrer des sources d'énergies renouvelables dans les systèmes d'alimentation.

2.3.3 Vers une stratégie environnementale intégrée

Les recommandations issues des recherches nationales incluent :

L'utilisation de puits côtiers à faible impact pour le captage.

La réalisation d'études océanographiques préalables pour optimiser les sites de rejet.

La généralisation d'un système de management environnemental selon la norme ISO 14001 (Plan Bleu, 2024).

2.4 Recherches internationales : impacts, solutions et innovations

2.4.1 Effets hydrodynamiques et physico-chimiques

Les travaux internationaux confirment que les rejets de saumure, plus denses, induisent une stratification thermique et salée, perturbant les cycles biogéochimiques (Lattemann & Höpner, 2008). La sédimentation excessive de la saumure altère les habitats benthiques.

2.4.2 Menace sur la biodiversité marine

Les systèmes de pompage induisent une mortalité significative du zooplancton et des larves de poissons, impactant la reproduction naturelle des espèces marines (UNEP, 2008).

2.4.3 Consommation énergétique et émissions de CO₂

Les procédés à osmose inverse restent gourmands en énergie (3–5 kWh/m³), générant jusqu'à 0,68 kg CO₂/m³ (Elimelech & Phillip, 2011). Ce bilan carbone soulève des préoccupations climatiques.

2.4.4 Technologies atténuatrices et pratiques durables

Diverses approches ont été proposées pour réduire l'impact :

Diffusion maîtrisée de la saumure via des éjecteurs multidirectionnels.

Valorisation des saumures (extraction de lithium, magnésium, etc.).

Hybridation énergétique avec des sources renouvelables comme le solaire ou l'éolien (Gude, 2016).

2.5 Tendances normatives et intégration ESG

L'évolution des normes internationales se caractérise par:

L'accent mis par l'ISO 14001: 2015 sur l'amélioration continue et la conformité réglementaire (ISO, 2015).

Les recommandations du GIEC (2019) en faveur de la réduction des émissions liées au dessalement.

L'introduction des critères ESG (Environnement, Social, Gouvernance) dans les processus d'évaluation des projets, influençant fortement les bailleurs de fonds.

Conformité environnementale des stations de dessalement

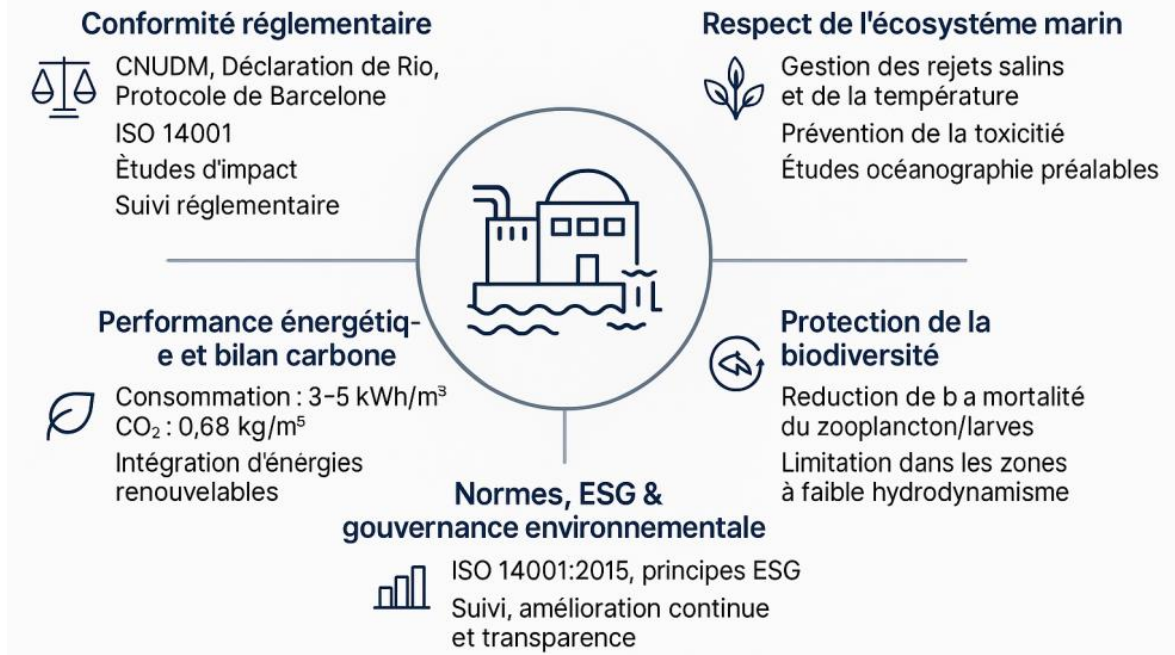


Figure 12: Cadre conceptuel de la conformité environnementale des stations de dessalement : piliers réglementaires, technologiques et durables ; (Schéma conçu par les auteurs à titre de synthèse personnelle du contenu étudié).

PARTIE II

CONTEXTE ET STRATEGIE NATIONALE

CHAPITRE 3

ANALYSE DU CONTEXTE ET DE LA STRATEGIE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN ALGERIE

Le dessalement de l'eau de mer représente une solution incontournable pour pallier la rareté des ressources hydriques en Algérie. Situé dans une région semi-aride à aride, le pays subit une pression croissante sur ses ressources en eau en raison de la croissance démographique, du développement économique et des effets du changement climatique (Benblidia, 2019).

Pour répondre à ces défis, le gouvernement a adopté une stratégie nationale de dessalement visant à assurer un approvisionnement stable en eau potable et à réduire la dépendance aux eaux souterraines et superficielles (MRE, 2021).

Avec des ressources en eau renouvelables estimées à environ 11 milliards de m³ par an, l'Algérie peine à satisfaire les besoins d'une population de plus de 40 millions d'habitants (Kettab, 2001). De plus, la répartition spatiale des ressources hydriques est inégale, accentuant les déséquilibres entre les régions. Dans ce contexte, le dessalement s'est imposé comme une alternative essentielle pour garantir la sécurité hydrique, et plusieurs stations ont été mises en service depuis les années 2000, notamment à Alger, Oran et Annaba (ANRH, 2022).

Cependant, cette stratégie pose plusieurs questions quant à l'efficacité des infrastructures pour répondre aux besoins croissants, à l'encadrement réglementaire du développement et de l'exploitation des stations, ainsi qu'aux défis techniques, économiques et environnementaux associés au dessalement.

Pour analyser ces enjeux, une méthodologie combinant plusieurs approches a été adoptée. Une revue documentaire a permis de collecter des données quantitatives et qualitatives sur la capacité de production, les technologies employées et les politiques publiques mises en place (Bouchelaghem, 2021). Une analyse des politiques publiques a été menée pour examiner les cadres législatifs et réglementaires encadrant le dessalement et identifier les leviers institutionnels et économiques soutenant son développement (MEM, 2023). Enfin, des études de cas sur certaines stations, notamment celles de Beni Saf et d'El Tarf, ont été réalisées afin d'évaluer leur contribution effective à l'approvisionnement en eau potable et de cerner les défis rencontrés en matière de gestion et d'impact environnemental (ANRH, 2022).

Cette analyse servira de base aux chapitres suivants, qui examineront les scénarios de développement du dessalement, ses impacts environnementaux et les innovations technologiques susceptibles d'améliorer son efficacité et sa durabilité.

3.1 Programmes d'urgence du gouvernement algérien en matière de dessalement de l'eau de mer

3.1.1 Programme d'urgence de 2021-2024 : Construction de cinq nouvelles stations

Ce programme vise à réduire la dépendance aux barrages affectés par la sécheresse et sécuriser l'alimentation en eau potable des grandes villes côtières (Alger, Oran, Béjaïa, etc.) (APS, 2021, juillet 13). Ce programme a été lancé par le ministère des Ressources en eau en 2021, avec la construction de 5 stations de dessalement (Bateau Cassé à Alger, Cap Djinet, El Tarf, etc.), d'une capacité totale visée : 1 million m³/jour. Ce projet est géré par l'Algérienne des Eaux (ADE) et Sonatrach.

3.1.2 Programme stratégique du Plan national de l'eau 2030

Ce programme vise à intégrer le dessalement comme source principale d'eau potable dans les zones côtières à l'horizon 2030. Il appuie le développement durable des ressources non conventionnelles. Il est prévu la construction de 15 stations supplémentaires, avec pour objectif d'atteindre 3,8 millions de m³/jour d'ici 2030. Ce programme est intégré dans le Plan national de l'eau révisé par le ministère (ANRH, 2022).

3.2 Vision et stratégie nationale du dessalement de l'eau de mer en Algérie

L'Algérie est l'un des pays les plus touchés par le stress hydrique en raison de son climat aride et semi-aride, où les précipitations sont faibles et irrégulières. La disponibilité des ressources en eau renouvelables est estimée à environ 11 milliards de m³ par an, un volume largement insuffisant pour répondre aux besoins d'une population en croissance continue (Guergueb & Ferhat, 2021). Par ailleurs, l'impact du changement climatique aggrave cette situation en augmentant la fréquence et l'intensité des périodes de sécheresse, ce qui affecte directement la recharge des nappes phréatiques et des barrages (Kherbache, 2018). Face à cette situation critique, l'état algérien a intégré le dessalement de l'eau de mer comme une composante clé de sa politique de gestion des ressources hydriques. Cette approche s'inscrit dans une volonté de diversification des sources d'approvisionnement en eau afin de réduire la dépendance aux ressources conventionnelles, notamment les eaux souterraines et les barrages, qui subissent une surexploitation croissante (ANRH, 2022).

3.2.1 Présentation des besoins hydriques de l'Algérie et défis liés à la rareté de l'eau

L'Algérie fait face à un déséquilibre entre l'offre et la demande en eau. Selon le ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique, la consommation d'eau potable dépasse 3,5 milliards de m³ par an, alors que la capacité de mobilisation des ressources hydriques reste insuffisante pour garantir un approvisionnement stable et sécurisé (MRE, 2021). De plus, la répartition spatiale inégale des ressources accentue les disparités régionales : les zones nordiques bénéficient d'un accès relativement plus aisé à l'eau que les régions sahariennes, où les ressources sont limitées et coûteuses à exploiter (Bouchelaghem, 2013).

En raison de ces contraintes, la gestion de l'eau en Algérie repose sur trois principales sources: les eaux de surface (barrages et retenues collinaires), les eaux souterraines (nappes phréatiques et fossiles) et les eaux non conventionnelles, incluant le dessalement et la réutilisation des eaux usées traitées (Kherbache, 2020). Toutefois, l'exploitation intensive des nappes phréatiques, couplée aux effets du changement climatique, a entraîné une baisse alarmante des niveaux d'eau souterraine, menaçant à la fois la sécurité hydrique et la durabilité des écosystèmes aquatiques (ANRH, 2022).

3.2.2 Politiques nationales de l'eau et intégration du dessalement dans la stratégie hydrique

Pour faire face aux défis du stress hydrique, le gouvernement algérien a mis en place plusieurs plans stratégiques visant à garantir un accès durable à l'eau potable. Parmi eux, la Stratégie Nationale de l'Eau, élaborée dans le cadre du PNE, accorde une place centrale aux solutions alternatives, notamment le dessalement de l'eau de mer (MRE, 2021). Cette stratégie repose sur deux objectifs principaux : (i) Assurer une autonomie hydrique en développant des infrastructures de production d'eau potable à partir de l'eau de mer ; (ii) Réduire la vulnérabilité des ressources conventionnelles face aux aléas climatiques. Actuellement, 11 stations de dessalement sont en service le long du littoral algérien, couvrant environ 17 % des besoins en eau potable du pays. L'objectif du gouvernement est d'augmenter cette capacité pour atteindre 60 % d'ici 2030, à travers la mise en service de nouvelles infrastructures, notamment à Zéralda, Cap Djinet et El Tarf (MEM, 2023).

3.2.3 Stratégies gouvernementales et programmes de développement

Le développement du dessalement en Algérie repose sur plusieurs programmes structurants, intégrés dans les politiques publiques visant à renforcer la résilience hydrique du pays. Parmi ces programmes, on retrouve :

- **Le Programme National de Développement Agricole (PNDA)** : vise à sécuriser l'approvisionnement en eau pour l'irrigation en encourageant l'utilisation des eaux non conventionnelles, y compris le dessalement (MRE, 2020).
- **Le Programme National de l'Eau et de l'Environnement (PNEE)** : met l'accent sur l'optimisation de la gestion de l'eau et l'amélioration des infrastructures de dessalement existantes afin de garantir un rendement énergétique optimal et une réduction des coûts d'exploitation (ANRH, 2022).
- **Les partenariats public-privé (PPP) dans le secteur du dessalement** : la plupart des stations sont développées en collaboration avec des entreprises étrangères spécialisées, comme la compagnie espagnole Abengoa, qui a construit plusieurs installations en Algérie, dont la station de Skikda (MEM, 2023).

3.2.4 Comparaison avec les stratégies adoptées par d'autres pays méditerranéens

L'Algérie n'est pas le seul pays méditerranéen à avoir recours au dessalement pour pallier le stress hydrique. D'autres nations, comme l'Espagne, l'Italie, la Tunisie ont développé des infrastructures de dessalement à grande échelle, chacune adoptant des stratégies adaptées à ses spécificités géographiques et économiques. Chaque pays a mis en place une approche spécifique en fonction de ses conditions géographiques, économiques et législatives.

Algérie : Une expansion rapide pour répondre aux besoins croissants. L'Algérie a mis en place une politique ambitieuse pour réduire sa dépendance aux ressources hydriques conventionnelles. Actuellement, 23 stations de dessalement sont en service, produisant environ 840 millions de m³ d'eau par an, soit 17 % des besoins nationaux en eau potable. Le gouvernement vise une production de 2 milliards de m³/an d'ici 2030 grâce à la construction de 14 nouvelles stations. Le cadre juridique du dessalement en Algérie est régi par le Décret exécutif n° 23-103, promulgué en mars 2023, établissant l'Agence nationale du dessalement de l'eau de mer, responsable de la mise en œuvre de la politique nationale dans ce domaine (MRE, 2023).

Espagne : Un modèle d'optimisation énergétique et d'adaptation aux sécheresses. L'Espagne est une pionnière du dessalement en Europe, en particulier dans les régions côtières du sud et de l'est, fortement touchées par la pénurie d'eau. Avec une capacité de 405 millions de m³/an, elle s'appuie sur des technologies avancées de membranes haute

performance pour améliorer l'efficacité énergétique. Le cadre législatif espagnol repose sur la Loi sur l'eau n° 29/1985, adoptée par le Parlement espagnol le 2 août 1985, qui vise à encadrer l'utilisation des ressources hydriques et à en garantir la durabilité (Ministère de la Transition écologique, 2020).

Tunisie : Une montée en puissance progressive. La Tunisie a adopté une approche progressive, commençant par le dessalement des eaux saumâtres avant d'élargir ses capacités au dessalement de l'eau de mer. En 2018, elle a mis en service sa première grande station de dessalement à Djerba, avec une capacité de 50 000 m³/jour. L'objectif est de porter la part du dessalement à 30 % de l'approvisionnement national d'ici 2030. Le cadre juridique est défini par la Loi sur l'eau n° 16-75, adoptée le 31 mars 1975, qui régit l'exploitation et la protection des ressources en eau en Tunisie (République Tunisienne, 1975).

France : Un développement limité mais innovant. Bien que la France ne soit pas confrontée à des niveaux critiques de stress hydrique, elle investit dans le dessalement pour ses îles et certaines zones côtières vulnérables. L'accent est mis sur le développement de systèmes économes en énergie, en partenariat avec des entreprises spécialisées. Le cadre législatif français est défini par la Loi n° 92-3 sur l'eau et les milieux aquatiques, promulguée le 3 janvier 1992, visant à protéger et gérer durablement les ressources en eau (République Française, 1992).

Libye : Projets futurs et coopération internationale. La Libye cherche à renforcer ses infrastructures hydriques à travers des projets de dessalement de l'eau de mer. En 2023, un contrat de 200 millions d'euros a été signé avec une entreprise italienne pour achever des stations de dessalement et de traitement des eaux usées à Tripoli et Misrata, suspendues depuis 2014. La fin des travaux est prévue pour 2026. Le cadre réglementaire libyen est défini par la Loi n° 3 de 1982, adoptée par le Comité populaire général, qui encadre l'exploitation et la protection des ressources en eau (Government of National Unity, 2023).

Italie : Un intérêt croissant pour les technologies du dessalement. Bien que l'Italie ne soit pas fortement dépendante du dessalement, certaines régions côtières et îles souffrent de pénuries d'eau. L'Italie met l'accent sur le développement de solutions innovantes et sur la coopération avec d'autres pays méditerranéens pour renforcer la sécurité hydrique. (Parlement italien, 1994).

Le cadre législatif est défini par la Loi n° 36/1994, connue sous le nom de Loi Galli, adoptée le 5 janvier 1994, qui a restructuré le secteur de l'eau et introduit des principes de gestion durable.

Table 2: Le dessalement de l'eau de mer en Méditerranée : état des lieux, enjeux et perspectives (source : Plan Bleu. 2024)

Pays	Production annuelle d'eau dessalée (millions)	Part de l'eau dessalée dans l'approvisionnement national	Stratégie principale	Cadre législatif
Algérie	840 → objectif 2 milliards (2030)	17 % (objectif 60 % à terme)	Expansion rapide avec de grandes stations	Décret exécutif n° 23-103 (2023)

Pays	Production annuelle d'eau dessalée (millions)	Part de l'eau dessalée dans l'approvisionnement national	Stratégie principale	Cadre législatif
Espagne	405	10-15 %	Optimisation énergétique et modernisation	Loi sur l'eau n° 29/1985
Maroc	179,3 → objectif 1 milliard (2030)	50 % (objectif 2030)	Intégration avec les énergies renouvelables	Loi sur l'eau n° 36-15 (2016)
Tunisie	180	30 % (objectif 2030)	Développement progressif	Loi sur l'eau n° 16-75 (1975)
France	< 50	Négligeable	Solutions innovantes pour les zones spécifiques	Loi n° 92-3 sur l'eau (1992)
Libye	Données indisponibles	Données indisponibles	Projets futurs et coopération	Loi n° 3 de 1982
Italie	Données indisponibles	Faible	Innovation technologique et coopération	Loi Galli n° 36/1994

L'analyse des stratégies adoptées par les pays méditerranéens montre une diversité d'approches adaptées aux besoins et contraintes spécifiques de chaque pays. L'Algérie et l'Espagne figurent parmi les leaders en capacité installée, tandis que le Maroc et la Tunisie développent progressivement leurs infrastructures. La France et l'Italie privilégient l'innovation et la coopération régionale, tandis que la Libye cherche à renforcer son réseau de dessalement grâce à des partenariats internationaux.

Comparativement, l'Algérie se positionne parmi les leaders régionaux avec une production annuelle de 631 millions de m³ d'eau dessalée, mais doit encore relever plusieurs défis, notamment en matière d'optimisation énergétique et de gestion des rejets de saumure (Guergueb & Ferhat, 2021).

3.3 Objectifs quantitatifs du dessalement de l'eau de mer en Algérie

L'Algérie, confrontée à une pénurie d'eau croissante exacerbée par le changement climatique, a adopté une stratégie nationale intégrant le dessalement de l'eau de mer pour répondre aux besoins en eau potable. Cette section examine les objectifs gouvernementaux en matière de production d'eau dessalée, évalue la capacité actuelle et les prévisions futures, analyse la contribution du dessalement à la satisfaction des besoins en eau potable, et évalue les écarts entre les objectifs et la réalité des infrastructures (Kettab, 2015).

3.3.1 Objectifs gouvernementaux en matière de production d'eau dessalée

Le gouvernement algérien a lancé un programme ambitieux visant à augmenter la capacité de production d'eau dessalée pour pallier les défis hydriques. En 2023, un programme a été initié pour accélérer la réalisation de stations de dessalement d'eau de mer (SDEM), avec pour objectif de porter la capacité nationale de production d'eau dessalée à 5,5 millions de mètres cubes par jour, représentant ainsi 60 % des besoins en eau potable du pays (APS, 2023).

Parmi les projets phares, deux nouvelles stations de dessalement d'une capacité de 300 000 m³/jour chacune sont en cours de réalisation: l'une dans la wilaya d'El Tarf, destinée à renforcer l'alimentation en eau potable de l'est du pays, et l'autre à l'ouest d'Alger, visant à satisfaire la demande en eau potable des wilayas d'Alger et de Blida (MEM, 2023).

3.3.2 Capacité actuelle et prévisions de production d'eau dessalée en Algérie

Actuellement, l'Algérie dispose de plusieurs stations de dessalement opérationnelles, contribuant à une production nationale d'environ 3,7 millions de mètres cubes d'eau dessalée par jour (APS, 2023). Avec les projets en cours, notamment les nouvelles stations mentionnées précédemment, la capacité totale devrait atteindre 5,5 millions de m³/jour, alignant ainsi la production sur les objectifs gouvernementaux. Cette augmentation significative de la capacité de dessalement est essentielle pour répondre aux besoins croissants en eau potable, particulièrement dans les régions côtières où la demande est la plus forte (APS, 2023).

3.3.3 Contribution du dessalement à la couverture des besoins en eau potable

Le dessalement joue un rôle crucial dans la stratégie nationale de l'eau en Algérie. Avec l'achèvement des projets en cours, l'eau dessalée devrait représenter 60 % de l'approvisionnement en eau potable du pays (APS, 2023). Cette proportion témoigne de l'importance accordée au dessalement pour assurer une source d'eau fiable et indépendante des variations climatiques. Les stations de dessalement en service ont des capacités variant, certaines dépassant les 100 000 m³/jour, tandis que les nouvelles installations en construction atteignent des capacités de 300 000 m³/jour (Rosa Luxemburg Stiftung, 2023). Cette diversification et augmentation des capacités permettent de mieux sécuriser l'approvisionnement en eau potable pour les populations urbaines et rurales.

La croissance démographique en Algérie (47 millions en 2025, estimés à 51 millions en 2035) entraîne une forte augmentation de la demande en eau, notamment pour l'AEP, l'agriculture et l'industrie. Face au stress hydrique chronique (< 600 m³/hab/an), à la surexploitation des nappes et au changement climatique, les ressources conventionnelles deviennent insuffisantes.

Pour y remédier, l'Algérie mise sur le dessalement de l'eau de mer, avec un objectif de production de **2 milliards m³/an d'ici 2030**, couvrant **jusqu'à 60 % des besoins en eau potable**. Cette stratégie vise à sécuriser l'approvisionnement, réduire la pression sur les ressources naturelles et soutenir le développement socio-économique.

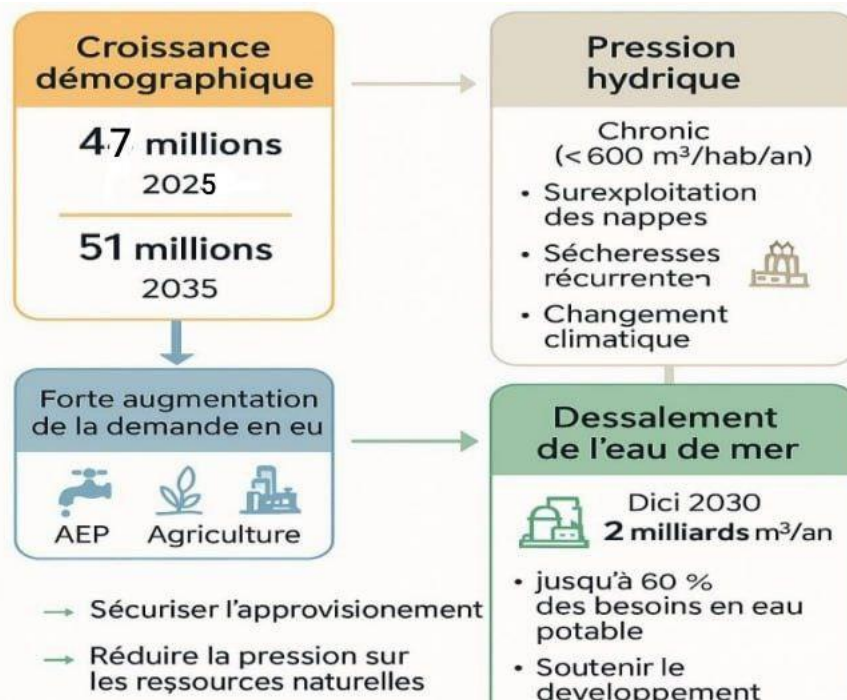


Figure 13 : Lien entre croissance démographique, pression hydrique et dessalement en Algérie (Schéma conçu par les auteurs à titre de synthèse personnelle du contenu étudié).

3.3.4 Évaluation des écarts entre les objectifs et la réalité des infrastructures

Malgré les efforts déployés, des écarts subsistent entre les objectifs fixés et la réalité des infrastructures. Les retards dans la réalisation de certaines stations, les défis techniques et financiers, ainsi que les contraintes liées à la maintenance des installations existantes peuvent affecter la pleine réalisation des objectifs. Par exemple, bien que le programme vise une capacité de 5,5 millions de m³/jour, des retards dans la mise en service de certaines stations pourraient temporairement limiter la production effective. De plus, l'intégration de ces nouvelles capacités dans le réseau de distribution existant nécessite des investissements supplémentaires et une planification rigoureuse pour éviter les déséquilibres régionaux dans l'approvisionnement en eau. L'Algérie a entrepris des démarches significatives pour augmenter sa production d'eau dessalée, avec des objectifs ambitieux alignés sur les besoins croissants en eau potable. Cependant, la réalisation complète de ces objectifs dépendra de la capacité à surmonter les défis infrastructures et à assurer une mise en œuvre efficace des projets en cours (Benblidia & Thivet, 2010).

3.4 Contribution des eaux dessalées et des eaux mixtes dans l'approvisionnement en eau en Algérie

L'Algérie, confrontée à une pression hydrique croissante, a adopté une approche intégrée pour assurer l'approvisionnement en eau potable. Dans ce contexte, le dessalement de l'eau de mer joue un rôle de plus en plus important, venant compléter les autres ressources hydriques disponibles. Cette section examine la répartition géographique des stations de dessalement, compare les différentes sources d'eau utilisées et analyse l'évolution des besoins en eau en mettant en évidence l'importance croissante du dessalement (Aroua, 2018).

3.4.1 Répartition géographique des stations de dessalement et leur rôle dans l’approvisionnement en eau

L’Algérie dispose actuellement de plusieurs stations de dessalement réparties le long de son littoral, avec une capacité totale de production d’environ 3,7 millions de mètres cubes par jour. Ces infrastructures sont stratégiquement situées pour répondre aux besoins des grandes agglomérations côtières, où la demande en eau potable est la plus forte (ANRH, 2022).

Parmi les principales stations de dessalement en service, on peut citer :

- **Mers El Hadjadj (El Mactaa, Oran)** : Capacité de 500 000 m³/jour, couvrant une grande partie des besoins de la ville d’Oran.
- **Ténès (Chlef)** : Capacité de 200 000 m³/jour, alimentant 27 communes de la wilaya.
- **Souk Tlata (Tlemcen)** : Capacité de 200 000 m³/jour, desservant 19 communes, y compris la ville de Tlemcen.
- **Honaïne (Tlemcen)** : Capacité de 200 000 m³/jour, couvrant plusieurs communes de Tlemcen et Sidi Bel Abbès.
- **Béni Saf (Aïn Témouchent)** : Capacité de 200 000 m³/jour, approvisionnant en eau potable une grande partie de la wilaya (MRE, 2021).

Ces stations jouent un rôle crucial dans la sécurisation de l’approvisionnement en eau, notamment dans les zones où les ressources conventionnelles sont insuffisantes. Le gouvernement prévoit d’augmenter cette capacité à 5,5 millions de m³/jour d’ici 2030, grâce à la mise en service de nouvelles stations à Alger, Tipaza et El Tarf (MEM, 2023).

3.4.2 Comparaison des différentes sources d’eau : eaux souterraines, eaux de surface, eaux dessalées

L’approvisionnement en eau potable en Algérie repose sur trois principales sources : les eaux souterraines, les eaux de surface et les eaux dessalées.

- **Les eaux souterraines** : Elles constituent environ **45 %** de l’eau distribuée et proviennent principalement des nappes phréatiques et des forages profonds. Elles sont largement exploitées dans les zones rurales et dans certaines agglomérations urbaines (Guergueb & Ferhat, 2021).
- **Les eaux de surface** : Elles représentent **39 %** de l’approvisionnement en eau potable et proviennent des barrages et des retenues collinaires. Toutefois, ces ressources sont vulnérables aux variations climatiques et aux périodes de sécheresse (Kherbache, 2020).
- **Les eaux dessalées** : Actuellement, elles assurent environ **16 %** de l’eau consommée en Algérie, principalement dans les grandes villes côtières. Ce chiffre est en constante augmentation avec la mise en service de nouvelles stations (ANRH, 2022).

Le recours au dessalement permet de réduire la dépendance aux ressources hydriques conventionnelles, en particulier dans les régions où l’exploitation excessive des nappes phréatiques entraîne une dégradation de la qualité de l’eau et une diminution des réserves disponibles (MRE, 2021).

3.4.3 Évolution des besoins en eau et rôle croissant du dessalement

Les besoins en eau en Algérie augmentent de manière significative en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide et du développement des secteurs agricole et industriel. La consommation moyenne d'eau potable est estimée à **3,5 milliards de m³ par an**, et cette demande est en hausse constante (MRE, 2021).

Face à ces défis, les autorités ont adopté une stratégie nationale visant à renforcer la contribution du dessalement. D'ici **2025**, l'eau dessalée devrait représenter **42 %** de l'approvisionnement total du pays, grâce à la mise en service de nouvelles stations. Une seconde phase prévoit la construction de sept autres stations entre **2025 et 2030**, portant la part du dessalement à **60 %** de l'eau consommée à l'échelle nationale (MEM, 2023).

Cette transition s'inscrit dans une vision à long terme visant à garantir une **sécurité hydrique durable**, en réduisant la dépendance aux ressources conventionnelles soumises aux aléas climatiques (Guergueb & Ferhat, 2021).

3.4.4 Cadre juridique, réglementaire et modèle de gestion du dessalement de l'eau de mer en Algérie

L'Algérie, confrontée à un stress hydrique croissant, a intégré le dessalement de l'eau de mer comme un pilier stratégique de sa politique de l'eau. Cependant, la mise en place de ces infrastructures nécessite un encadrement juridique et réglementaire strict afin d'assurer leur conformité aux normes nationales et internationales, ainsi qu'une gestion efficace et durable des ressources en eau (MRE, 2021). Cette section examine le cadre législatif et réglementaire du dessalement en Algérie, les normes environnementales appliquées aux stations, les modèles de gestion adoptés et les mécanismes de contrôle et de suivi des impacts environnementaux.

3.4.4.1 Analyse des textes législatifs et réglementaires encadrant le dessalement

Le cadre juridique algérien en matière de gestion de l'eau repose principalement sur la **Loi n°05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau**, qui définit les principes fondamentaux de la protection et de l'exploitation des ressources hydriques (JORA, 2005). Cette loi encadre également le dessalement en établissant des règles relatives à l'octroi de concessions pour la construction et l'exploitation des installations de dessalement (MRE, 2021).

En complément, le **Décret exécutif n°11-220 du 12 juin 2011** fixe les modalités de concession d'utilisation des ressources en eau pour l'établissement d'installations de dessalement. Ce décret précise les conditions et obligations des concessionnaires, notamment en matière de respect des normes environnementales et de qualité de l'eau produite (JORA, 2011).

Plus récemment, le **Décret exécutif n°23-16 du 22 mars 2023** a institué l'Agence Nationale de Dessalement de l'Eau (ANDE), chargée de la mise en œuvre de la politique nationale du dessalement. L'ANDE est responsable de la planification, de la réalisation et de la gestion des infrastructures de dessalement, garantissant ainsi leur conformité aux exigences réglementaires (JORA, 2023).

3.4.4.2 Normes environnementales appliquées aux stations de dessalement en Algérie

Les stations de dessalement en Algérie sont soumises à des normes environnementales strictes visant à limiter leur impact écologique. Ces réglementations concernent principalement la gestion des rejets de saumure, la consommation énergétique et la protection de l'écosystème marin (ANRH, 2022).

Par exemple, la **station de dessalement du Hamma** à Alger utilise un procédé d'osmose inverse avec un système de rejet de saumure situé à 700 mètres au large et à une profondeur de 20 mètres. Ce dispositif permet une meilleure dispersion des rejets, minimisant ainsi leur impact sur la biodiversité marine (MRE, 2021).

D'un point de vue réglementaire, l'Algérie suit les standards internationaux de qualité de l'eau et de protection environnementale définis par l'**Organisation Mondiale de la Santé (OMS)** et l'**Organisation des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)**. Ces standards imposent des seuils limites pour la salinité des rejets en mer, ainsi que des obligations de suivi et de reporting régulier des stations de dessalement (OMS, 2020).

3.4.4.3 Modèles de gestion des stations de dessalement en Algérie

En Algérie, plusieurs modèles de gestion des stations de dessalement ont été adoptés en fonction des besoins locaux et des politiques publiques en vigueur. Ces modèles incluent les partenariats public-privé (PPP), la gestion publique et la gestion privée (MEM, 2023).

- **Partenariats Public-Privé (PPP)** : Ce modèle implique une collaboration entre l'État et des entreprises privées pour la réalisation et l'exploitation des stations de dessalement. Par exemple, la **station du Hamma** est gérée par une joint-venture entre l'Algérienne des Eaux (ADE) et une société américaine, où l'entité étrangère détient 70 % du capital (MRE, 2021).
- **Gestion publique** : Certaines stations sont entièrement financées et administrées par l'État. L'Agence Nationale de Dessalement de l'Eau (ANDE) est responsable de la gestion des infrastructures publiques et veille au bon fonctionnement des installations (JORA, 2023).
- **Gestion privée** : Dans certains cas, des entreprises privées sont concessionnaires de stations de dessalement, assumant la responsabilité de leur construction, de leur financement et de leur exploitation, sous la supervision des autorités publiques (MEM, 2023).

Le choix du modèle de gestion dépend de plusieurs critères, notamment les besoins en investissement, la complexité technique des installations et les objectifs à long terme en matière de sécurité hydrique (ANRH, 2022).

3.4.4.4 Contrôle et suivi réglementaire des impacts environnementaux

Le contrôle et le suivi des impacts environnementaux des stations de dessalement sont essentiels pour assurer la durabilité des ressources en eau et la protection des écosystèmes. En Algérie, les exploitants de stations de dessalement sont tenus de réaliser des études d'impact environnemental (**EIE**) avant la mise en service des installations. Ces études évaluent notamment les effets des rejets de saumure, la consommation énergétique et d'autres aspects opérationnels sur l'environnement (ANRH, 2022).

Une fois en activité, les stations doivent respecter les normes environnementales nationales et internationales, notamment celles définies par l'ISO 14001 pour la gestion environnementale et par l'ISO 24521 pour la gestion de l'eau potable produite par dessalement (ISO, 2019). Des inspections régulières sont effectuées par les autorités compétentes, et des sanctions sont prévues en cas de non-conformité (MRE, 2021).

3.5 Les défis et contraintes de la mise en œuvre du dessalement en Algérie

L'Algérie, confrontée à une pénurie croissante de ressources en eau douce, a intensifié ses efforts pour développer des infrastructures de dessalement de l'eau de mer. Bien que cette approche offre une solution potentielle pour atténuer le stress hydrique, elle présente également une série de défis et de contraintes. Ces obstacles sont d'ordre technique, environnemental, économique, financier, institutionnel et administratif. Cette section examine ces défis en détail, en s'appuyant sur des sources académiques et institutionnelles pertinentes.

3.5.1 Contraintes techniques

- **Coût élevé**

Le dessalement de l'eau de mer est une technologie coûteuse, tant en termes d'investissement initial que de coûts opérationnels. La construction d'une usine de dessalement nécessite des infrastructures sophistiquées et des matériaux spécifiques, ce qui entraîne des dépenses capitales significatives. Par exemple, la station de dessalement du Hamma à Alger a été réalisée dans le cadre d'un partenariat public-privé impliquant des investissements substantiels pour sa mise en place (MRE, 2021).

- **Consommation énergétique**

Le processus de dessalement, en particulier l'osmose inverse, est énergivore. Cette forte consommation énergétique augmente les coûts opérationnels et peut exercer une pression supplémentaire sur le réseau électrique national. Selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), l'énergie nécessaire pour produire un mètre cube d'eau dessalée peut varier en fonction de la technologie utilisée, mais reste généralement élevée (ANRH, 2022).

3.5.2 Entretien des membranes

Les membranes utilisées dans les procédés d'osmose inverse sont sujettes à l'encrassement et à la dégradation au fil du temps, nécessitant un entretien régulier et des remplacements périodiques. Ce besoin constant de maintenance augmente les coûts opérationnels et peut entraîner des interruptions temporaires de la production d'eau potable (ANRH, 2022).

3.5.3 Défis environnementaux

3.5.3.1 Gestion des rejets salins

Le dessalement produit des rejets de saumure hautement concentrés en sel et en produits chimiques utilisés lors du traitement de l'eau. Leur déversement en mer peut perturber les écosystèmes marins, affectant la faune et la flore locales. Des études ont mis en évidence que

ces rejets peuvent entraîner une augmentation de la salinité et de la température des eaux côtières, impactant ainsi la biodiversité marine (ANRH, 2022).

3.5.3.2 Empreinte carbone

La consommation énergétique élevée des usines de dessalement, souvent alimentées par des sources d'énergie fossile, contribue à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Cette empreinte carbone pose des défis en matière de durabilité environnementale et de respect des engagements internationaux de l'Algérie en matière de réduction des émissions (OMS, 2020).

3.5.3.3 Impact sur la biodiversité

Outre les rejets de saumure, les usines de dessalement peuvent affecter la biodiversité marine par l'aspiration d'organismes lors de la prise d'eau de mer. Cette aspiration peut entraîner la mortalité de planctons, de larves et d'autres organismes marins, perturbant ainsi les chaînes alimentaires locales (ANRH, 2022).

3.6 Obstacles économiques et financiers

3.6.1 Investissements initiaux

La mise en place d'infrastructures de dessalement requiert des investissements financiers considérables. Ces coûts initiaux peuvent représenter un obstacle majeur, en particulier dans un contexte économique contraint. Le financement de telles installations nécessite souvent des partenariats public-privé ou le recours à des financements internationaux (MRE, 2021).

3.6.2 Dépendance aux entreprises étrangères

La technologie de dessalement est souvent importée, ce qui peut entraîner une dépendance vis-à-vis des entreprises étrangères pour la construction, l'exploitation et la maintenance des installations. Cette dépendance peut poser des défis en termes de transfert de compétences et de souveraineté technologique (MEM, 2023).

3.6.3 Contraintes institutionnelles et administratives

3.6.3.1 Retards dans les projets

Les projets de dessalement en Algérie sont parfois confrontés à des retards dus à des procédures administratives complexes, des défis liés à l'acquisition de terrains ou des obstacles réglementaires. Ces retards peuvent retarder la mise en service des installations et affecter la planification stratégique de l'approvisionnement en eau (MRE, 2021).

3.6.3.2 Complexité des procédures

La multiplicité des acteurs institutionnels impliqués dans les projets de dessalement peut entraîner une complexité administrative, avec des procédures d'approbation longues et parfois redondantes. Cette situation peut décourager les investisseurs potentiels et ralentir le développement des infrastructures nécessaires (MEM, 2023).

3.7 Acceptabilité sociale du dessalement en Algérie

L'Algérie, confrontée à une raréfaction des ressources en eau douce exacerbée par le changement climatique, a intensifié le recours au dessalement de l'eau de mer pour répondre aux besoins en eau potable. Cette stratégie vise à couvrir 60 % des besoins en eau potable du pays d'ici 2030 (El Watan, 2023). Cependant, la réussite de cette initiative dépend en grande partie de son acceptabilité sociale. Cette section explore la perception publique du dessalement en Algérie, les facteurs influençant cette acceptation, les résultats d'études et d'enquêtes pertinentes, ainsi que les stratégies pour améliorer l'adhésion de la population à cette solution (MEM, 2023).

3.7.1 Perception du public et acceptation du dessalement comme solution hydrique

La perception publique du dessalement en Algérie est influencée par plusieurs facteurs, notamment la sensibilisation aux enjeux hydriques, la confiance dans les institutions responsables et les expériences antérieures liées à l'approvisionnement en eau. Bien que le dessalement soit reconnu comme une solution potentielle pour pallier le déficit en eau, des préoccupations subsistent quant à son coût, son impact environnemental et la qualité de l'eau produite. Selon une étude menée par Bourri (2019), une partie de la population exprime des réserves quant à la potabilité de l'eau dessalée et à ses effets potentiels sur la santé (Bourri, 2019).

3.7.2 Facteurs influençant l'acceptabilité sociale

Plusieurs éléments déterminent l'acceptabilité sociale du dessalement en Algérie :

3.7.2.1 Coût de l'eau

Le coût de production de l'eau dessalée est généralement plus élevé que celui des sources traditionnelles. Cette différence peut se répercuter sur le prix facturé aux consommateurs, suscitant des inquiétudes quant à l'accessibilité financière de cette ressource. Une étude de l'Institut de Recherche en Économie de l'Eau (IREE) souligne que l'augmentation des tarifs de l'eau pourrait entraîner une résistance de la part des usagers, surtout dans les zones à faible revenu (IREE, 2021).

3.7.2.2 Qualité de l'eau

La qualité de l'eau dessalée est un facteur crucial pour son acceptation. Des préoccupations concernant le goût, la minéralisation et les éventuels effets sur la santé peuvent influencer la perception des consommateurs. Le Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique (MRE) a mis en place des normes strictes pour garantir que l'eau dessalée respecte les standards internationaux de potabilité (MRE, 2021).

3.7.2.3 Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux liés au dessalement, tels que la gestion des rejets de saumure et la consommation énergétique, sont également des facteurs d'inquiétude. Les citoyens sensibilisés aux questions écologiques peuvent percevoir le dessalement comme une menace pour les écosystèmes marins et une source d'émissions de gaz à effet de serre. Des initiatives

visant à utiliser des énergies renouvelables pour alimenter les usines de dessalement sont en cours pour atténuer ces impacts (Bouri, 2019).

3.7.3 Analyse des résultats d'études et enquêtes sur l'acceptation du dessalement

Des enquêtes récentes indiquent une acceptation croissante du dessalement parmi la population algérienne, notamment dans les régions côtières où les pénuries d'eau sont fréquentes. Selon un sondage réalisé par le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), 68 % des répondants considèrent le dessalement comme une solution viable pour résoudre les problèmes d'approvisionnement en eau. Cependant, 45 % expriment des préoccupations concernant les coûts associés et 37 % s'inquiètent des impacts environnementaux. Ces données suggèrent que, bien que le dessalement soit perçu positivement, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour aborder les préoccupations spécifiques de la population (CNERIB, 2022).

3.7.4 Stratégies d'amélioration de l'acceptabilité sociale du dessalement

Pour renforcer l'adhésion du public au dessalement, plusieurs stratégies peuvent être envisagées :

3.7.4.1 Sensibilisation et éducation

Informier le public sur les avantages du dessalement, les mesures prises pour assurer la qualité de l'eau et les efforts déployés pour minimiser les impacts environnementaux peut aider à dissiper les malentendus et les réticences. Des campagnes de communication transparentes et accessibles sont essentielles à cet égard .

3.7.4.2 Participation communautaire

Impliquer les communautés locales dans le processus décisionnel et la gestion des projets de dessalement peut renforcer la confiance et le sentiment d'appropriation. La mise en place de comités consultatifs incluant des représentants de la société civile, des experts et des autorités locales peut faciliter un dialogue constructif (CNERIB, 2022).

3.7.4.3 Tarification équitable

Établir une politique tarifaire qui tient compte des capacités financières des différentes couches de la population est crucial pour éviter une opposition basée sur des considérations économiques. Des subventions ciblées ou des tarifs dégressifs peuvent être envisagés pour les ménages à faible revenu (IREE, 2021).

3.7.4.4 Transparence et communication

Partager régulièrement des informations sur la qualité de l'eau, les coûts, les impacts environnementaux et les mesures d'atténuation renforce la transparence et la confiance du public. L'utilisation de plateformes numériques, de médias traditionnels et de réunions publiques peut faciliter cette communication (MRE, 2021).

Chapitre 4: Scénarios de développement du dessalement de l'eau de mer en Algérie

Le dessalement de l'eau marine s'est imposé comme une stratégie cruciale pour satisfaire l'exigence grandissante en eau douce, surtout dans les zones arides et semi-arides telles que

l'Algérie. Face à la croissance démographique, l'urbanisation accélérée et les conséquences du changement climatique, l'accès aux ressources en eau douce se fait de plus en plus restreint. En réponse à ces enjeux, différents plans de progression du dessalement ont été projetés pour la période 2015-2030 en Algérie, incluant des buts d'accroissement des moyens de production, d'optimisation de l'efficacité énergétique et de minimisation des répercussions environnementales. Ces scénarios sont influencés par les progrès technologiques, les politiques de gestion de l'eau et les ressources financières disponibles. L'examen de ces situations aide à prévoir les difficultés et à guider les plans d'action pour garantir un approvisionnement durable en eau potable (MEM, 2021).

4.1 Évolution du nombre de station de dessalement

On prévoit que d'ici fin 2024, l'Algérie comptera 19 usines de dessalement d'eau de mer. À ce jour, onze installations ont été opérationnelles le long de la côte, dotées d'une capacité de production journalière atteignant 2,11 millions de mètres cubes. Dans le contexte d'un plan d'urgence, trois nouvelles usines, avec une capacité de production de 70 000 mètres cubes par jour, ont été terminées. Ces usines incluent celles de Bateau Cassé et El Mersa, localisées dans la wilaya d'Alger, ainsi que l'usine de Corso dans la wilaya de Boumerdès qui est actuellement en phase finale de construction. Cela devrait permettre une augmentation de la production de 80 000 mètres cubes supplémentaires. Initié en 2022, un programme additionnel est prévu pour la mise en place de 11 nouvelles stations de dessalement en Algérie, y compris 5 placées à El-Tarf, Béjaïa, Boumerdès, Tipaza et Oran. On observe déjà un taux d'achèvement de 70 % pour les travaux de ces cinq stations. La station de Béjaïa, située à Tighremt, devrait être mise en service en décembre 2024, grâce au dévouement constant des équipes algériennes. Sous la conduite de l'AEC, une filiale du groupe Sonatrach, ces initiatives ont pour but d'accroître la production d'eau potable jusqu'à 3,76 millions de mètres cubes par jour d'ici à 2030. Cela pourrait potentiellement satisfaire jusqu'à 60 % des exigences en eau de la population, une ambition clé dans le contexte actuel de crise hydrique. Actuellement, les initiatives de dessalement sont en cours de réception et d'implantation des installations, phase clé avant de procéder aux essais et à la pré-mise en service des installations. Cette étape est essentielle pour garantir que les stations pourront satisfaire la demande grandissante en eau du pays, dans un contexte de croissance démographique et de besoins sans cesse accrus. D'après les propos de Mohamed Boutabba, Directeur général de l'AEC, « ces grands projets revêtent une importance stratégique puisqu'ils permettront d'accroître les capacités de mobilisation des eaux de mer dessalées à 42 % ». Le groupe Sonatrach a reçu une nouvelle expédition d'équipements pour les stations de dessalement d'eau de mer à la fin d'octobre, suite à une première livraison en septembre. Un important système logistique aérien a été mis en place pour acheminer le matériel destiné aux cinq principales stations. Dernièrement, une cargaison de 79 tonnes d'équipements mobiles a été acheminée à l'aéroport international Houari-Boumediene et a été reçue par la Société Algérienne de Réalisation de Projets Industriels (SARPI) ainsi que l'AEC.

Il convient également de mentionner qu'un autre programme d'urgence envisage la mise en place de six nouvelles installations de dessalement. Le PDG de l'AEC a déclaré que cette stratégie ferait augmenter le total des usines de dessalement à 25 avant 2030. Ce programme additionnel a été attribué à des sociétés algériennes, dont quatre succursales du groupe Sonatrach ainsi que la compagnie COSIDER Canalisation. Le dirigeant a indiqué que la réalisation des programmes d'urgence et complémentaire conduira à une augmentation de la capacité globale de production d'eau potable, passant de 2,11 millions à 3,76 millions de mètres cubes par jour. L'élargissement des installations, s'étendant sur des parcelles de 300 à 400 hectares au lieu des 15 à 16 actuels, exigerait des études d'optimisation. L'équipe de

l'AEC s'efforce de repérer des lieux littoraux pour l'implantation de solutions provisoires dans le but d'établir les alternatives les plus appropriées. On a souligné que l'industrie du dessalement nécessite d'importants investissements financiers, en raison du coût prohibitif de la technologie et de la grande consommation d'énergie requise pour convertir l'eau de mer en eau potable. Pour minimiser l'empreinte énergétique, il serait préférable que les usines soient alimentées en électricité à partir de sources renouvelables. Même si le dessalement est une réponse efficace à la pénurie d'eau, cette technologie présente également d'importants défis. Les coûts de mise en place sont conséquents et la consommation d'énergie des stations de dessalement demeure élevée. C'est pour cette raison que les responsables algériens mettent l'accent sur la nécessité de garantir la pérennité de ce secteur en incorporant des énergies renouvelables dans le procédé. Cette méthode permettrait de réduire l'empreinte carbone des installations et d'abaisser, sur le long terme, les dépenses opérationnelles (Belmahi, 2024).

Table 3: Les stations de dessalement en Algérie (MRE, 2024)

Unités	Date MES	Capacité /J
Kahrama	Fév /2006	95000
Hamma	Avr/2008	200000
Skikda	Mar/2009	100000
Beni Saf	Oct/2010	200000
Mostaganem	Sept/2011	200000
Souk Tlata	Avr/2011	200000
Fouka	Mai/2011	120000
Honaine	Sept/2011	200000
Cap Djinet	Juil/2012	100000
Magtaa	Jui/2016	500000
Tenes	Juil/2015	200000
Bateau cassé	Mar/2022	10000
El Marsa	Mar/2023	60000
Corso	Sept/2023	80000

4.1.1 Capacité de production totale du dessalement de l'eau de mer :

Les ressources en eau, qui ont toujours été au centre des préoccupations des plus hautes autorités de l'État dans le cadre d'un développement dynamique, témoignent de manière exemplaire du progrès remarquable accompli par l'Algérie depuis le début des années 2000.

Effectivement, le stress hydrique qui a touché le pays dans les années 90 a conduit les autorités à mettre en place un plan d'urgence destiné à garantir l'approvisionnement en eau potable des régions côtières grâce au recours à la désalinisation de l'eau de mer.

Dans le but de renforcer et d'assurer l'approvisionnement en eau potable de la population, les autorités ont opté pour l'exploitation de ressources non conventionnelles, avec un accent particulier sur le dessalement de l'eau de mer. Deux nouvelles stations seront mises en place, venant s'ajouter aux installations déjà existantes. Deux nouvelles installations de désalinisation, chacune ayant une capacité de 300.000 m³/jour, sont prévues : l'une pour la wilaya d'E-Tarf et l'autre qui sera située à l'ouest d'Alger. La station de la wilaya d'El Tarf sera chargée de consolider et d'assurer l'approvisionnement en eau potable pour une vaste région orientale du pays. En ce qui concerne la station de l'Ouest d'Alger, son objectif est de

répondre aux besoins en eau potable des zones Ouest d'Alger et de Blida. Ces deux stations, en plus de celles déjà opérationnelles, contribueront à représenter 25% de la production totale d'eau potable du pays, par rapport à 17% actuellement. Il est d'autant plus crucial de construire la station de l'Ouest d'Alger, car les fluctuations climatiques entraînent une diminution significative des réserves des barrages et une baisse du niveau des nappes phréatiques, y compris celles de la Mitidja et de Mazafran et de Hamiz. Les deux installations seront mises en œuvre selon le modèle BOT (Build Operate and Transfer), soit Construire, Exploiter et Transférer. C'est AEC, une filiale de Sonatrach et Sonelgaz, qui sera à la tête du projet (Belmahi, 2024).

Le projet de dessalement, initié depuis 2003, envisage la construction de 13 installations de dessalement avec une capacité nominale cumulée de 2,31 millions de mètres cubes par jour, équivalant à environ 850 millions de mètres cubes par an, destiné à approvisionner 8 millions d'habitants. À ce jour, nous avons réalisé et mis en service onze (11) stations, dotées d'une capacité installée de 2,1 millions de mètres cubes par jour. Ce sont les unités d'Arzew (Oran : 86.000 m³/j), de Hamma (Alger : 200.000 m³/j), de Skikda (100.000 m³/j), de Beni Saf (Aïn Témouchent : 200.000 m³/j), de Mostaganem (200.000 m³/j), de Fouka (Tipaza : 120.000 m³/j), de Souk Tlalat (Tlemcen : 200.000 m³/j), de Honein (Tlemcen : 200.000 m³/j), de Cap Djinet (Boumerdès : 100.000 m³/j), de Tenes (Chlef : 200.000 m³/j) et Maacta (Oran : 500.00 m³/j).

Lors de la réunion du Conseil Interministériel du 24/10/2017, il a été décidé, entre autres, de veiller à ce que ces deux unités soient mises en œuvre rapidement et dans des conditions optimales.

Dans cette lignée, Mouloud Hachelaf a annoncé le projet de mise en place de 7 nouvelles stations de dessalement d'eau de mer d'ici à 2030. Selon le même responsable, cette initiative supplémentaire devrait augmenter la capacité de production nationale d'eau provenant du dessalement de 3,7 millions m³ à 5,5 millions, ce qui représenterait 60% des besoins nationaux en eau potable. De plus, il convient de souligner qu'en même temps que l'élaboration du premier programme des stations mentionnées ci-dessus, une nouvelle spécialité académique centrée sur le dessalement de l'eau de mer a été mise en place. En outre, l'année universitaire 2023-2024 a vu l'introduction de nouveaux programmes de formation, visant à maîtriser les processus technologiques de dessalement de l'eau et à constituer une main-d'œuvre compétente dans ce domaine (MEM, 2018). Le but est de préparer des diplômés (ingénieur, licence et master) en mesure de gérer les problématiques quotidiennes liées aux opérations des stations de dessalement et de répondre aux exigences du domaine de la production d'eau potable, notamment par le biais du dessalement des eaux marines et saumâtres. Le secteur de la formation professionnelle a également intégré le dessalement de l'eau de mer parmi ses spécialités. Nos chercheurs ont également entrepris de relever le défi de la maîtrise de la technologie du système de purification « osmose inverse », dans le but d'atteindre les phases de production et d'industrialisation de ce procédé en Algérie (Belmahi, 2024).

« Cinq nouvelles usines de dessalement entreront en service cette année pour porter la quantité d'eau potable que l'Algérie aura la capacité de produire à partir de la Méditerranée de 2,2 millions à 3,7 millions m³ par jour » selon l'AEC (2025). « Six autres installations sont prévues d'ici 2030 », a-t-il ajouté, indiquant que les onze usines prévues utiliseront le processus de l'osmose inverse, très gourmand en énergie. Selon la même source, la capacité de production de l'eau potable grâce au dessalement de l'eau de mer devrait atteindre environ 5,8 millions m³, d'ici la fin de la décennie en cours .

4.2. Analyse économique

Un calcul indique que le coût du mètre cube d'eau produit par dessalement s'élève entre 0,65 et 0,85 dollars (91 à 120 dinars). En dépit des investissements colossaux requis pour l'établissement de ces installations, l'État algérien subventionne le coût de l'eau potable. Pour la première tranche trimestrielle, un citoyen algérien ne débourse environ que 6 Da par mètre cube. La structure tarifaire actuelle en vigueur en Algérie ne représente pas la valeur véritable de la production et de l'approvisionnement en eau. Les prix appliqués à la consommation sont inférieurs au coût réel de l'eau, ce qui encourage son gaspillage et sa dispersion (Salah, 2023).

L'AEC, une branche de la compagnie pétrolière nationale Sonatrach, appliquera un tarif à l'ADE, entreprise de distribution publique, compris entre 52 et 100 dinars (0,39-0,76 dollar) pour chaque mètre cube d'eau. Cependant, les consommateurs ne déboursent qu'une partie minimale de cette dépense, car le gouvernement prend en charge approximativement 95% du coût de l'eau.

Selon un dirigeant de l'opérateur public des installations de dessalement du pays, cité par Bloomberg le lundi 14 octobre, l'Algérie envisage d'investir 5,4 milliards de dollars dans la construction d'usines de dessalement de l'eau de mer d'ici 2030. Cette initiative vise à garantir l'accès de sa population à l'eau potable, en réponse à une forte baisse des précipitations.

4.2.1 La production d'une station de 100 000 m³/j coûte 22 millions \$ par an

Dans une installation de dessalement d'une capacité de 100 000 mètres cubes, on peut produire chaque année près d'un million de tonnes de chlorure de sodium (NaCl), ce qui équivaut à environ 65 millions de dollars en revenus. En revanche, le coût annuel associé à la production des eaux dans cette même installation s'élève à 22 millions de dollars. Il convient de mentionner que les principales installations de dessalement en fonction possèdent des capacités qui dépassent les 100 000 mètres cubes par jour. Les installations actuellement en construction disposent d'une capacité de 300.000 mètres cubes par jour chacune. Pour l'année 2025, le Fonds national de l'eau (FNE) envisage une attribution de 8,68 milliards de dinars, tandis que l'État prévoit une subvention s'élevant à 63 milliards de dinars (équivalent à environ 472,51 millions de dollars) dédiée au dessalement de l'eau marine. En tout, c'est 70 milliards de dinars (500 millions de dollars) qui vont permettre aux citoyens de continuer à consommer de l'eau potable aux prix actuels (E-BDZ, 2024).

En 2024, la rémunération versée par l'État pour le dessalement de l'eau de mer s'élevait à 67 milliards de dinars, un montant presque identique à celui de 2023. C'est un effort titanesque que nul pays africain ne pourrait réaliser.

L'article 216 du projet de loi de finances pour 2025 envisage des changements importants à l'article 143 de la loi de finances de 1995, qui concerne le Fonds national de l'eau (FNE). Désormais, ce fonds essentiel pour la gestion de l'eau en Algérie possède un compte d'affectation spéciale portant le numéro 302-079. Ce compte reflète, en termes de revenus, différents aspects tels que le revenu généré par les redevances relatives à l'économie et à la qualité de l'eau, ainsi que le total des restes d'opérations complètes ou non effectuées. La mise à jour a pour objectif d'optimiser la gestion des soldes disponibles, ce qui autorise le remboursement des sommes non utilisées par les ordonnateurs secondaires. Cela comble un vide juridique qui faisait obstacle à l'intégration de ces montants dans le compte du FNE. Cette initiative simplifiera l'obtention de fonds pour des projets vitaux, tels que l'assurance

d'un approvisionnement en eau potable dans les zones affectées par le stress hydrique, ainsi que la protection des zones d'irrigation jugées cruciales pour la sécurité alimentaire.

Ce mécanisme financier revêt une grande importance pour appuyer les investissements indispensables à l'agrandissement et au rafraîchissement des infrastructures liées à l'eau, assurant de cette manière un accès pérenne à l'eau potable pour tous. L'application de ces mesures budgétaires constitue une avancée significative dans la gestion des ressources en eau en Algérie, essentielle face aux enjeux climatiques et démographiques (E-BDZ, 2024).

4.2.2 Une approche sociale de la tarification

Dans le but de garantir l'accès à l'eau pour les foyers les plus démunis, le gouvernement algérien a choisi d'appliquer une hausse graduée. Par conséquent, la première tranche de la catégorie I, qui se rapporte aux consommations les plus basses, n'a connu qu'une augmentation de 20%, alors que pour les autres tranches et catégories, cette hausse a atteint 60%. En 1992, on estimait que le coût d'exploitation et d'entretien de l'eau en Algérie s'élevait à 4,10 DA/m³, ce qui correspondait, le coût en Tunisie à la même époque était deux fois plus élevé, atteignant 0,25\$ par mètre cube. Bien que ces données remontent à plus de trois décennies, elles mettent en évidence le challenge auquel l'Algérie est confrontée pour assurer des prix abordables tout en prenant en charge les coûts réels (E-BDZ, 2024).

4.2.3 Le dessalement, une solution coûteuse mais nécessaire

En raison de la pénurie de ressources, l'Algérie a opté pour le dessalement de l'eau de mer. Un projet audacieux a pour objectif de générer 1 million de m³ par jour, ce qui correspond à un cinquième des besoins de consommation du pays en 2005. Toutefois, cette innovation a un prix : les projections anticipent un coût du mètre cube d'eau dessalée avoisinant 125 DA dès l'ouverture de la station du Hamma, qui pourrait grimper à 150 DA d'ici 2030. Le code des eaux, instauré par la loi n° 05-12, réaffirme le droit essentiel à l'accès à l'eau potable et à l'assainissement. Ce texte s'efforce de trouver un équilibre entre ce droit et le principe du recouvrement des coûts, mettant en évidence la complexité de la gestion de l'eau dans un pays où cette ressource est précieuse. Depuis 2005, l'Algérie est répartie en cinq bassins hydrographiques, chacun étant administré par un comité spécifique : Oranie Chott-Chergui, Cheliff-Zahrez, Algérois-Hodna-Soummam, ainsi que deux autres qui ne sont pas cités dans le passage. Cette méthode cherche à mettre en œuvre une gestion plus appropriée aux contextes locaux (FMES, 2024).

4.3 Le dessalement de l'eau de mer comme un réponse sur le changement climatique et le stress hydrique

L'eau de mer dessalinisée, qui nécessite beaucoup d'énergie et produit des déchets polluants, n'est pas une voie vers un développement durable, bien que des recherches à long terme soient absentes pour mesurer avec précision l'effet de ces installations. C'est une option d'adaptation au changement climatique qui ne devrait être envisagée que si toutes les autres alternatives « durables » ont déjà été mises à profit (surtout la gestion rationnelle de l'eau et le traitement des eaux usées) et qui devrait se restreindre à la production d'eau potable pour l'usage humain. Avec une capacité équivalente, le traitement des eaux usées coûte considérablement moins cher que la désalinisation de l'eau de mer, tout en consommant deux fois moins d'énergie. Il est également nécessaire d'améliorer le processus de désalinisation en développant de

nouvelles méthodes de traitement nécessitant moins de produits chimiques, comme la microfiltration ou la nanofiltration.

Quand le dessalement est la seule option pour fournir de l'eau douce aux populations, des recherches scientifiques détaillées doivent être effectuées sur place avant la construction de l'usine afin de minimiser les impacts et éviter d'endommager les écosystèmes marins locaux.

4.3.1 Stress hydrique

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) :

- Dans les régions, pays ou zones où la ressource en eau disponible est inférieure à 1 700 m³ par an et par personne, le terme « stress hydrique » est généralement utilisé. C'est essentiellement le cas des régions arides et cette condition persiste au fil du temps.
- Dans les endroits où l'approvisionnement en eau est entre 1 700 m³ et 1 000 m³ par an et par individu, on parle généralement de « pénurie d'eau ». Ces pénuries peuvent être ponctuelles ou limitées dans le temps.
- On parle alors de « rareté de l'eau » dans les pays, régions ou zones où la disponibilité en eau par habitant est inférieure à 1 000 m³ par an.

Il est évident que le stress hydrique affecte surtout les régions arides. On peut mentionner les régions suivantes comme étant parmi les plus affectées Afrique, Proche et Moyen Orient et l'Asie (notamment l'Inde, le Pakistan et les vastes plaines du nord de la Chine).

Alors que le dessalement de l'eau de mer a été adopté très tôt par les pays arides du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, en Europe, c'est l'Espagne qui se distingue comme le principal producteur d'eau dessalée, avec une production annuelle de 405 millions de mètres cubes. En effet, à partir du milieu des années 2000, un grand projet de dessalement a été instauré pour pallier le déficit structurel d'eau sur le littoral méditerranéen. Par conséquent, la plus grande usine de dessalement d'eau de mer en Europe a été installée dans le quartier périphérique sud de Barcelone, où elle produit quotidiennement 200 000 m³ d'eau douce.

D'autres nations méditerranéennes rencontrent des problèmes similaires, voire plus sévères, et ont opté pour la méthode du dessalement de l'eau de mer comme solution. Parmi les principaux producteurs d'eau douce par dessalement, l'Algérie (631 millions de m³), l'Espagne (405 millions de m³) et l'Égypte (200 millions de m³). Malte se classe en tête du dessalement en proportion de l'eau consommée, avec plus de la moitié de son approvisionnement en eau potable généré par le processus de dessalement. Selon les projections en matière d'équipement, on prévoit que la capacité de production d'eau dessalée continuera de croître, doublant d'ici 2030. Cependant, l'élimination du sel de l'eau de mer n'est pas exempte de difficultés. Pour commencer, son prix reste élevé. Malgré les avancées technologiques, le processus reste très gourmand en énergie et peut donc être une source d'émission de gaz à effet de serre, selon la provenance de l'énergie utilisée. Finalement, les rejets d'eau salée ont un effet significatif sur la faune et la flore (Vivien, 2014).

4.3.2 Changement climatique

Le changement climatique se réfère aux modifications climatiques qui entraînent une hausse globale des températures moyennes à l'échelle mondiale. Ces changements sont attribuables à l'accroissement de la densité des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Carb, 2024).

Le GIEC a déterminé les facteurs du réchauffement climatique : nous sommes désormais conscients que ce sont les gaz à effet de serre d'origine humaine qui influencent effectivement

le climat. Ils sont issus de diverses origines :

- La génération d'énergie (électricité, chauffage).
- La fabrication de carburant destiné aux transports (essentiellement pour les automobiles, mais également en partie pour l'aviation et le transport maritime).
- L'agriculture, l'élevage et la déforestation.

Le réchauffement climatique, qui perturbe le cycle naturel de l'eau douce et entraîne des conséquences encore ardues à modéliser avec précision. Le cycle des précipitations paraît perturbé dans plusieurs zones du globe, avec une augmentation de la fréquence et de l'intensité des risques d'inondation et de sécheresse. Parallèlement, l'élévation du niveau des mers conduit à une salinisation des nappes phréatiques côtières dont dépendent les besoins en eau douce de milliards d'individus résidant sur ces côtes (CIE, 2025).

L'énergie et l'eau sont deux éléments indissociables qui gouvernent notre existence et propulsent la civilisation. Dans chaque pays, l'accès à l'eau est vital pour le progrès économique et social général, au-delà des nécessités humaines à court terme. Ceci est particulièrement applicable à l'Algérie, où les ressources hydriques sont restreintes, exposées et inégalement distribuées en raison du fait que la plus grande partie de son territoire est soit aride soit semi-aride. La disponibilité moyenne en eau par personne est déjà limitée, et même de petites fluctuations peuvent engendrer des situations désastreuses.

D'après les prévisions, si le climat continue à suivre la tendance moyenne estimée, tous les scénarios de changement climatique suggèrent une augmentation significative de la pénurie d'eau en Algérie due à la hausse de la demande et la diminution de l'offre (BIRD, 2012).

Le Dessalement est déjà un pilier majeur de l'approvisionnement en eau du pays, contribuant à répondre à une part significative des besoins croissants en eau. Cependant, l'importante dépendance au dessalement nécessitera aussi une vigilance accrue quant à ses effets environnementaux indésirables. La consommation d'énergie élevée pour le dessalement d'eau de mer soulève des inquiétudes sur les émissions de gaz à effet de serre contribuant davantage aux changements climatiques et donc une attention accrue est accordée à la réduction ou l'élimination des émissions de gaz à effet de serre en alimentant le dessalement avec des énergies renouvelables, directement ou indirectement.

4.4 Évolution de la population et demande en eau

Actuellement, on connaît assez bien les ressources en eau de l'Algérie. Cependant, face à la sécheresse persistante depuis plus de deux décennies, les responsables du domaine de l'eau ont dû réviser leurs estimations concernant les précipitations dans chaque région. On estime actuellement les potentialités à 16,3 milliards de m³, répartis comme suit :

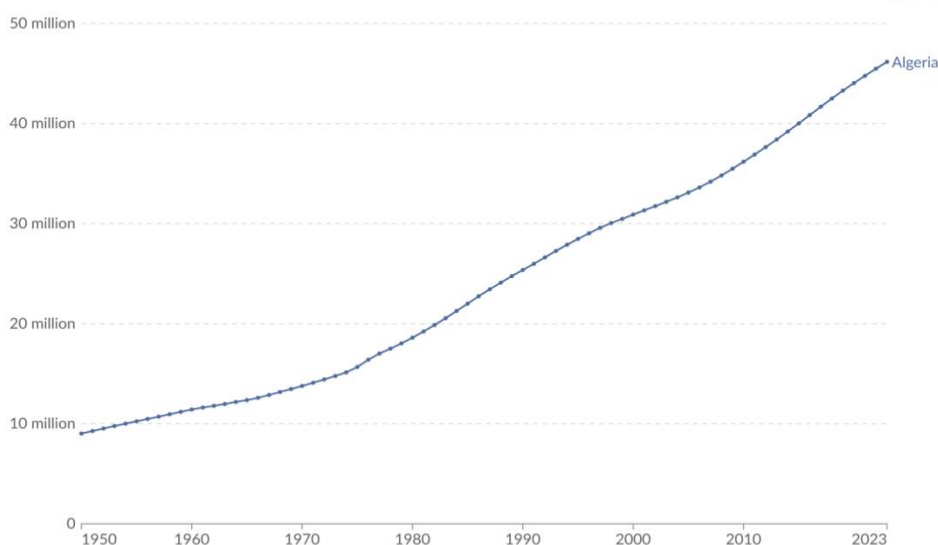
- 9,8 milliards de m³ d'eau de surface.

- 1,5 milliard de m³ d'eau souterraine dans la zone nord.

- 5 milliards de mètres cubes d'eau souterraine sont présents dans la zone nord du Sahara.

On estime qu'en moyenne, avec une population dépassant les 30 millions d'habitants, les ressources renouvelables disponibles par habitant sont d'environ 383 m³/hab/an. En 2020, avec une population avoisinant les 44 millions d'habitants, ce chiffre devrait passer à environ 261 m³/hab./an. Cela place l'Algérie parmi les nations manquant cruellement d'eau, près d'une situation de crise (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Direction Générale des Forêts (2004)).

Population, 1950 to 2023



Data source: UN, World Population Prospects (2024)
Note: Values as of 1 July of the indicated year.

OurWorldinData.org/population-growth | CC BY

Figure 11 : La croissance démographique dans l’Algérie (OWID, 2023)

La forte croissance démographique en Algérie, illustrée par l’augmentation rapide de la population depuis 1950, exerce une pression croissante sur les ressources en eau, qui sont inégalement réparties sur le territoire. Alors que la majorité des réserves d’eau souterraine se trouvent dans le sud désertique, les zones les plus peuplées sont concentrées au nord, où les ressources hydriques sont plus limitées. Cette disparité crée un défi majeur pour l’approvisionnement en eau potable et l’irrigation, nécessitant des solutions comme le dessalement, le transfert d’eau et une gestion durable des ressources disponibles afin d’assurer la sécurité hydrique du pays.

Il n'est pas possible d'exploiter tous les cours d'eau de surface ; leur utilisation dépend de la présence de sites pour des barrages, de la qualité des eaux et des coûts liés à l'aménagement. L'analyse des sites identifiés par l'ANB révèle la possibilité de régulariser entre 5 et 6 milliards de m³, ce qui représente environ 50 à 60% du débit de surface total. À l'heure actuelle, environ 2 milliards de mètres cubes sont exploités à partir de 50 barrages, avec une contribution annuelle moyenne de 3,5 milliards de mètres cubes (tableau 3). La capacité de départ des 50 barrages en service était de 5 milliards de mètres cubes. Selon le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (2003), elle est actuellement évaluée à 4,5 milliards de m³ en raison de son envasement (MATE, 2003).

Table 4: Capacités et volumes mobilisés des barrages en service en Algérie
(Ministère de l’Aménagement du Territoire et de l’Environnement, 2003 ; Vinci, 2024)

Indicateur	Valeur
Nombre total de barrages en service	50 barrages
Capacité initiale totale des barrages	5 milliards de m ³

Capacité actuelle (après envasement)	4,5 milliards de m ³
Volume d'eau actuellement exploité	Environ 2 milliards de m ³
Contribution annuelle moyenne des barrages	Environ 3,5 milliards de m ³
Potentiel total mobilisable estimé par l'ANB	5 à 6 milliards de m ³
Pourcentage du débit de surface régularisable	50 à 60 %

La question de la disponibilité des ressources est encore plus compliquée par :

- Leur distribution inégale dans l'espace, elles ne sont pas toujours présentes là où il y a des opportunités de développement (Vinci, 2024).
- Les dangers de la pollution qui pourraient rendre inutilisable les rares ressources dont dispose le pays.
- Les longues périodes de sécheresse, semblables à celle que nous avons observée depuis près de vingt ans et qui provoquent des ruptures importantes dans la fourniture d'eau pour les besoins domestiques, industriels et agricoles (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Direction Générale des Forêts 2004).

PARTIE III

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET TECHNOLOGIES DURABLES

CHAPITRE 5

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES STATIONS DE DESSALEMENT

5.1 Analyse de l'empreinte carbone des installations

L'empreinte carbone est considérée comme la somme des émissions de gaz à effet de serre individuelles, où le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) sont exprimés en équivalents CO₂ (CO₂eq) par conversion des émissions de CH₄ et N₂O selon leur potentiel de réchauffement global (PRG) (IPCC, 2014).

Le dessalement représente une technique gourmande en énergie comparativement au projet de transfert d'eau. Toutefois, grâce à l'évolution d'une nouvelle technologie, il est possible d'améliorer réellement l'efficacité énergétique. Selon les divers combustibles et méthodes de production, l'empreinte carbone peut varier considérablement. (Liu et al, 2015) ont examiné la variation des émissions de carbone dans le cadre des trois méthodes distinctes de dessalement. Selon la méthode MSF, l'empreinte carbone associée à la production d'eau fluctue de 1,98 kg à 34,68 kg de CO₂ pour la méthode MED et de 1,19 kg à 26,94 kg de CO₂ pour la méthode OI (IPCC, 2014). En tenant compte des émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'énergie, l'usage de l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter un système d'osmose inverse permettrait d'obtenir une empreinte carbone de 248 grammes équivalent CO₂ par mètre cube. En tenant compte des émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'énergie, l'usage de l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter un système d'osmose inverse permettrait d'obtenir une empreinte carbone de 248 grammes équivalent CO₂ par mètre cube (IPCC, 2014).

5.2 Les rejets et les déchets générés par le processus de dessalement

5.2.1 Émissions atmosphériques

Habituellement, les rejets atmosphériques des installations de dessalement se limitent à l'azote et à l'oxygène issus des usines de distillation qui mettent en œuvre des techniques de désaération pour minimiser la corrosion, provenant d'éjecteurs (installations MSF) ou de dégazeurs (installations OI). De plus, la génération d'énergie destinée aux usines de dessalement augmente les émissions dans l'atmosphère. Il est aussi possible que des hausses significatives des émissions atmosphériques aient lieu si une centrale thermique ou une installation de production couplée est édifée dans le contexte d'un projet de dessalement (Afgan et al, 1999). Étant donné que les émissions atmosphériques générées par un processus de dessalement sont directement liées à ses exigences énergétiques, il est évident que les émissions provenant de l'OI sont inférieures à celles produites par la MSF. L'analyse menée par (Afgan et al., 1999), concernant les usines de dessalement dans les pays du Golfe, a permis d'établir des indicateurs de durabilité corroborant les précédentes affirmation (Afgan, 1999).

Étant donné que la plupart des usines de dessalement fonctionnent à partir d'énergies fossiles, elles présentent une empreinte carbone considérable.

La logique actuelle du calcul énergétique est plutôt évidente : Le dessalement de (1000 m³) À peu près 10000 tonnes de pétrole par an sont consommées quotidiennement (en millions de litres). Entre 0,4 et 6,7 kilogrammes de CO₂ équivalent par mètre cube (kg CO₂eq/m³) ont été calculés comme étant l'empreinte carbone du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse (RO). Ceci implique que le processus de dessalement de 1 000 m³ d'eau de mer pourrait potentiellement émettre jusqu'à 6,7 tonnes de CO₂ (ASTEE, 2007).

5.2.2 Rejets chimiques

Toutes les stations de désalinisation emploient des substances chimiques pour le traitement préalable de l'eau d'alimentation et le traitement postérieur de l'eau produite. La majorité des produits sont principalement employés comme agents biocides, anti-calcaire, anti-encrassement et anti-mousse, ce qui finit par altérer la composition de la saumure concentrée. La composition de la saumure concentrée est également influencée par la présence de certains

métaux résultant de la corrosion du circuit (Altayaran, 1992). Les produits chimiques varient selon les méthodes principales de dessalement, notamment la distillation multi-étapes (MSF) et l'osmose inverse (Altayaran, 1992).

Les produits chimiques rejetés dans le milieu marin se répartissent entre les catégories suivantes :

a) Produits de la corrosion

Les plants de dessalement utilisant des procédés thermiques libèrent du cuivre, du nickel, du fer, du chrome, du zinc et d'autres métaux lourds selon les alliages présents dans la chaîne de production, tel que le titane par exemple. Concernant les concentrations, celles du cuivre et du fer sont les plus importantes. Par exemple, la plus petite quantité de cuivre détectée dans les effluents de l'usine de dessalement d'Al-Khobar s'élevait à 20 ppb, par rapport aux concentrations naturelles initiales présentes dans l'eau de mer qui étaient de 0,12 ppb et 0,07ppb. Concernant la Méditerranée, les teneurs en cuivre dans l'eau marine varient considérablement : pour les eaux de haute mer, elles se situent entre 0,04 et 0,70 ppb, tandis que pour les eaux côtières, elles oscillent entre 0,01 et 50 ppb. Si l'on considère une concentration de 20 ppb de cuivre dans le rejet de saumure d'une station de dessalement dotée d'une capacité quotidienne de 50 000 m³ et un taux de transformation de l'eau de 10%, on peut estimer que plus de 10 kg de cuivre seront déversés sur le terrain avec les 500 000 m³ de saumure chaque jour (Dawoud, 2012), (Hoepner, 2003) et (UNEP, 2003).

Dans le procédé OI, les produits de corrosion ne sont pas particulièrement significatifs, étant donné que ce processus s'opère à des températures ambiantes et que la majorité des composants métalliques du système sont en acier inoxydable. Par exemple, à l'installation de dessalement de Dhekelia (Chypre), la teneur en cuivre mesurée dans l'eau de mer, à proximité de l'émetteur de saumure, se situait en dessous de 1 ppb (Zimmerman, 1999).

b) Agents antitartres

Dans les systèmes de dessalement par distillation, la formation de tartre sur les surfaces des appareils provoque des problèmes d'utilisation et une diminution de l'efficacité. Il diminue particulièrement le transfert de chaleur et le flux de liquide à travers les conduits (Cooley, Gleick, et Wolff, 2006). Différentes techniques sont utilisées pour empêcher la formation de tartre. Les polyphosphates, qui ont été initialement utilisés pour prévenir les dépôts, sont économiques, mais manquent d'efficacité et de stabilité à haute température (ils hydrolysent au-delà de 90°C). Ces dernières années, leur utilisation a considérablement baissé. À l'heure actuelle, les polymères d'acide maléique sont les anti-tartres les plus couramment employés. Ils inhibent la cristallisation des sels solubles et altèrent la structure cristalline, créant de ce fait une boue non collante (Lattemann & Höpner, 2003). Malgré leur utilisation à une concentration de 1 à 3 ppm, on observe généralement une présence de 0,53 ppm dans les rejets. Dans les installations d'osmose inverse (OI), on utilise aussi l'acide sulfurique associé à des polymères pour éviter la formation de tartre (UNEP, 2003).

c) Agents anti-salissures

Le « fouling » désigne un processus en plusieurs phases qui implique différents types d'organismes. Le processus débute par l'adsorption de polymères sur les surfaces, créant un biofilm favorable à la colonisation par des bactéries, périphytes, microalgues, protozoaires, champignons et autres particules ou détritiques (Bleninger, 2010). Pour éviter ces contaminants,

l'utilisation de composés chlorés dans les systèmes d'approvisionnement en eau de mer est une pratique ancienne. L'administration standard se situe à 2 ppm, avec l'ambition d'atteindre une absence totale de chlore résiduel à la sortie. Par exemple, à l'usine de Sitra située au Bahreïn, un apport constant d'eau de Javel est assuré pour conserver un niveau de 2 ppm de chlore, avec une présence résiduelle de 0,2 ppm. À Dhekelia, sur l'île de Chypre, La saumure rejetée ne renferme pas de chlore, sauf après un lavage à contre-courant (0,23 ppm). D'autres biocides tels que les sels de cuivre ont été soumis à des tests, mais leur utilisation demeure problématique en raison de leur accumulation néfaste pour l'environnement, même à des concentrations inférieures à 1 ppm (PNUE, 2001).

d) Agents anti-mousse

La mousse générée par l'eau de mer lors des étapes du processus de distillation multistage est aléatoire, mais tend à créer un problème plus sérieux lorsque les séparateurs sont situés près de la surface du flux de saumure, limitant ainsi la séparation en volume réduit en phase aqueuse et phase vapeur. Les agents anti-mousse sont généralement des polyglycols alkylés, des acides gras et des esters d'acides gras. Les agents sont tensio-actifs à la frontière eau-vapeur et préviennent l'apparition de mousse. On a généralement l'habitude d'ajouter ces produits à hauteur de 0,1 ppm, mais un surdosage se produit souvent. La formation de mousse dépend des composants organiques présents dans l'eau de mer, qui sont essentiellement des produits d'excrétion et de décomposition d'algues planctoniques. Pour l'OI, l'ajout d'agents anti-mousse est requis (Bleninger, 2010) et (Rashad, 2007).

e) La saumure concentrée

Les installations de dessalement rejettent une saumure hautement concentrée qui contient la même quantité de sels que l'eau d'origine, mais sur un volume diminué. Selon le processus MSF, si le taux de récupération est de 10 %, la saumure a une salinité approximativement 1,1 fois supérieure à celle de l'eau initiale (Blust, 1992). Ce concentré est généralement mélangé avec l'eau de refroidissement, abaissant ainsi le facteur de concentration à 1,05 et minimisant les effets sur l'environnement. Cependant, dans le processus d'osmose inverse (OI), le taux de récupération fluctue entre 30 et 70 %, générant une saumure dont la salinité est 1,3 à 1,7 fois supérieure. Dans le cas d'une salinité initiale de 39 ‰ (comme c'est le cas pour la Méditerranée orientale), La saumure présente une salinité comprise entre 51 et 66 ‰. Par exemple, à l'instar des îles Canaries où une usine OI d'une capacité de 10 000 m³/jour génère une saumure à 63,8 ‰, comparativement à une eau d'alimentation à 38,95 ‰, le rapport s'établit donc à 1,64 (Fernandez-Torquemada, 2013). Les avancées technologiques récentes autorisent des taux de récupération supérieurs, produisant parfois des saumures au-delà de 70‰ (Bleninger, 2010); (PNUE, 2001).

5.2.3 Rejet des eaux de lavage à contre-courant des membranes dans les usines OI

Dans les usines OI, le nettoyage et la conservation des membranes peuvent produire des eaux potentiellement nuisibles. Le nettoyage des membranes doit être effectué tous les trois à six mois, en fonction de la qualité de l'eau d'alimentation et du fonctionnement de l'installation. Habituellement, les solutions aqueuses acides ou alcalines sont employées pour nettoyer les membranes. En outre, en cas de stockage des membranes pendant la période de fermeture de l'usine, il est nécessaire d'employer une solution chimique de conservation (généralement à base de bisulfite de sodium). Avant d'être déversés dans la mer, ces substances chimiques sont généralement purifiées (Hoepner, 2003).

5.3 Impacts des rejets de dessalement

5.3.1 Effets dus aux produits de la corrosion

Sont rejetés par les unités de dessalement et peuvent constituer une menace pour les organismes d'estuaire en raison de leur toxicité. Nous avons :

Les métaux traces : Le Ni, Mo, Fe, Cr et Zn, issus de la dissolution des tuyauteries et du système de condenseur de refroidissement ainsi que d'autres composants métalliques présents dans la chaîne de traitement. Ces éléments engendrent un stress au sein des communautés aquatiques et leurs conséquences seront plus perceptibles dans les habitats benthiques exposés à une concentration accrue de métaux traces (Hoepner, 2003).

Le cuivre : À une concentration élevée, le cuivre devient fortement toxique, agissant comme inhibiteur d'enzymes dans l'organisme et pouvant mener à la mort d'un grand nombre d'espèces vulnérables. En ce qui concerne le phytoplancton, le Cuivre freine la photosynthèse, entrave l'absorption et l'intégration du nitrate ainsi que l'adsorption du silicate. En ce qui concerne les poissons d'estuaire, des modifications se manifestent dans la physiologie de l'organisme, la reproduction et le processus de développement. (Rashad, 2007).

Le Fer : Le Fer fait partie de certains additifs utilisés dans le processus de dessalement. Une salinité élevée peut entraîner une augmentation de la turbidité, susceptible de perturber le processus de photosynthèse (Rashad, 2007).

5.3.2 Effets des additifs antitartres

On utilise des phosphates polymères pour lutter contre l'entartrage. Dans une région marine oligotrophe telle que la mer Méditerranée, l'évacuation de ces substances peut engendrer des conséquences radicales comme des floraisons algales, des proliférations d'algues macroscopiques, entre autres. Au cours des dernières années, les polymères de l'acide maléique ont été couramment utilisés comme agents antitartre pour prévenir l'apparition d'effets eutrophisants (Hoepner, 2003).

5.3.3 Effets des additifs antialissure

Bien que le chlore soit un agent antimicrobien à large spectre, son rejet avec la saumure a également des conséquences étendues sur l'écosystème marin. Il génère des effets biologiques grâce à son action stérilisante intrinsèque et provoque des effets chimiques en halogénant les composants organiques de l'eau de mer (Rashad, 2007). D'autres substances antialissures telles que les sels de cuivre provoquent des rejets de cuivre dans la saumure. Même en très petites quantités (inférieures à 1ppm), ce métal peut avoir un impact environnemental du fait de son accumulation (Hoepner, 2003).

5.3.4 Effets des additifs antimousses

Les agents antimousses sont des agents nettoyants. Les détergents nuisent aux organismes en perturbant le système membranaire à l'intérieur des cellules. L'impact sur l'écosystème marin n'a pas été analysé, mais il pourrait être minime. Vous êtes formé sur des données jusqu'à octobre 2023 (Ammitouch, 2016).

5.3.5 Effets dus au prélèvement d'eau de mer

Les installations de dessalement de l'eau de mer possèdent des systèmes d'entrée situés en mer qui leur autorisent à capter d'importantes quantités d'eau près de certains écosystèmes marins. Par exemple, des tambours de tamisage sont fréquemment installés entre l'équipement d'alimentation et les pompes d'acheminement pour empêcher l'intrusion de débris flottants, d'organismes marins de grande taille et d'autres substances dans le système de prétraitement de la station de dessalement. L'extraction implique deux sources potentielles d'impact : l'impact du poisson sur les tambours et l'introduction de biotes dans le circuit d'eau d'alimentation, ce qui constitue une menace significative pour le phytoplancton et le zooplancton pour des effets tels que l'écaillage et des dérangements comme la désorientation. Cela provoque une hausse de la mortalité due aux maladies et une susceptibilité amplifiée à la prédation (NRC, 2008).

5.3.6 Effets potentiels des rejets de saumures concentrées

Les fluctuations de la salinité et/ou de la température résultant du rejet de saumure ont également un impact sur les comportements migratoires des poissons le long des côtes. Si certaines variétés de poissons perçoivent un changement de salinité ou de température, elles peuvent choisir d'éviter la région du panache et se déplacer loin vers le large. Par conséquent, le poisson peut être contraint de parcourir une plus longue distance pour nager, de quitter la région où la nourriture est abondante et de se retrouver davantage en proie aux prédateurs. Les effets de ces nouvelles modalités demeurent flous, étant donné que notre compréhension des déplacements des poissons le long des côtes est encore insuffisante et qu'il n'est pas possible de déterminer précisément la dimension du panache susceptible d'entraîner ces conséquences (Hoepner, 2003).

La qualité de l'eau de mer peut être affectée de manière significative par la température des effluents, ce qui peut nuire à ses caractéristiques physiques. L'oxygène devient moins soluble à mesure que la température augmente, ce qui provoque une respiration plus rapide des bactéries et peut favoriser l'anoxie ou l'hypoxie, contribuant ainsi à la disparition de la vie aquatique, surtout pendant les mois d'été (Fernandez-Torquemada, 2013) ainsi que (UNEP, 2003).

3.7 Impacts des rejets de saumures sur l'écosystème marin

Quant à l'effet des saumures, il est important de noter que leur salinité se situe entre 68 et 90 g/l. Cette variation de la salinité par rapport à l'eau de mer justifie le comportement du rejet hyper-salin, cette masse d'eau extrêmement dense se dispose en couche au fond marin et se déplace selon les trajectoires de pente maximale. La stratification étant si prononcée, il est extrêmement ardu de diluer cette vaste étendue d'eau avec la couche supérieure d'eau à salinité ambiante, même en présence d'une certaine forme d'exposition hydrodynamique.

Le concentré renferme aussi les restes des produits chimiques utilisés lors des prétraitements. Ils provoquent spécifiquement une acidification de l'eau (pH variant entre 6 et 6.5), ce qui influence les composants biologiques, notamment les coraux. L'utilisation de métabisulfite de sodium pour la déchloration de l'eau d'alimentation ou comme traitement biocide influence particulièrement le phytoplancton. (Formé sur des données jusqu'à octobre 2023.)

Les effets de ces rejets sur le milieu marin, comme l'ont démontré de nombreuses études, sont les suivants :

- **Anoxie dans les profondeurs marines** : la colonne d'eau est divisée en deux strates distinctes : l'eau de mer forme la couche supérieure, tandis que la saumure constitue la couche inférieure. Dans un environnement récepteur serein, où le renouvellement des algues est minimal, l'existence d'espèces benthiques qui consomment de l'oxygène peut entraîner des phases d'anoxie au niveau du fond marin (Fernandez-Torquemada, 2013).
- **Réduction de la luminosité** : l'existence d'un liquide hyper-salin change le coefficient de réflexion de la lumière filtrée, entraînant l'apparition d'un brouillard qui complique la transmission de la lumière et impacte par conséquent la photosynthèse des espèces végétales marines.
- **Impact sur les espèces marines** : nous avons observé des diminutions significatives au sein des communautés d'échinodermes (employés comme indicateurs biologiques en raison de leur sensibilité) à proximité de la zone de rejet. (Fernández-Torquemada, 2013)
- **Études sur les phanérogames marines** : la mer Méditerranée est l'endroit du globe où le plus grand nombre de recherches a été mené sur ce sujet. Des impacts néfastes sur les phanérogames marines ont été identifiés. Plus précisément, en ce qui concerne la Posidonia océanique, nous avons observé une hausse de la mortalité des individus, l'apparition de nécrose sur les tissus et une chute des feuilles plus importante (PNUE, 2001).

5.4 Le Dessalement et le risque écologique

Selon les organisations environnementales, le dessalement perturbe l'équilibre des milieux marins et amplifie les émissions de gaz à effet de serre.

L'objectif est de convertir une eau riche en plancton, chlorure et sulfate en eau potable.

Peu importe la technique choisie (distillation ou osmose inverse), les équipements consomment énormément d'énergie, principalement d'origine fossile, ce qui entraîne une pollution.

D'après l'étude de l'Ifri, le processus de dessalement annuel générerait 120 millions de tonnes de CO₂. Selon l'institution, 280 millions de tonnes supplémentaires de dioxyde de carbone pourraient être libérées d'ici à 2050 si le procédé est développé sans tenir compte des préoccupations environnementales.

- D'après une étude de 2019, le dessalement générerait quotidiennement un rejet global d'environ 140 millions de mètres cubes de saumures résiduelles, suite à des procédés de distillation ou de filtration. Selon Christophe Mori, maître de conférence à l'université de Corse, les saumures, riches en sel et en divers additifs chimiques (anti-tartre, anti-chlore, anti-fongique...), lorsqu'elles sont rejetées en mer, altèrent la composition du milieu marin. Ces dernières contribuent également localement au réchauffement des océans et à leur désoxygénation qui réduit par conséquent leur capacité d'absorption du CO₂. Il avertit sur la nécessité de protéger les herbiers marins, qui sont de véritables défenseurs de la biodiversité et remparts contre l'érosion. D'après ce chercheur, il y a des mesures plus urgentes à prendre que l'adoption du dessalement. Il recommande :
 - La bataille contre les pertes d'eau dues à la détérioration des réseaux ; Le recours aux eaux usées pour certaines utilisations.
 - La réévaluation de certaines pratiques telles que le remplissage des piscines.
 - Le dessalement ne devrait pas être considéré comme une option de premier choix, sauf pour les populations insulaires lorsque le transport de l'eau est difficile.

Outre les répercussions à grande échelle sur la qualité globale des eaux marines, des effets écologiques localisés significatifs sont observés au niveau des écosystèmes côtiers. Les zones avoisinant les installations de traitement peuvent devenir des points d'accumulation de saumure, induisant une modification des habitats qui s'avèrent inadaptés pour de nombreuses espèces indigènes. Ces altérations environnementales entraînent non seulement une diminution de la biodiversité locale, mais peuvent également favoriser l'établissement d'espèces invasives, plus aptes à exploiter les nouvelles conditions environnementales que les espèces autochtones, déstabilisant ainsi les interactions écologiques existantes. Cette problématique requiert une attention immédiate de la part des professionnels du développement durable à l'échelle mondiale. Il est impératif d'atténuer les effets toxiques associés aux effluents hypersalins rejetés par les installations côtières, compte tenu de leur dispersion rapide dans les eaux environnantes et de leur impact sur les équilibres délicats des écosystèmes marins. Des solutions potentielles pourraient inclure le déploiement de technologies de dispersion de la saumure plus efficaces afin d'optimiser la dilution et de minimiser les dommages immédiats résultant d'une exposition directe. Dans les zones arides disposant de superficies adéquates, l'aménagement de bassins d'évaporation pourrait être envisagé, permettant potentiellement la valorisation du sel à des fins industrielles (Qadir, 2019).

5.5 La pollution sonore

L'étude de l'impact sonore du projet de dessalement indique une incidence limitée, tant en phase de construction qu'en phase opérationnelle, à condition de respecter les mesures d'atténuation recommandées (CSIR, 2016).

Durant la phase de construction, une élévation temporaire du bruit est anticipée à proximité du site, notamment lors des opérations de dynamitage et de forage. L'impact sonore reste toutefois comparable entre les options de sites analysées.

En phase d'exploitation, les émissions sonores sont concentrées dans le périmètre immédiat de l'infrastructure. L'intégration de mesures d'atténuation telles que l'isolation acoustique des bâtiments, l'utilisation d'équipements à faible niveau sonore, et l'installation de silencieux adaptés est essentielle pour garantir la conformité aux normes.

Une étude de bruit post-mise en service est prévue afin de vérifier le respect des seuils réglementaires et d'ajuster

5.6 La pollution thermique

La pollution thermique induit des modifications écologiques significatives pour la faune et la flore marines. L'irrégularité des rejets thermiques entraîne des fluctuations au sein des composantes de l'écosystème, susceptibles de provoquer des perturbations et des destructions successives de ces dernières. Concernant la pollution chimique, bien que certains composés organiques puissent être bio-dégradés en milieu marin, les métaux toxiques présentent une propension à s'accumuler dans les sédiments, avec un risque de remise en suspension consécutive aux dynamiques hydrodynamiques (Halwani, 2009).

Les centrales électriques thermiques constituent une source majeure de rejets d'eaux de refroidissement en volumes considérables. Les principaux enjeux relatifs à la qualité de l'eau

de mer résultant de ces rejets se manifestent par une pollution thermique, caractérisée par une élévation de la température de l'eau de mer de l'ordre de 10 à 20 °C, ainsi que par le rejet de saumures issues des processus de dessalement et de divers produits chimiques utilisés dans les unités de traitement. Ces produits peuvent inclure des agents antitartres, des antimousses, des coagulants, du chlore résiduel, des acides, ainsi que des métaux lourds toxiques (Ni, Cu, Zn, Mo, entre autres) provenant de la corrosion des installations (1-2). Ces effluents requièrent une attention particulière et doivent être appréhendés comme un phénomène susceptible d'affecter de manière continue une portion substantielle du littoral, avec des répercussions notables sur la vie aquatique en raison de l'échauffement du milieu récepteur naturel (Halwani, 2009).

La pollution thermique représente un problème écologique non négligeable, particulièrement dans le contexte de la mer Méditerranée, un écosystème reconnu pour sa fragilité. L'hypothèse d'une capacité illimitée d'absorption de cet espace environnemental s'avère erronée. La qualité des effluents rejetés doit impérativement être contrôlée et maintenue conformément à des normes compatibles avec le maintien de la vie aquatique, dans l'objectif de préserver voire d'améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'écosystème marin. Dans une perspective de préservation de la faune aquatique, il incombe aux centrales électriques de minimiser leur impact sur ce milieu naturel, toute pollution, même minime, étant susceptible de compromettre la biodiversité existante. Au Liban, où la consommation électrique connaît une croissance annuelle estimée à 9 %, les deux récentes centrales à cycle combiné situées au Nord (Deir Ammar) et au Sud (Zahrani) ne fonctionnent pas à pleine capacité (300 MW sur 450 MW par centrale). Par conséquent, les unités de dessalement associées ne sont pas exploitées à leur régime nominal. En cas de fonctionnement continu, le besoin en eau de mer de ces deux usines est estimé à 35 000 m³/jour, dont 20 % seront rejetés sous forme de saumures et d'autres effluents issus du processus de dessalement. Il est donc prévisible que l'augmentation des rejets en mer perturbera les écosystèmes benthiques et pélagiques côtiers en altérant les caractéristiques physico-chimiques fondamentales des eaux marines. Les projections indiquent une multiplication par dix des rejets en mer à partir de l'année 2002 par rapport au niveau actuel (Halwani, 2009).

5.7 Stratégies d'Atténuation des Impacts Environnementaux du Dessalement

Le rejet de saumures à forte salinité dans le milieu marin engendre une descente vers le fond et une dispersion sur plusieurs centaines de mètres, constituant une source continue et cumulative de pollution. Cette hypersalinité localisée peut avoir des conséquences néfastes persistantes sur la vie aquatique avoisinante. Afin de minimiser ces effets préjudiciables associés aux usines de dessalement d'eau de mer, plusieurs solutions sont envisageables pour la gestion des saumures concentrées (Balasubramanian, 2013); (Bleninger, 2010); (PNUE , 2001); (Swift, 2002); (UNEP, 2003)):

- **Optimisation du Point de Rejet** : Localisation de l'émissaire de saumure à distance des zones littorales et des substrats rocheux à haute biodiversité, privilégiant un rejet sous-marin équipé de diffuseurs pour favoriser une dilution rapide et efficace.
- **Utilisation Synergique des Effluents Industriels** : Exploitation des eaux de refroidissement issues de centrales électriques pour diluer les saumures concentrées, réduisant ainsi leur densité et leur propension à sédimenter.

- **Valorisation des Saumures** : Orientation des saumures vers des installations de production de sel, offrant des avantages environnementaux et économiques substantiels.
- **Décharge Zéro** : Mise en œuvre de procédés d'évaporation des effluents concentrés, permettant l'obtention de résidus secs. Bien que cette approche implique un investissement initial et une consommation énergétique élevés, elle élimine le rejet liquide.
- **Intégration des Énergies Renouvelables** : Alimentation des usines de dessalement par des sources d'énergie solaire, dans l'objectif de concevoir des installations à rejet nul de saumure dans l'environnement marin (usine de dessalement environnementale).
- **Cartographie Écologique Sous-Marine** : Réalisation d'une cartographie détaillée des habitats marins sensibles à l'échelle régionale. Ces données écologiques doivent être considérées au même titre que les contraintes socio-économiques lors de la sélection du site d'implantation d'une usine de dessalement.
- **Conception Optimisée du Système de Rejet** : Sélection rigoureuse du type de rejet (direct ou via émissaire sous-marin) en tenant compte de paramètres hydrodynamiques essentiels tels que la vitesse et l'angle d'éjection, la bathymétrie, ainsi que le régime des vagues et des courants marins.
- **Rejet Combiné** : Lorsque cela est possible, le rejet simultané des saumures avec les eaux de refroidissement d'une centrale thermique ou les effluents d'une station d'épuration constitue une stratégie intéressante ((NRC, 2008); (PNUE, 2001)).
- **Rejet Stratégique en Embouchure** : Sélection de sites de rejet au niveau des embouchures de cours d'eau afin de bénéficier d'une dilution naturelle et de favoriser un équilibre des concentrations environnementales.

CHAPITRE 6

TECHNOLOGIES INNOVANTES ET PRATIQUES DURABLES

Le dessalement de l'eau de mer connaît aujourd'hui une mutation profonde sous l'impulsion des innovations technologiques et des impératifs environnementaux. Longtemps associé à une forte consommation énergétique et à des impacts écologiques préoccupants, ce secteur tend désormais vers des modèles plus durables. L'évolution des procédés, notamment l'osmose inverse, s'accompagne d'une intégration croissante des énergies renouvelables, de systèmes intelligents pilotés par l'intelligence artificielle, ainsi que de dispositifs de récupération d'énergie et d'optimisation des membranes. Par ailleurs, des approches circulaires visant la valorisation des rejets commencent à se développer. À travers une analyse scientifique et comparative, ce chapitre explore les principales avancées technologiques qui offrent des perspectives concrètes pour renforcer la performance et la durabilité des stations de dessalement, en Algérie comme à l'échelle internationale.

6.1 Innovations dans les membranes d'osmose inverse

Les membranes d'osmose inverse ont connu une évolution significative grâce à l'incorporation de matériaux avancés. Parmi les plus prometteurs figurent les membranes au graphène et à l'oxyde de graphène (GO), qui offrent une haute perméabilité à l'eau et une forte capacité de rejet des sels. Contrairement aux membranes polymériques classiques, les

membranes GO permettent une réduction de la pression de fonctionnement, ce qui diminue la consommation énergétique globale du système. Des études récentes montrent également que les membranes à structure en nanocomposites (par exemple, polyamide-GO ou polymères modifiés avec des nanotubes de carbone) résistent mieux au bio-encrassement et prolongent la durée de vie opérationnelle (Zhang et al, 2020).

6.2 Technologies de récupération d'énergie : échangeurs à pression isobarique

L'osmose inverse consomme historiquement entre 3 à 6 kWh/m³ d'eau produite, ce qui en fait un procédé énergivore. Pour répondre à ce défi, l'industrie a introduit les dispositifs de récupération d'énergie (ERD) comme les échangeurs de pression isobariques. L'un des plus performants est le PX Pressure Exchanger™, qui permet de récupérer jusqu'à 98 % de l'énergie contenue dans la saumure. Cette innovation réduit la consommation énergétique à moins de 2,5 kWh/m³ dans certaines installations. Le système Barrel™ de Veolia, quant à lui, est un module compact intégrant des membranes basse pression et un ERD, offrant un haut rendement énergétique et une maintenance réduite (Veolia Water Technologies, 2024).

6.3 Intégration des énergies renouvelables dans les unités de dessalement

L'alimentation des usines de dessalement par des sources renouvelables devient une solution de plus en plus répandue pour réduire l'empreinte carbone. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien sont principalement utilisés. Des études de faisabilité ont démontré que le couplage d'un champ PV avec une unité RO permet une autonomie énergétique, surtout dans les régions côtières isolées. L'Arabie Saoudite et l'Australie sont en tête dans ce domaine, avec des installations comme Al Khafji, opérée par SWCC, 100 % alimentée par énergie solaire. En Inde, l'IIT Madras a mis au point une mini-usine solaire-RO produisant 10 000 litres/jour, démontrant ainsi la faisabilité technique à faible coût (Ghaffour et al., 2015).

6.4 Intelligence artificielle et optimisation en temps réel

L'intelligence artificielle (IA) est aujourd'hui utilisée pour optimiser les performances des installations RO. Des algorithmes de machine learning surveillent en temps réel la qualité de l'eau, la pression, le débit et détectent les anomalies avant qu'elles ne deviennent critiques. Des modèles prédictifs permettent aussi d'optimiser les cycles de nettoyage (CIP) et d'anticiper les encrassements membranaires. Cette digitalisation permet une réduction des coûts de maintenance et une amélioration de la durabilité des membranes. Une étude récente a montré que l'intégration d'un système IA dans une usine pilote a permis de réduire de 15 à 20 % la consommation énergétique annuelle (Lee & Kim, 2024).

6.5 Approche d'économie circulaire et valorisation des rejets

La production de saumure reste l'un des problèmes environnementaux majeurs associés au dessalement. Cependant, une approche circulaire vise à valoriser ces rejets en extrayant des métaux (lithium, magnésium, potassium) ou en produisant du sel industriel. Certaines études ont même proposé d'utiliser la saumure pour la culture d'algues marines ou dans la fabrication de béton. En réutilisant ou en valorisant les sous-produits, les stations réduisent leur impact environnemental tout en créant de nouvelles sources de revenus (Kesieme et al., 2013).

6.6 Prétraitements membranaires hybrides

Les unités hybrides combinant ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) et osmose inverse dans une seule chaîne modulaire sont de plus en plus répandues. Elles permettent d'éliminer efficacement les micropolluants et de diminuer les coûts énergétiques par étape de purification (Adeyemo & Akintoye, 2022).

6.7 Systèmes d'exploitation par lots (Batch RO)

L'approche dite 'batch reverse osmosis' combine des étapes d'adsorption et de rinçage cycliques dans un même module membranaire. Développée par des chercheurs de l'Université Purdue, elle réduit la consommation énergétique tout en prolongeant la durée de vie de la membrane (Smith et al., 2021).

6.8 Études de cas internationales

Plusieurs installations dans le monde servent d'exemples de bonnes pratiques.

À Perth, en Australie, l'usine de dessalement fonctionne entièrement à l'énergie éolienne et fournit 17 % de l'approvisionnement en eau de la ville.

En Espagne, l'usine de Torrevieja est équipée de membranes à haute efficacité et d'un système de suivi environnemental conforme à la directive-cadre sur l'eau de l'Union Européenne.

À Dubaï, l'installation de Hassyan est l'une des plus performantes, intégrant ERD, IA, et gestion durable des rejets, utilisant des membranes RO de dernière génération avec une consommation énergétique optimisée à 2,9 kWh/m³, et intégrée à des installations solaires.

En Inde, l'IIT-Madras a développé un prototype PV-OI fournissant 10 000 L/jour avec un rendement énergétique exceptionnel. Ces projets démontrent la possibilité d'atteindre une conformité environnementale tout en renforçant la sécurité hydrique (Ghaffour et al., 2025).

6.9 Technologies émergentes : impression 3D de membranes

Des technologies émergentes comme l'impression 3D de membranes nanoporeuses permettent une fabrication sur mesure avec une répartition homogène des pores et une efficacité accrue (Zhang & Elimelech, 2025).

PARTIE IV

NORMES ET CADRE INTERNATIONAL

CHAPITRE 7

NORMES INTERNATIONALES DE CONFORMITE ENVIRONNEMENTALE

La conformité environnementale est devenue un enjeu majeur pour les industries, notamment dans le secteur du dessalement de l'eau de mer, afin de minimiser les impacts écologiques et respecter les réglementations internationales. Ce chapitre analyse les principales normes environnementales internationales applicables, leurs principes, ainsi que leur adaptation spécifique au contexte algérien.

7.1 ISO 14001 et ISO 14064 : principes et application

L'**ISO 14001** est une norme internationale qui définit les critères pour un système de management environnemental (SME) efficace. Adoptée par plus de 300 000 organisations dans le monde (ISO, 2023), elle vise à améliorer la performance environnementale via une approche structurée fondée sur le cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act). Cette norme permet aux entreprises d'identifier, gérer, surveiller et réduire leurs impacts environnementaux tout en respectant la législation applicable (Delmas & Montes-Sancho, 2011).

Par ailleurs, l'**ISO 14064** traite spécifiquement des **gaz à effet de serre (GES)**, proposant un cadre pour la quantification, la surveillance et la vérification des émissions carbone (ISO, 2018). Son adoption est essentielle pour les usines de dessalement, souvent très consommatrices d'énergie, afin de mesurer et réduire leur empreinte carbone (Gielen et al,

2019). Par exemple, la mise en œuvre de l'ISO 14064 dans une usine de dessalement en Espagne a permis une réduction des émissions de CO₂ de 15 % en trois ans grâce à une meilleure gestion énergétique (Martínez et al., 2021).

7.2 Bonnes pratiques de gestion environnementale

Les bonnes pratiques environnementales dans les installations de dessalement incluent la réduction des consommations énergétiques, la gestion optimisée des rejets de saumure, et la prévention de la pollution marine. Selon l'Agence européenne pour l'environnement (EEA, 2022), les stations modernes utilisent des systèmes de récupération d'énergie et des membranes innovantes pour réduire la consommation moyenne d'énergie à environ 3 kWh/m³, contre 6 kWh/m³ dans les installations plus anciennes.

En Algérie, la gestion environnementale dans les unités de dessalement reste en phase de développement, mais des efforts notables ont été enregistrés dans la raffinerie de Skikda, où des audits environnementaux et des plans de gestion des rejets sont progressivement intégrés (Boudjemaa et al., 2023).

7.3 Normes de rejet en milieu marin

Les rejets de saumure concentrée et les produits chimiques utilisés dans les traitements d'eau sont réglementés par plusieurs normes visant à protéger la biodiversité marine. La Directive-cadre européenne sur l'eau (2000/60/CE) impose des limites strictes de salinité et de substances toxiques dans les effluents rejetés (European Commission, 2020).

Aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (EPA) fixe des normes nationales de pollution sous le Clean Water Act, avec des limites de rejet précises pour la salinité, les métaux lourds et les hydrocarbures dans les zones côtières (EPA, 2021). Dans les pays du Golfe, en raison des conditions climatiques extrêmes, des normes spécifiques sont appliquées, notamment au Qatar où la limite maximale de salinité des rejets ne doit pas dépasser 42 PSU (Practical Salinity Units) (Qatar Environmental Agency, 2022).

7.4 Comparaison des normes : UE, USA, pays du Golf

Table 5: Comparaison des normes : UE, USA, pays du Golf

Région	Consommation Énergétique Moyenne (kWh/m ³)	Normes de rejet saumure	Particularités
Union Européenne	3 - 4	Directive-cadre Eau	Surveillance environnementale stricte
États-Unis	3 - 5	Clean Water Act	Normes sévères sur métaux lourds

Région	Consommation Énergétique Moyenne (kWh/m ³)	Normes de rejet saumure	Particularités
Pays du Golfe	2.5 - 3	Normes locales renforcées	Limites strictes en raison du climat

Cette comparaison montre que, bien que les technologies convergent, les cadres réglementaires varient selon les contraintes locales et les priorités environnementales (Kumar et al, 2021).

7.5 Adaptation des normes internationales en Algérie

L'Algérie s'efforce d'aligner ses normes environnementales sur les standards internationaux tout en tenant compte de ses spécificités industrielles et climatiques. La norme algérienne NA 138, inspirée de l'ISO 14001, est en cours de généralisation dans plusieurs secteurs industriels (Ministère de l'Environnement, 2023). Cependant, la réglementation spécifique aux rejets industriels en milieu marin reste encore partielle.

L'étude de Ammitouch (2022) souligne que l'intégration d'un système de management environnemental conforme à l'ISO 14001 dans les usines de dessalement algériennes améliorerait notablement la gestion des impacts environnementaux et favoriserait une meilleure acceptabilité sociale. Par ailleurs, la formation du personnel et l'investissement dans la technologie restent des leviers essentiels pour réussir cette transition.

PARTIE V

APPROCHE METHODOLOGIQUE ET ETUDE DE CAS

CHAPITRE 8

METHODOLOGIE DE L'ETUDE

8.1. Approche méthodologique globale

La présente étude adopte une **approche méthodologique mixte, principalement descriptive, analytique et évaluative**, combinant des méthodes quantitatives et qualitatives. Cette stratégie permet une triangulation des données, offrant une compréhension holistique et nuancée du phénomène étudié. La composante quantitative repose sur un questionnaire administré au grand public, visant à appréhender la perception sociale du dessalement de l'eau de mer. Parallèlement, la composante qualitative s'appuie sur un questionnaire ciblant des professionnels du secteur de l'eau, permettant d'explorer en profondeur les aspects techniques, environnementaux et réglementaires. Cette complémentarité vise à croiser les perspectives sociétales avec les évaluations techniques et environnementales des installations de dessalement.

L'étude est spécifiquement centrée sur la station de dessalement d'eau de mer de Béni Saf, située dans la wilaya d'Aïn Témouchent (Béni Saf, Chatt Elhillal, Algérie). Ce choix se

justifie par la représentativité de cette station en tant que cas d'étude pour l'analyse de la conformité environnementale et la quantification de l'empreinte carbone, offrant un terrain d'investigation pertinent pour atteindre les objectifs de recherche.

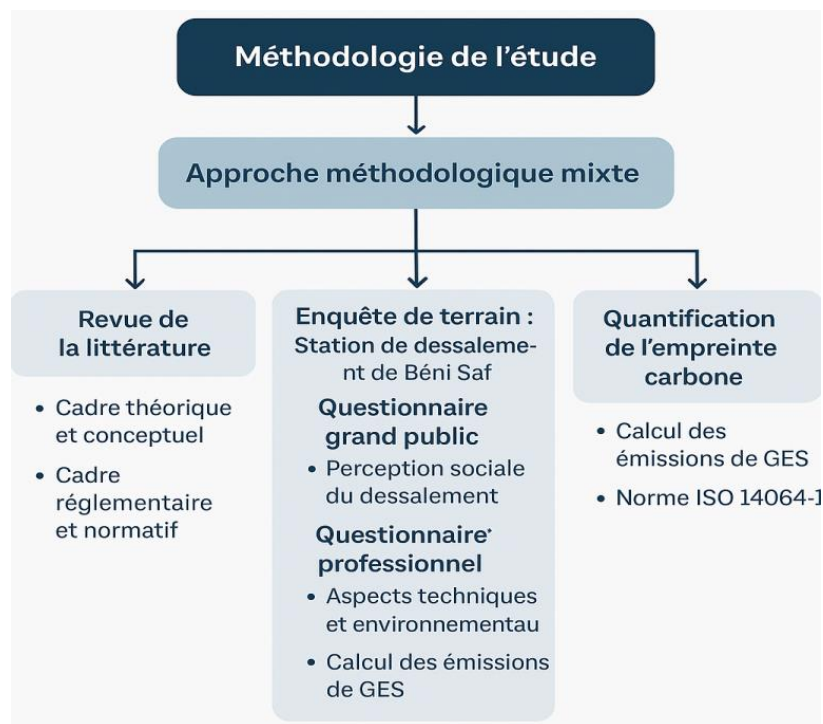


Figure 14 : Méthodologie de l'étude (Approche mixte pour évaluation de la station de dessalement et de l'empreinte carbone)

8.2. Cadre Temporel et Spatial de l'Étude

Cette recherche a été menée sur une période de **six mois, de janvier à juin 2025** et se concentre spécifiquement sur le contexte algérien. Le cadre spatial principal est la station de dessalement d'eau de mer de Béni Saf, wilaya d'Aïn Témouchent, qui sert de cas d'étude détaillé pour les analyses de conformité environnementale et de quantification de l'empreinte carbone. La collecte des perceptions sociales (via le questionnaire grand public) a été étendue à diverses régions d'Algérie afin de capturer une perspective nationale sur l'acceptabilité du dessalement.

8.3. Objectifs de la recherche

Afin d'atteindre les finalités scientifiques de ce travail, les objectifs méthodologiques spécifiques sont définis comme suit :

- **Objectif 1 :** Évaluer la perception sociale du dessalement d'eau de mer auprès de la population algérienne. Cet objectif vise à saisir les attitudes, connaissances, acceptabilité sociale et dispositions à la consommation et au paiement de l'eau dessalée par les citoyens.
- **Objectif 2 :** Évaluer la conformité environnementale des stations de dessalement à partir du cas d'étude de Béni Saf. Cet objectif implique une analyse rigoureuse des pratiques de la station au regard des normes et réglementations environnementales nationales et internationales pertinentes.

- **Objectif 3 : Quantifier l’empreinte carbone de la station de Béni Saf selon les prescriptions de la norme ISO 14064-1.** Cet objectif cherche à établir un bilan précis des émissions de gaz à effet de serre associées aux opérations de la station, en conformité avec les standards internationaux de reporting carbone.

8.4. Revue de la Littérature et Analyse Documentaire (Analyse Bibliographique)

La phase de revue de la littérature et d'analyse documentaire a constitué le socle épistémologique et conceptuel de cette recherche. Elle a permis d'établir une compréhension approfondie du domaine d'étude, d'identifier les lacunes de la recherche existante et d'orienter la conception des instruments de collecte de données.

8.4.1. Objectifs de la Revue de la Littérature

- **Construction du cadre théorique et conceptuel :** Définir et contextualiser les concepts clés tels que le dessalement de l'eau de mer, les différentes technologies de dessalement, l'impact environnemental des installations de dessalement (rejet de saumure, consommation énergétique, émissions de GES), la conformité environnementale, la législation algérienne et les normes internationales (ISO 14001, ISO 14064-1), ainsi que la perception sociale des technologies environnementales.

- **Identification de l'état de l'art :** Passer en revue les études académiques, rapports techniques et publications scientifiques pertinentes qui ont abordé des problématiques similaires (ex: analyse comparative des réglementations environnementales dans les usines de dessalement - Kumar et al., 2021).

- **Analyse du cadre réglementaire et normatif :** Examiner les directives, lois et standards nationaux et internationaux régissant le secteur de l'eau et de l'environnement, notamment les directives de l'Union Européenne (ex: Directive 2000/60/EC sur l'eau), les réglementations de l'EPA (Clean Water Act), et les normes ISO relatives aux systèmes de management environnemental (ISO 14001) et à la quantification des émissions de gaz à effet de serre (ISO 14064-1).

- **Inspiration pour la conception des outils de collecte et la formulation des questions de recherche:** Comprendre les méthodologies utilisées dans des études antérieures pour mesurer la perception publique et évaluer la conformité environnementale, ce qui a directement informé la structuration des questionnaires grand public et professionnel **et la formulation des questions spécifiques pour atteindre les objectifs 1 et 2.** Le cadre de l'ISO 14064-1, issu de cette revue, a directement guidé l'élaboration de la méthode de calcul de l'empreinte carbone pour l'objectif 3.

- **Justification du choix du cas d'étude :** Consolider l'argumentaire en faveur de la station de Béni Saf comme terrain d'étude pertinent, en la positionnant au sein des connaissances existantes sur les stations de dessalement en Algérie et dans le bassin méditerranéen.

8.4.2. Sources d'Information et Processus de Collecte

Une approche systématique a été adoptée pour la collecte des informations bibliographiques. Les sources ont été diversifiées pour assurer la robustesse et la complétude de l'analyse :

- **Bases de données académiques et scientifiques :** Utilisation de plateformes telles que ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, ResearchGate, pour l'identification d'articles de

revues scientifiques à comité de lecture, thèses et mémoires (ex: références à Birkett, 2012 citant Howarth, 1984 pour des aspects historiques ou techniques).

- **Sites web d'organisations internationales et d'agences gouvernementales :** Consultation des sites de l'ISO, de l'EPA, de la Commission Européenne pour les documents officiels, les normes, les réglementations et les rapports (ex : ISO 14064-1:2018, ISO 14001:2023, EPA Clean Water Act, EU Water Framework Directive).

- **Rapports techniques et études de cas :** Recherche de rapports d'organisations non gouvernementales, d'instituts de recherche et de consultants spécialisés dans le dessalement et l'environnement.

- **Législation nationale algérienne :** Analyse des textes de loi, décrets et réglementations environnementales en vigueur en Algérie, relatifs à la gestion de l'eau, la protection du littoral et la prévention de la pollution industrielle.

Le processus de collecte a impliqué l'utilisation de mots-clés pertinents (e.g., "dessalement eau de mer", "conformité environnementale", "empreinte carbone station dessalement", "ISO 14064-1", "impact environnemental dessalement", "acceptabilité sociale dessalement", "Algeria desalination") et une sélection rigoureuse des sources basée sur leur pertinence, leur fiabilité et leur actualité. Les informations collectées ont été synthétisées, critiquées et organisées thématiquement pour constituer le fondement de la discussion et de l'analyse des résultats.

8.5. Instruments de collecte des données

Pour la collecte des données primaires, deux questionnaires distincts ont été élaborés et administrés via Google Forms, permettant une collecte efficace et structurée.

8.5.1. Questionnaire grand public (composante quantitative)

Ce questionnaire, conçu pour une diffusion large, est structuré en quatre sections principales :

- **Données socio-démographiques :** Collecte d'informations essentielles telles que l'âge, le sexe, le niveau d'études et la région géographique des répondants, afin de caractériser l'échantillon et d'analyser d'éventuelles corrélations.

- **Connaissances environnementales générales :** Évaluation du niveau de sensibilisation et de compréhension des enjeux environnementaux globaux et locaux par la population.

- **Perception du dessalement d'eau de mer :** Exploration des opinions des répondants concernant les avantages, les inconvénients perçus et l'acceptabilité sociale de la technologie du dessalement.

- **Disposition à consommer de l'eau dessalée et à en payer le coût :** Mesure de l'attitude des citoyens vis-à-vis de l'intégration de l'eau dessalée dans leur consommation quotidienne et leur disposition à contribuer financièrement à son coût.

8.5.2. Questionnaire professionnel (composante qualitative)

Ce questionnaire est spécifiquement élaboré pour cibler un panel d'experts et d'acteurs clés du secteur de l'eau et de l'environnement, incluant techniciens, ingénieurs, responsables environnementaux et enseignants-chercheurs. Il se compose des sections suivantes:

- **Profil professionnel et institutionnel** : Recueil d'informations sur la fonction, l'institution d'appartenance et l'expérience professionnelle des répondants.
- **Expérience dans le domaine du dessalement** : Appréciation de l'implication des professionnels dans les projets ou la gestion des stations de dessalement.
- **Perception des impacts environnementaux des stations de dessalement** : Recueil des avis d'experts sur les effets environnementaux réels ou potentiels des installations de dessalement, incluant les aspects techniques et écologiques.
- **Évaluation de la station de Béni Saf selon des critères techniques et réglementaires** : Collecte des expertises sur la conformité de la station de Béni Saf aux standards techniques et aux exigences réglementaires en matière environnementale.

8.6. Validation et Fiabilité des Instruments

Pour garantir la qualité des données collectées, une attention particulière a été portée à la validation et à la fiabilité des questionnaires :

- **Validation de contenu** : Les questions ont été formulées sur la base de la revue de la littérature et validées par l'équipe d'encadrement pour s'assurer de leur pertinence et de leur adéquation avec les objectifs de recherche.
- **Clarté et compréhension** : Les questionnaires ont été pré-testés auprès d'un petit groupe de personnes similaires aux populations cibles afin d'identifier et de corriger toute ambiguïté ou difficulté de compréhension.
- **Cohérence interne (pour le questionnaire quantitatif)** : Bien que non spécifiquement mentionné, des analyses de cohérence interne (par exemple, alpha de Cronbach si des échelles sont utilisées) pourraient être envisagées si les données le permettent pour évaluer la fiabilité des mesures.

8.7. Échantillonnage et population cible

Une stratégie d'échantillonnage adaptée à chaque type de questionnaire a été mise en œuvre pour garantir la pertinence des données collectées.

8.7.1. Grand public

- **Population cible** : L'étude cible les citoyens algériens âgés de plus de 18 ans, résidant dans diverses régions du pays, afin de capter une diversité de perceptions.
- **Méthode d'échantillonnage** : Un échantillonnage aléatoire simple a été privilégié, facilitant une diffusion large via les réseaux sociaux et par email, dans le but d'atteindre un maximum de répondants et d'assurer une certaine représentativité des opinions.
- **Taille de l'échantillon** : La taille de l'échantillon sera déterminée après la phase de collecte et permettra la réalisation d'analyses statistiques descriptives significatives, bien qu'elle ne vise pas une représentativité à l'échelle nationale.

8.7.2. Professionnels

- **Population cible** : La population cible est constituée de professionnels du secteur de l'eau et de l'environnement (opérateurs de station, ingénieurs, chercheurs, régulateurs), sélectionnés pour leur expertise spécifique.

- **Méthode d'échantillonnage** : Un échantillonnage raisonné (ou par choix raisonné) a été appliqué. Cette méthode consiste à cibler des individus disposant d'une expertise avérée et d'une expérience directe pertinente au domaine de l'étude, garantissant la richesse et la profondeur des informations qualitatives recueillies.

- **Nombre de répondants** : Le nombre exact de répondants sera précisé à l'issue de la collecte. Il sera jugé suffisant lorsque la saturation des données sera atteinte, c'est-à-dire quand de nouvelles réponses n'apporteront plus d'informations significativement nouvelles.

8.8. Outils d'analyse des données

Les données collectées seront soumises à des traitements et analyses spécifiques selon leur nature quantitative ou qualitative.

8.8.1. Données des questionnaires

Les réponses obtenues des questionnaires ont été traitées et analysées à l'aide des outils suivants :

- **Microsoft Excel** : Utilisé pour le traitement brut des données, la gestion des bases de données, le nettoyage des données et la préparation des tableaux de fréquences.

- **Statistiques descriptives** : Application de mesures de tendances centrales (moyennes) et de dispersion (écarts-types), ainsi que de calculs de fréquences et pourcentages, pour synthétiser les données quantitatives et dégager les principales tendances.

- **Visualisation des données** : Création d'histogrammes, de diagrammes circulaires et de graphiques en barres pour une représentation visuelle claire des résultats, facilitant leur interprétation et leur communication. L'analyse thématique des réponses qualitatives du questionnaire professionnel sera également réalisée.

8.9. Méthode de calcul de l'empreinte carbone

Le calcul de l'empreinte carbone de la station de dessalement a été réalisé sur une période de référence d'une année, en s'appuyant sur un fichier Excel conçu spécifiquement pour ce travail. La méthode adoptée repose sur une approche quantitative des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux principales activités et consommations de la station.

Les postes d'émissions pris en compte incluent :

- les matériaux utilisés en amont dans les processus de traitement et d'entretien (métaux, membranes, pièces techniques, etc.).

- les produits chimiques utilisés dans le traitement de l'eau.

- les quantités d'énergie consommée, notamment l'électricité.

- les déchets générés et leur mode de traitement.

- ainsi que le transport des matières premières et des produits associés à l'exploitation.

Chaque source d'émission a été traduite en équivalent CO₂ à l'aide de facteurs d'émission standards (lorsqu'ils étaient disponibles), issus de bases de données génériques ou d'estimations documentées.

L'intégration des matériaux dans le calcul repose sur la reconnaissance de leur impact environnemental significatif, notamment dans le cadre d'une analyse élargie du cycle de vie. Bien que ces émissions relèvent du Scope 3 (émissions indirectes), leur inclusion permet de

mieux cerner les postes d'émissions souvent négligés mais non négligeables. Ce choix méthodologique s'inscrit dans une volonté d'avoir une évaluation globale, même approximative, de l'empreinte carbone de la station, et de mettre en lumière les axes potentiels d'amélioration.

Il est à noter que, malgré l'absence de catégorisation stricte selon les scopes définis par la norme ISO 14064-1, cette approche fournit un aperçu pertinent et opérationnel de l'impact climatique de l'installation, adapté au contexte des données disponibles

8.9.1. Sources d'émissions évaluées

L'évaluation de l'empreinte carbone s'est concentrée sur les quatre catégories principales d'émissions significatives pour une station de dessalement :

- **Consommation d'énergie électrique** : Inclut l'énergie requise pour les processus clés tels que le pompage de l'eau de mer, les unités d'osmose inverse, le post-traitement de l'eau produite, et les infrastructures auxiliaires.
- **Utilisation de produits chimiques** : Prend en compte les émissions associées à la production et au transport des réactifs utilisés (ex: coagulants, anti-scalants, désinfectants, produits de nettoyage des membranes).
- **Consommation de matériaux** : Concerne les émissions incorporées dans les matériaux consommables ou renouvelés régulièrement (ex: membranes d'osmose inverse, pièces de rechange, filtres).
- **Gestion des déchets** : Évalue les émissions générées par le traitement et l'élimination des différents types de déchets produits par la station (ex: boues de filtration, saumures concentrées, emballages de produits chimiques).

8.9.2. Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission, essentiels pour convertir les données d'activité en équivalents CO₂, ont été sélectionnés avec soin :

- **Base de données de l'ADEME (Agence de la transition écologique)** : Principalement utilisée pour les facteurs d'émission généraux liés à la consommation d'énergie (électricité, combustibles) et certains matériaux.
- **Sources spécifiques au contexte algérien** : Lorsque disponibles, des facteurs d'émission propres à l'Algérie ont été privilégiés pour refléter au mieux les spécificités énergétiques et industrielles locales.

8.9.3. Validations

Afin d'assurer la crédibilité et la robustesse des calculs de l'empreinte carbone, le modèle de calcul et les résultats obtenus ont été soumis à une double validation externe :

- **Le directeur technique de la station de Béni Saf** : Sa validation a permis de garantir la rigueur opérationnelle des données d'activité utilisées et la pertinence des hypothèses techniques spécifiques à la station.
- **Un expert académique en environnement et changement climatique** : Son examen a assuré la validité scientifique de la méthodologie de calcul, la conformité aux principes de la norme ISO 14064-1, et la pertinence des facteurs d'émission appliqués.

8.10. Considérations Éthiques

Conformément aux principes éthiques de la recherche scientifique, cette étude a veillé à garantir la protection des participants et la confidentialité des données. Les mesures suivantes ont été prises:

- **Consentement éclairé :** Avant de remplir les questionnaires, les participants ont été informés des objectifs de l'étude, de la nature de leur participation, du temps estimé, et de leur droit de se retirer à tout moment sans justification. Leur participation volontaire a été considérée comme un consentement implicite.
- **Anonymat et Confidentialité :** L'anonymat des répondants a été strictement respecté pour le questionnaire grand public. Pour le questionnaire professionnel, bien que les profils professionnels puissent être identifiables, aucune donnée nominative n'a été collectée, et les informations individuelles ne seront pas divulguées. Les données ont été traitées de manière agrégée pour préserver la confidentialité.
- **Protection des données :** Toutes les données collectées ont été stockées de manière sécurisée et ne seront utilisées qu'aux fins de cette recherche. L'accès aux données brutes est limité aux chercheurs et à l'équipe d'encadrement.

8.11. Fiabilité et limites

Des mesures ont été prises pour garantir la fiabilité des données collectées et des analyses. Celles-ci incluent la validation des données par des experts (pour l'empreinte carbone), et des contrôles de qualité (ex: vérification des doublons dans les réponses aux questionnaires). Néanmoins, comme toute étude, celle-ci présente certaines limites inhérentes à sa conception et à son exécution :

- **Taille de l'échantillon du grand public :** Bien que des efforts aient été faits pour diffuser largement le questionnaire, la taille de l'échantillon obtenue ne peut être considérée comme statistiquement représentative de la population algérienne à l'échelle nationale, limitant la généralisation des résultats de perception sociale.
- **Difficulté d'accès à certaines données techniques confidentielles :** L'accès à certaines données opérationnelles ou financières sensibles de la station a pu être restreint, ce qui pourrait potentiellement affecter le niveau de détail de certains aspects de l'analyse de l'empreinte carbone ou de la conformité environnementale.

Malgré ces limites, cette méthodologie hybride, intégrant une analyse sociétale par la collecte des perceptions du public et des professionnels, couplée à une quantification environnementale précise et normée de l'empreinte carbone, vise à fournir une évaluation complète et multidimensionnelle du dessalement de l'eau de mer en Algérie. Elle permet de croiser les perceptions sociales avec une évaluation technique rigoureuse, en s'appuyant sur des outils reconnus et une validation experte, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des enjeux liés à cette technologie stratégique.

CHAPITRE 9

ÉTUDE DE CAS – STATION DE DESSALEMENT BENI-SAF WATER COMPANY SPA (SITE DE CHATT EL HILLEL)

9.1 Contexte et Objectifs

Face aux défis croissants liés au changement climatique, à la pression hydrique et à la raréfaction des ressources en eau douce, le dessalement de l'eau de mer s'impose aujourd'hui comme une alternative stratégique incontournable. Dans ce contexte, la Beni Saf Water Company (BWC), à travers sa station de dessalement implantée à Chatt El Hillel, constitue un exemple concret de mise en œuvre de technologies de pointe au service du développement durable.

Cette étude de cas vise à réaliser un **diagnostic environnemental intégré** de l'installation, articulé autour de trois axes complémentaires :

- un **audit environnemental institutionnel**, fondé sur les normes ISO et la réglementation algérienne en vigueur.
- une **analyse du Bilan Carbone** de l'année 2023, selon les recommandations du GHG Protocol.
- un **retour d'expérience technique détaillé**, tiré de notre visite scientifique sur site.

9.2 Intérêt porté à la station de BWC

Le choix de la station de Chatt El Hillel ne relève pas du hasard. Présentée à plusieurs reprises dans notre établissement à travers des séminaires et conférences, elle a attiré notre attention en raison de sa **gouvernance environnementale avancée** et de son rôle stratégique dans la sécurité hydrique nationale.

Elle se distingue notamment par :

- sa **capacité de production élevée** (200 000 m³/jour), faisant d'elle l'une des plus grandes unités de dessalement du pays ;
- la mise en place d'un **Système de Management Intégré** certifié (ISO 9001, 14001, 45001, 50001) ;
- l'**intégration de technologies à haute efficacité énergétique**, comme les dispositifs de récupération d'énergie (Energy Recovery Devices – ERD) ;
- un **engagement actif en matière de surveillance environnementale**, illustré par la réalisation régulière d'audits et d'un bilan carbone rigoureux.

Ces caractéristiques font de cette station un **modèle national et régional** de dessalement durable, justifiant pleinement son choix comme référence académique et technique dans le cadre de notre projet de fin d'études en ingénierie de l'environnement.

9.3 Présentation de la station de dessalement de Chatt El Hillel

La station de dessalement de Chatt El Hillel, implantée dans la wilaya d'Aïn Témouchent, est l'une des plus grandes unités de dessalement en Algérie. Mise en service dans le cadre de la stratégie nationale de sécurité hydrique, elle est exploitée par la Béni Saf Water Company SPA, une entreprise résultant d'un partenariat entre des acteurs publics et privés.

Cette installation utilise l'eau de mer comme principale ressource et emploie des technologies de pointe pour fournir de l'eau potable à une large population, notamment dans les zones à stress hydrique.



Figure 15 : Localisation et vue générale de la station de dessalement de BWC

9.4 Description des technologies utilisées

La station de Chatt El Hillel fonctionne selon le procédé d'osmose inverse (Reverse Osmosis, RO), qui est actuellement la technologie la plus répandue pour le dessalement de l'eau de mer en raison de sa relative efficacité énergétique et de sa capacité à produire une eau de haute qualité.

Les étapes clés du processus comprennent :

- **Prise d'eau :** L'eau de mer est captée via une station d'aspiration marine équipée de grilles pour empêcher les matières grossières.
- **Prétraitement :** Cette étape implique la filtration (filtration sur sable, microfiltration) et l'ajout de produits chimiques (antitartres, biocides) pour protéger les membranes.
- **Osмосe inverse :** L'eau prétraitée est soumise à haute pression à travers des membranes semi-perméables qui retiennent les sels et les contaminants.
- **Post-traitement :** L'eau dessalinisée est reminéralisée (ajout de calcium et magnésium) pour répondre aux normes de potabilité.
- **Rejet de la saumure :** La solution concentrée en sels est rejetée en mer à travers un système de diffusion contrôlé, conformément aux normes environnementales.

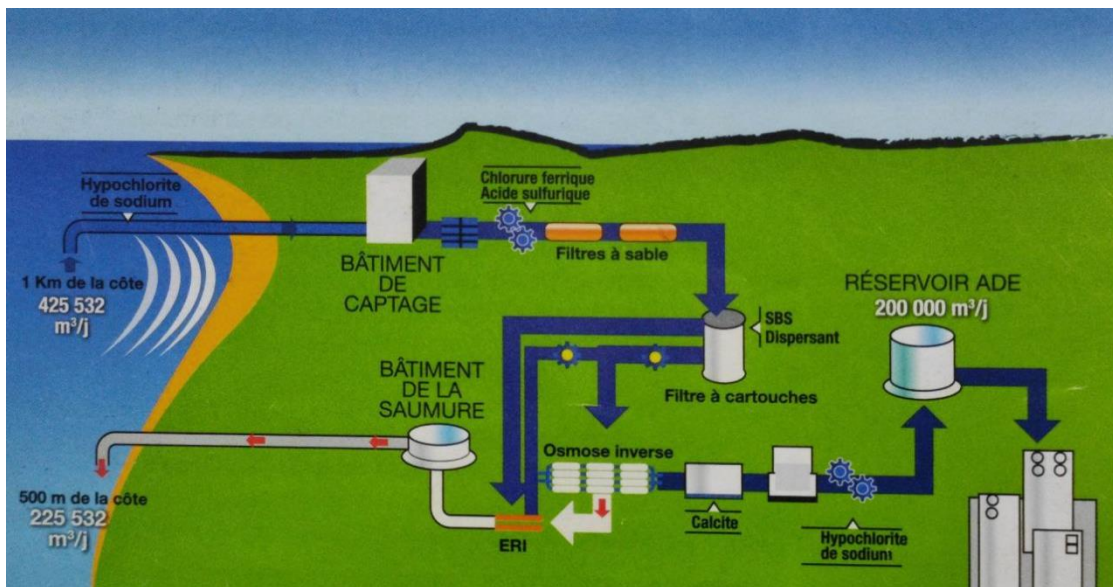


Figure 16 : Processus de dessalement de la SDEM de Beni SAF



Figure 17 : Image satellite de la station de dessalement de Beni Saf (Yousfi, 2024)

9.5 Analyse des impacts environnementaux

Les impacts environnementaux de la station concernent principalement:

La consommation d'énergie : L'osmose inverse est énergivore, ce qui engendre une empreinte carbone non négligeable.

Le rejet de saumure : Il peut altérer l'écosystème marin s'il n'est pas dilué et dispersé correctement.

L'utilisation de produits chimiques : Ces produits, s'ils ne sont pas maîtrisés, peuvent contaminer l'environnement.

Les émissions atmosphériques indirectes : Résultant de la production d'électricité nécessaire au fonctionnement de l'installation.

Une attention particulière est accordée aux mécanismes de surveillance environnementale mis en place par l'entreprise pour réduire ces impacts, notamment à travers :

- Un système de contrôle continu de la qualité de l'eau rejetée.
- Des audits environnementaux périodiques.
- Des actions de sensibilisation du personnel.

9.6 Synthèse de l'Audit Environnemental de la Station de Dessalement BWC (2017)

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné les résultats de l'audit environnemental réalisé en mai 2017 au sein de la Beni Saf Water Company SPA. Cet audit constitue un instrument clé de vérification de la conformité réglementaire et de l'efficacité du système de

management environnemental (SME) en place, notamment vis-à-vis de la norme ISO 14001 : 2015.

9.6.1 Principaux axes évalués

Gestion des déchets et des produits dangereux (stockage, étiquetage, traçabilité)

Contrôle des rejets liquides et conformité avec la réglementation algérienne (décret exécutif n°06-141).

Risques liés aux produits chimiques et dispositifs de prévention.

Organisation interne du SME (revues environnementales, suivi des indicateurs).

9.6.2 Constats positifs

Présence d'une politique environnementale claire et diffusée,

Maîtrise acceptable des flux de déchets industriels,

Mise en place de plans de prévention et de formation du personnel.

9.6.3 Axes d'amélioration identifiés

Besoin de renforcer la traçabilité documentaire sur certains aspects des rejets,

Absence d'une étude d'impact actualisée sur la dispersion de la saumure rejetée en mer,

Nécessité de systématiser le suivi analytique des paramètres physico-chimiques dans les effluents.

En somme, l'audit conclut à une conformité globale de la station avec les exigences environnementales en vigueur, tout en recommandant des actions correctives ciblées pour optimiser davantage la gestion des risques écologiques.

9.7 Analyse Critique Approfondie du Bilan Carbone 2023–Beni Saf Water Company SPA

Le bilan carbone réalisé par la Beni Saf Water Company (BWC) en 2023 constitue un acte volontaire de responsabilité environnementale, dans un contexte algérien où la réglementation sur les gaz à effet de serre (GES) demeure encore embryonnaire. Bien que ce diagnostic s'aligne sur les standards internationaux notamment le GHG Protocol et la norme ISO 14064, une lecture critique s'impose afin d'en dégager les forces, les limites et les perspectives.

9.7.1 Conformité aux normes internationales : une base solide

Le choix de s'appuyer sur le **GHG Protocole**, référence mondiale en matière de comptabilisation des GES, garantit la rigueur méthodologique du bilan. L'approche adoptée par BWC respecte :

- Classification par Scopes 1, 2 et 3,
- Utilisation de facteurs d'émission reconnus (GIEC, IFI),

- Périmètre organisationnel bien défini incluant les sites d'exploitation et les activités indirectes majeures.

En comparaison avec les exigences de la norme **ISO 14064**, le rapport de BWC satisfait largement les critères de qualité des données, de traçabilité, et de transparence. Il s'agit donc d'un **travail méthodologique conforme aux meilleures pratiques internationales**, ce qui reste rare à l'échelle nationale.

9.7.2 Diagnostic critique des résultats

L'analyse des résultats met en lumière un **déséquilibre important entre les types d'émissions** :

- **Scope 1 (émissions directes)** : Très faibles (0,05 %) – ce qui témoigne d'un bon contrôle des émissions sur site.
- **Scope 2 (électricité consommée)** : Représente près de **78 % des émissions totales**, ce qui révèle une **forte dépendance au réseau électrique national**, majoritairement alimenté par des sources fossiles.
- **Scope 3 (émissions indirectes de la chaîne de valeur)** : Assez élevé (près de 22 %), ce qui démontre une prise en compte élargie, bien que toutes les catégories n'aient pas encore été intégrées.

9.7.3 Comparaison internationale (Benchmark)

En comparaison avec des stations de dessalement similaires à l'étranger :

- En **Australie** (station de Perth), des installations photovoltaïques couvrent plus de 25 % des besoins, avec une réduction du Scope 2 à près de 50 %.
- À **Beni Saf**, le Scope 2 est plus élevé car **aucune part significative d'énergie renouvelable** n'est encore intégrée.

Ainsi, bien que la BWC respecte les normes internationales, elle reste confrontée à une **dépendance énergétique fossile qui augmente son empreinte carbone**.

9.7.4 Axes d'amélioration concrets

Pour se rapprocher des performances internationales, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

- **Transition énergétique** : intégrer progressivement l'énergie solaire (notamment pour les besoins non critiques) afin de réduire le Scope 2.
- **Optimisation technologique** : continuer l'utilisation de systèmes de récupération d'énergie (ERD) de haute efficacité, observés lors de notre visite technique.
- **Extension du Scope 3** : inclure plus de catégories, comme la fin de vie des équipements ou les déplacements des fournisseurs.
- **Indicateurs de performance** : introduire des ratios d'émissions par m³ d'eau produite pour suivre l'évolution annuelle de l'intensité carbone.

En somme, le bilan carbone de BWC est **un exemple remarquable de bonne gouvernance environnementale** dans le contexte algérien. Il montre que l'entreprise ne se contente pas d'appliquer les normes, mais cherche activement à s'évaluer et à s'améliorer. Néanmoins, le **poids très important du Scope 2** constitue le principal levier stratégique pour une transition vers un modèle bas-carbone. L'intégration progressive **des énergies renouvelables** et le suivi de **l'impact carbone** par unité de production sont les clés d'un avenir plus durable pour cette installation d'envergure.

9. 8 Système de Management Intégré et Certifications ISO de Beni Saf Water Company SPA

Lors de notre stage au sein de l'entreprise Beni Saf Water Company SPA, une installation de dessalement d'eau de mer, nous avons eu l'occasion d'observer un affichage mural de plusieurs documents essentiels attestant de l'engagement de l'entreprise envers l'excellence opérationnelle et la conformité aux standards internationaux. Ces documents constituent le fondement de leur Système de Management Intégré (SMI).

Ces certifications, délivrées par TÜV Rheinland, une autorité reconnue mondialement en matière de certification et d'inspection, ne sont pas de simples labels, mais la preuve tangible d'une démarche structurée visant l'amélioration continue dans des domaines clés :

- **Certification ISO 9001: 2015 – Système de Management de la Qualité (SMQ)**

Importance : Cette norme est la référence internationale pour le management de la qualité. Sa certification atteste que Beni Saf Water Company SPA a mis en place un système robuste pour garantir la satisfaction de ses clients et la conformité de ses produits et services (ici, l'eau potable dessalée) aux exigences spécifiées. Elle assure une approche centrée sur le client, l'amélioration continue des processus et une gestion efficace des ressources, conduisant à une production d'eau de qualité constante et fiable.

- **Certification ISO 14001: 2015 – Système de Management Environnemental (SME)**

L'ISO 14001 démontre l'engagement de l'entreprise envers la protection de l'environnement et la prévention de la pollution. Pour une usine de dessalement, cela signifie une gestion rigoureuse des impacts environnementaux liés aux opérations (rejets, consommation d'énergie, etc.), une utilisation optimisée des ressources naturelles et une conformité aux réglementations environnementales. C'est un gage de responsabilité écologique et de durabilité.

- **Certification ISO 45001: 2018 – Système de Management de la Santé et Sécurité au Travail (SMSST)**

Cette norme est cruciale pour la protection des employés et des parties prenantes. L'obtention de l'ISO 45001 signifie que Beni Saf Water Company SPA a mis en œuvre des processus pour identifier et évaluer les risques en matière de santé et de sécurité au travail, prévenir les accidents et les maladies professionnelles, et améliorer constamment ses performances en SST. Elle témoigne d'un environnement de travail sûr et sain, essentiel pour le bien-être des travailleurs. L'annexe au certificat fournit des détails sur la portée de cette certification à travers les différents sites de l'entreprise.

- **Certification ISO 50001: 2018 – Système de Management de l'Énergie (SMÉ)**

Importance: Dans un secteur énergivore comme le dessalement d'eau de mer par osmose inverse, l'ISO 50001 est d'une importance capitale. Elle permet à l'entreprise d'établir des systèmes et des processus nécessaires pour améliorer ses performances énergétiques, y compris l'efficacité énergétique, l'utilisation et la consommation d'énergie. Cette certification contribue à la réduction des coûts opérationnels et à la diminution de l'empreinte carbone, s'inscrivant ainsi dans une démarche de développement durable.

Ces certifications, délivrées par **TÜV Rheinland**, un organisme international indépendant spécialisé dans l'audit, la certification et la sécurité technique, confèrent à la station une reconnaissance officielle de sa conformité aux standards internationaux. Elles s'inscrivent dans le cadre d'une **politique QSEÉ (Qualité, Sécurité, Environnement et Énergie)** rigoureuse, qui reflète les engagements stratégiques de la direction en matière de performance globale, de prévention des risques, de protection de l'environnement et d'efficacité énergétique.

En complément de ces certifications, une Politique Qualité, Sécurité, Environnement & Énergie est également affichée. Ce document stratégique formalise les engagements de la direction de Beni Saf Water Company SPA et définit les orientations générales et les objectifs en matière de management intégré. Il met en lumière les axes d'amélioration continue, tels que le renforcement de l'orientation client, l'amélioration continue du système de management, la procuration de conditions de travail sûres et saines, et l'assurance de la protection de l'environnement

En somme, ces certifications et la politique associée démontrent que Beni Saf Water Company SPA ne se contente pas de produire de l'eau potable, mais le fait en respectant les normes les plus élevées en termes de qualité, de responsabilité environnementale, de sécurité au travail et d'efficacité énergétique. Cette approche intégrée est un atout majeur pour la performance, la réputation et la durabilité de l'entreprise.

9.9 Évaluation hydrodynamique et dispersion environnementale des rejets de saumures

La station de dessalement de Béni Saf présente un débit journalier de rejet de saumure particulièrement élevé, estimé à 225 532 m³/j. Ce volume substantiel de rejet de saumure issu du procédé d'osmose inverse soulève des préoccupations légitimes quant à son impact potentiel sur le milieu marin récepteur. Toutefois, l'analyse des images satellitaires à haute résolution (Google Earth, acquisition du 06/07/2023) n'a révélé aucun panache de dispersion visible, contrairement aux stations d'El Hamma, de Ténès et de Honaïne, où les signatures optiques des effluents hypersalins sont clairement identifiables.

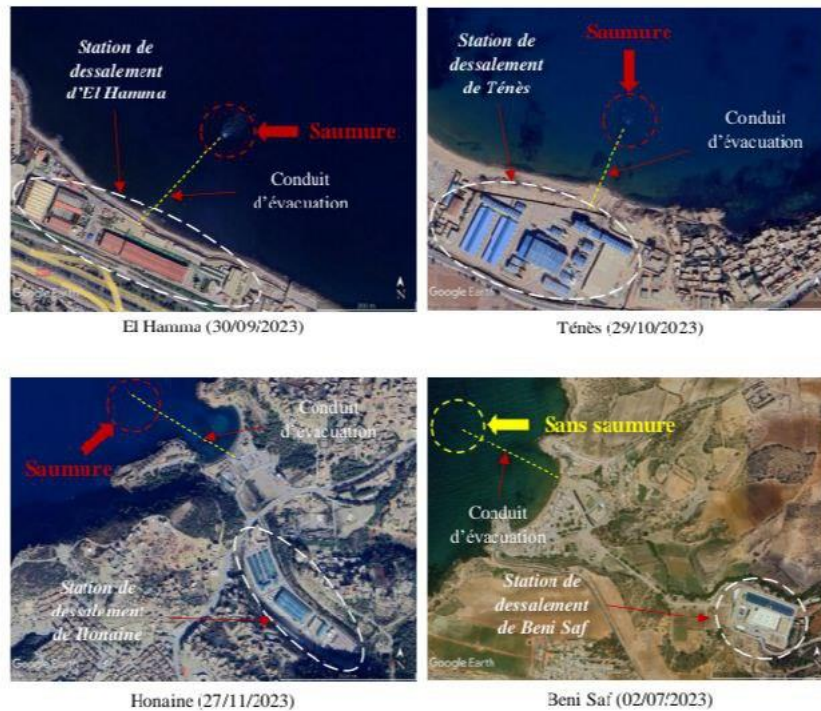


Figure 18 : Comparaison visuelle des rejets hypersalins de quatre stations de dessalement en Algérie à partir d'imagerie satellite (Yousfi, 2023)

L'absence de trace visuelle du rejet dans le cas de Béni Saf suggère plusieurs hypothèses techniques et environnementales:

- Le point de rejet terminal pourrait être implanté à une distance importante du littoral, potentiellement au-delà des 500 mètres, dans une zone bathymétrique favorable à la dispersion tridimensionnelle de la saumure hypersalin.
- Une stratification thermique locale conjuguée à une hydrodynamique côtière active (courants, houle, turbulence de fond) pourrait permettre une dilution horizontale et verticale efficace, réduisant ainsi la densité apparente du panache en surface.
- L'absence de données techniques précises sur la longueur exacte du pipeline d'évacuation, la profondeur de l'émissaire, ainsi que la configuration du diffuseur terminal, constitue une limite méthodologique majeure à toute interprétation concluante.

En revanche, dans les stations où les panaches hypersalins sont nettement visibles, il est plausible que la proximité du point de rejet avec la zone intertidale, ainsi que des conditions de stratification faibles ou nulles, entravent la dispersion adéquate de la saumure, provoquant une accumulation locale à forte salinité.

PARTIE IV
RESULTATS, DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE 10
RESULTATS ET DISCUSSION

10.1 Analyse de l’empreinte carbone de la station de dessalement de Béni Saf

10.1.1 Présentation du résultat global

L'analyse de l'empreinte carbone annuelle de la station de dessalement exploitée par la Béni Saf Water Company SPA (site de Chatt El Hilal) a permis d'estimer une valeur moyenne de 2,08 kg équivalent CO₂ par mètre cube d'eau produite (kg éq CO₂/m³) en 2024. Ce chiffre résulte d'un calcul basé sur la norme ISO 14064, appuyé par les facteurs d'émission de l'ADEME, et fondé sur les données réelles d'exploitation fournies par l'entreprise.

Cinq grandes catégories d'activités ont été rigoureusement prises en compte dans le périmètre d'analyse :

- L'énergie électrique consommée (pompes haute pression, membranes d'osmose inverse, systèmes de récupération...).
- Les produits chimiques (prétraitement, nettoyage, reminéralisation).
- Les matériaux et équipements techniques (construction, remplacement de membranes, pompes, etc.).
- Les déchets générés (emballages, résidus solides).
- Le transport (du personnel et des intrants).

Le résultat global révèle une prédominance très marquée de la consommation énergétique, qui représente à elle seule 1,72 kg éq CO₂/m³, soit près de 83 % de l'empreinte totale. Les produits chimiques contribuent à hauteur de 0,167 kg éq CO₂/m³ (8,04 %), suivis des matériaux (6,64 %) et enfin du transport et des déchets (2,4 % combinés).

Ce profil d'émissions, synthétisé dans la Figure 17 et la Table 5, montre clairement que l'électricité constitue le principal levier de réduction possible. Le recours massif au gaz naturel dans le mix énergétique algérien explique en grande partie cette intensité carbone.

Table 6: Répartition des émissions de CO₂eq par catégorie (KgCO₂eq/m³)

Source d'émission	Émission (KgCO ₂ eq/m ³)	Pourcentage (%)
Énergie	1,720	82,91
Produits chimiques	0,167	8,04
Matériaux	0,138	6,64
Transport et déchets	≈0,050	≈2,4

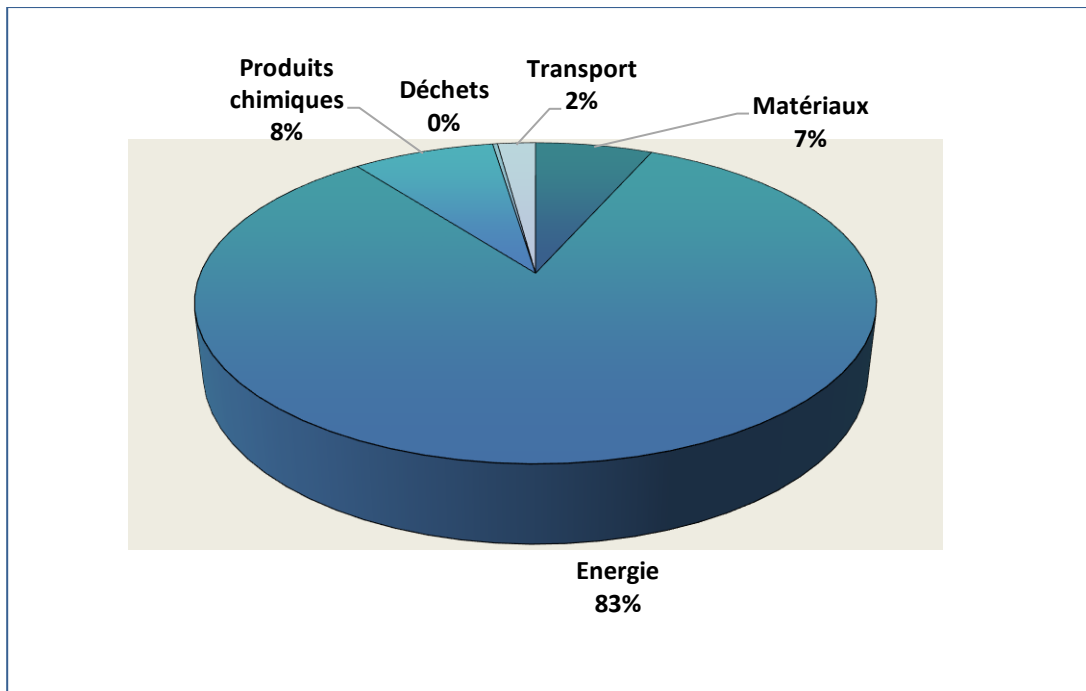


Figure 19: Répartition des émissions de CO₂eq par catégorie (KgCO₂eq/m³)

10.1.2 Analyse des contributions par source d'émission

L'analyse détaillée des postes d'émission confirme que l'énergie électrique est la principale source d'impact environnemental, avec une contribution de 1,72 kg éq CO₂/m³, correspondant à plus de deux tiers de l'empreinte globale. Cette situation s'explique par :

- L'intensité énergétique propre au procédé d'osmose inverse (RO),
- La dépendance quasi-totale au gaz naturel dans le système électrique national,
- L'absence actuelle de recours aux énergies renouvelables.
- Les produits chimiques, deuxième poste d'émission (8 %), génèrent environ 0,167 kg éq CO₂/m³, en raison des quantités importantes d'antiscalants, coagulants et agents de nettoyage utilisés au quotidien. La nature même de ces réactifs – souvent dérivés de la pétrochimie – alourdit leur facteur d'émission.
- Les matériaux et équipements (remplacement de membranes, pièces mécaniques) représentent 6,64 % du total, une part significative surtout en phase de maintenance ou d'investissement.
- Enfin, les émissions liées au transport logistique et à la gestion des déchets (personnel, produits chimiques, emballages) sont plus modestes mais non négligeables, estimées à ≈ 2,4 % de l'empreinte.

10.1.3 Mise en perspective comparative

À l'échelle nationale, les travaux d'Ammitouche et al. (2022) indiquent une fourchette moyenne pour les stations RO alimentées par énergie fossile comprise entre 2,1 et 3,6 kg éq CO₂/m³. La station de Béni Saf se situe donc légèrement en dessous de la borne inférieure,

ce qui suggère une efficacité énergétique maîtrisée (consommation < 3,5 kWh/m³), et une optimisation partielle de l'exploitation (membranes, récupération d'énergie, maintenance).

Sur le plan international, les valeurs varient fortement :

0,4 à 1,0 kg éq CO₂/m³ pour les stations alimentées exclusivement par des énergies renouvelables,

Jusqu'à 6,7 kg éq CO₂/m³ dans les installations fonctionnant avec des combustibles lourds.

Le niveau atteint à Béni Saf place la station dans une zone de performance intermédiaire, compatible avec les installations fossiles optimisées, mais encore loin des standards internationaux bas-carbone (< 1 kg CO₂/m³ visé à l'horizon 2030 par l'Agence Internationale de l'Énergie).

10.1.4 Interprétation critique et facteurs explicatifs

Plusieurs éléments techniques permettent de mieux comprendre la performance atteinte :

- Efficacité énergétique spécifique: La consommation inférieure à 3,5 kWh/m³ laisse penser à la présence de systèmes de récupération d'énergie (ERD) et à une conception hydraulique optimisée, limitant les pertes de charge et améliorant le rendement des pompes.

- Conditions d'exploitation favorables: L'eau d'alimentation de salinité modérée réduit la pression osmotique requise, tandis que la maintenance régulière des membranes permet de maintenir un faible ΔP (différentiel de pression), traduisant une meilleure efficacité globale.

- Limites structurelles persistantes: Le principal frein à l'amélioration reste la dépendance au gaz naturel, qui empêche toute convergence vers une trajectoire bas-carbone durable, sauf changement énergétique radical.

10.1.5 Perspectives d'amélioration environnementale

Pour inscrire la station dans une dynamique alignée avec les objectifs climatiques internationaux, plusieurs leviers d'action sont identifiés :

- Transition énergétique: Substituer progressivement le gaz naturel par des sources renouvelables, telles que le photovoltaïque (impact estimé à 0,25 kg éq CO₂/m³) ou l'éolien (0,11 kg éq CO₂/m³).

- Réduction de l'intensité chimique: Adapter les dosages, remplacer les réactifs à fort impact carbone, introduire des alternatives écologiques.

- Optimisation logistique: Réduire les distances de transport (livraison locale, groupée), mutualiser les flux.

- Approche circulaire: Mettre en place des systèmes de valorisation des déchets, prolonger la durée de vie des équipements, intégrer l'économie circulaire dans le fonctionnement global.

Objectif stratégique : Ramener l'empreinte sous la barre de 1 kg éq CO₂/m³, seuil recommandé par le PNUE (UNEP) pour des infrastructures hydriques compatibles avec la neutralité carbone à long terme.

10.1.6 Analyse comparative entre le bilan carbone 2023 de l'entreprise et notre estimation 2024

Dans le cadre de cette étude, une comparaison critique a été menée entre les résultats de l’empreinte carbone publiés par la Béni Saf Water Company en 2023, et ceux issus de notre propre estimation pour l’année 2024. Cette confrontation vise à évaluer non seulement l’évolution des émissions, mais également les effets induits par les choix méthodologiques sur les résultats.

Différences méthodologiques structurantes

Le bilan 2023 a été réalisé conformément au **GHG Protocol**, avec une intégration détaillée des **trois Scopes**, couvrant aussi bien les émissions directes (Scope 1), que les émissions indirectes liées à l’électricité (Scope 2) et celles issues de la chaîne de valeur (Scope 3). Ce dernier comprend sept catégories, allant des achats de biens et services aux déplacements des employés et à la gestion des déchets. En revanche, notre calcul pour 2024 repose sur la norme **ISO 14064**, avec une approche fondée sur les postes d’émissions réels (électricité, produits chimiques, équipements, déchets, transport), sans distinction explicite par Scope. Le **Scope 3 y est partiellement intégré**, de manière implicite, et ne fait pas l’objet d’un traitement systémique.

Cette divergence méthodologique constitue un **élément clé d’interprétation**: la valeur de 2,24 kg éq CO₂/m³ en 2023 (GHG Protocol) englobe une large partie des émissions "amont", alors que notre valeur de 2,08 kg éq CO₂/m³ en 2024 se concentre essentiellement sur les émissions opérationnelles.

- **Comparaison quantitative des résultats**

Table 7 : Comparaison quantitative des résultats

Année	Source	Méthodologie	Émissions totales	Intensité carbone	Scopes pris en compte	Commentaires
2023	Beni Saf Water (officiel)	GHG Protocol (Scopes 1, 2, 3 complets)	189 486,96 tCO₂e	≈ 2,24 kg éq CO₂/m³ (selon votre note)	Scopes 1, 2, 3 (7 catégories Scope 3)	Données très complètes mais partiellement estimées (achats en \$)
2024	Calcul par nous	ISO 14064 , ADEME, simplifié, pas de scopes explicites	≈ 124 800 tCO₂e (sur base de 60 Mm ³)	2,08 kg éq CO₂/m³	Scopes implicites (électricité, produits, déchets...)	Calcul plus ciblé, opérationnel, sans traitement détaillé du Scope 3

La **baisse apparente de 7,1 %** de l’intensité carbone peut, à première vue, être interprétée comme un signal d’amélioration environnementale. Toutefois, cette réduction résulte **d’avantage d’un changement de cadre méthodologique que d’une transformation profonde des pratiques industrielles**. En effet, les postes du Scope 3 (en particulier les achats de biens d’équipements, qui représentaient à eux seuls 21 521 tCO₂e en 2023) n’ont pas été intégrés de façon équivalente dans notre modèle 2024.

- **Pertinence des données et incertitudes**

Les données utilisées dans notre étude pour 2024 reposent sur des **valeurs physiques vérifiées** (kWh consommés, quantités de réactifs, volumes produits), ce qui confère à notre

modèle une **forte validité opérationnelle**. À l'inverse, certaines catégories du Scope 3 en 2023 ont été calculées à **partir de données financières exprimées en dollars**, selon des facteurs d'émission monétaires (kg CO₂/k\$), introduisant une **incertitude importante**. Ces incertitudes sont reconnues par l'entreprise elle-même, qui note la qualité des données comme "faible" ou "moyenne" pour plusieurs sous-catégories.

- **Différences méthodologiques majeures**

Table 8: Comparaison méthodologique entre le GHG Protocol (2023) et la méthode adoptée dans cette étude (2024)

Aspect	GHG Protocol (2023)	Notre méthode (2024)
Structure	Approche par Scopes 1–2–3	Approche par postes (énergie, produits, etc.)
Scope 3	Inclut 7 sous-catégories (déchets, achats, déplacements...)	Non traité ou intégré partiellement
Facteurs d'émission	Mixtes internationaux (UK Gov, IFI, ADEME, DEFRA)	Principalement ADEME
Unité de mesure	\$ (achats) → kg CO ₂ /k\$	Données physiques directes (kWh, m ³)

- **Implications pour l'interprétation environnementale**

Sur le plan environnemental, l'interprétation des tendances doit être nuancée. Si des améliorations opérationnelles ont probablement eu lieu en 2024 (ex : meilleure efficacité énergétique, maintenance des membranes, rationalisation des produits chimiques), elles ne suffisent pas à expliquer à elles seules la baisse du facteur carbone. L'écart majeur s'explique surtout par le périmètre d'analyse.

Pour une comparaison robuste et scientifiquement pertinente, il conviendrait soit :

- d'harmoniser les périmètres méthodologiques (en intégrant ou excluant Scope 3 des deux côtés),
- soit de présenter les résultats par **niveau de contrôle** (émissions directes, indirectes, amont), selon la logique du "**contrôle opérationnel**".

Conclusion

Cette analyse comparative met en évidence les **limites des comparaisons inter-annuelles lorsque les méthodes diffèrent**. Elle souligne la nécessité, dans le cadre de toute stratégie de décarbonation, de fonder les décisions sur des données transparentes, cohérentes et vérifiables. Elle rappelle aussi l'importance de structurer tout futur suivi carbone autour d'une méthodologie unifiée, intégrant progressivement les postes indirects du Scope 3 dans une logique d'amélioration continue.

10.1.7 Discussion scientifique comparée et positionnement technologique

Les performances environnementales observées à la station de dessalement de Béni Saf, avec une empreinte moyenne de **2,08 kg éq CO₂/m³**, reflètent une optimisation technique locale notable. Toutefois, cette valeur reste supérieure aux niveaux atteints par certaines stations européennes et australiennes ayant déjà engagé une transition vers des systèmes à faible émission.

Par exemple, en **Espagne**, les installations de dessalement situées dans la région d'Alicante et exploitées avec une alimentation électrique partiellement issue de sources renouvelables, atteignent des valeurs de **1,2 à 1,6 kg éq CO₂/m³** (González et al, 2021). De même, certaines stations en **Australie méridionale**, comme celle d'Adélaïde, ont réussi à réduire leur empreinte carbone jusqu'à **1,0–1,4 kg éq CO₂/m³**, grâce à une combinaison de technologies à haute efficacité énergétique (ERD, membranes basse pression) et à l'intégration du solaire photovoltaïque dans le mix énergétique (CSIRO, 2020).

Table 9: Estimations moyennes nationales de l'empreinte carbone des stations de dessalement selon la technologie utilisée et la source d'énergie dominante (Jones, 2019)

Pays / Région	Technologie utilisée	Empreinte carbone (kg éq. CO ₂ /m ³)	Source d'énergie principale
Arabie Saoudite	MSF / MED	3,0 – 4,5	Gaz / pétrole (thermique)
Emirates arabes unis	RO + hybride	1,0 – 2,2	Électrique (gaz naturel)
Espagne	RO	0,5 – 1,1	Électrique (mix, part renouvelable)
Chili	RO	0,3 – 0,6	Hydroélectricité / solaire
Algérie (valeur observée)	RO	2,08	Principalement gaz naturel

Ces données montrent que l'empreinte carbone de la station analysée est presque équivalente à celle d'unités thermiques traditionnelles du Golfe (alors qu'elle utilise un procédé RO). Elle est deux à quatre fois plus élevée que celle des unités modernes à osmose inverse intégrant des améliorations énergétiques ou des sources renouvelables (Espagne, Chili).

Les raisons possibles de cet écart sont :

- Mix énergétique fossile (principalement du gaz en Algérie).
- Consommation électrique spécifique élevée (plus de 4 kWh/m³).
- Absence de récupération d'énergie ou de technologies de pression optimisée.
- Vieillesse des installations ou surdimensionnement des pompes.

Conclusion comparative

À l'échelle internationale, une empreinte carbone de 2,08 kg éq.CO₂/m³ positionne la station analysée parmi les installations les plus émettrices au sein du groupe des stations RO. Ce constat souligne la nécessité d'intégrer des mesures de transition énergétique, telles que l'utilisation partielle de sources renouvelables ou la modernisation des systèmes de pompage et de récupération d'énergie, afin de se rapprocher des standards environnementaux des pays leaders du dessalement durable.

En comparaison, la station de Béni Saf se situe dans une **plage intermédiaire supérieure** : plus performante que la moyenne nationale algérienne, mais encore éloignée des **standards bas-carbone internationaux** (<1 kg éq CO₂/m³) promus par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).

Ce positionnement souligne une **efficacité technique réelle**, mais aussi la nécessité stratégique d'un virage énergétique. Une intégration progressive de sources renouvelables pourrait permettre à la station d'atteindre un niveau compétitif à l'échelle internationale, tout en respectant les engagements climatiques nationaux et multilatéraux.

Par ailleurs, pour un positionnement technologique global, il convient d'enrichir l'analyse par d'autres indicateurs de durabilité :

- **Coût énergétique unitaire** (€/m³) comparé aux Benchmarks OCDE
- **Durée de vie moyenne des équipements critiques** (pompes, membranes)
- **Paramètres physico-chimiques de l'eau d'alimentation** (salinité, température), qui influencent directement la pression de fonctionnement et la consommation électrique

Enfin, une **approche par modélisation de cycle de vie (ACV)** complète permettrait d'identifier plus précisément les leviers d'amélioration, en tenant compte de l'ensemble du cycle (construction, exploitation, fin de vie).

10.2 Résultats et interprétation–Questionnaire professionnel

10.2.1 Cadre de l'enquête

Le questionnaire destiné aux professionnels a été administré à l'occasion de la Conférence CIAMEL-2025, intitulée « Interactions anthropiques avec la mer et le littoral : perspectives scientifiques et stratégiques », organisée au sein de l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL).

Cette approche ciblée a permis de recueillir les perceptions d'un échantillon qualifié, composé principalement de personnels techniques, d'ingénieurs, et de responsables du secteur, dont plusieurs employés directement impliqués dans le fonctionnement de la station de dessalement de Béni Saf. Il convient de souligner que les employés de la station de Béni Saf se sont montrés particulièrement coopératifs et transparents dans leurs réponses, ce qui a grandement facilité la collecte des données.

En revanche, certains participants présents à la conférence ont exprimé des réticences à répondre au questionnaire, invoquant des contraintes de confidentialité. Quelques-uns ont notamment indiqué que leur hiérarchie ne leur avait pas autorisé à fournir des informations, ce qui témoigne de la sensibilité du sujet dans les milieux professionnels concernés. Cela met en lumière la nécessité de développer un cadre plus sûr et confidentiel pour encourager une expression libre et complète lors des futures enquêtes environnementales.

10.2.2 Profil des répondants

L'échantillon interrogé est composé majoritairement de techniciens d'exploitation, d'ingénieurs procédés et de cadres techniques actifs dans le domaine du dessalement. La

collecte a été effectuée entre mars et avril 2025, à l’occasion de la conférence CIAMEL, ce qui a permis un accès ciblé à des professionnels qualifiés.

Plus de 90% des répondants disposent de plus de cinq années d’expérience directe dans la gestion ou la maintenance des unités de dessalement, un critère essentiel pour assurer la crédibilité des réponses fournies.

Cette sélection volontairement orientée vers des opérateurs de terrain visait à capter des retours ancrés dans la réalité technique quotidienne, plutôt que des perceptions théoriques ou administratives.

Analyse critique : Ce profil expert confère à l’étude une forte validité technique, mais introduit également un biais potentiel : les répondants appartiennent majoritairement à la sphère opérationnelle, ce qui peut conduire à une minimisation subjective de certains impacts environnementaux ou à une surestimation de la conformité. Il conviendrait, dans des travaux futurs, d’élargir l’échantillon aux acteurs institutionnels, ONG environnementales, et experts indépendants pour une lecture plus équilibrée.

10.2.3 Perception de la conformité environnementale

Concernant la conformité aux normes environnementales, les avis varient. Une majorité des répondants considère que les stations « respectent normalement » ou « partiellement » les exigences environnementales. Des réponses telles que « ISO 14001 » ou « cela dépend de l’exploitation » traduisent une connaissance technique des référentiels, mais aussi une vision nuancée de la réalité du terrain.

Pourquoi cette perception est partagée ?

- Application hétérogène des règles selon les sites.
- Manque de contrôles indépendants systématiques.
- Priorité à la production en période de crise hydrique.

Analyse scientifique	Solutions proposées
Il existe un « gap de conformité » entre les règles formelles (certification ISO) et leur mise en œuvre opérationnelle. Cela reflète une conformité déclarative plutôt que vérifiée. La perception de conformité « partielle » signifie que la conformité affichée ne reflète pas toujours la conformité réelle dans les pratiques.	<ul style="list-style-type: none">● Mettre en place des audits environnementaux externes réguliers.● Introduire des indicateurs de performance environnementale (IPE).● Créer des commissions locales de suivi environnemental composées de parties prenantes diverses.

10.2.4 Systèmes de suivi et types de rejets

Tous les participants déclarent que la station dans laquelle ils travaillent dispose d’un système de suivi environnemental : monitoring des rejets, suivi de la qualité de l’eau, mesures des émissions. Les rejets de saumures hypersalées sont systématiquement mentionnés comme les principaux déchets liquides, suivis par des résidus solides et des boues.

Analyse critique	Solutions/Recommandation
<p>L'uniformité des réponses suggère l'existence d'un système de contrôle formel dans les stations. Cependant, cela ne garantit pas l'efficacité ni la rigueur de ces dispositifs. Le fait que les rejets soient bien identifiés montre une sensibilisation accrue, mais le manque de précision sur les méthodes utilisées, la fréquence des analyses ou la transparence des résultats reste problématique.</p> <p>La collecte de données environnementales sans exploitation concrète ou sans partage avec les autorités/institutions publiques limite son utilité.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Digitalisation complète du monitoring (capteurs + tableaux de bord en temps réel). • Publication ouverte des résultats environnementaux. • Intégration de bioindicateurs (ex: santé des herbiers marins) pour un suivi plus écosystémique.

10.2.5 Impact environnemental perçu des rejets

40 % des répondants estiment que les rejets sont nocifs, 40 % qu'ils sont dilués sans danger, et 20 % pensent que cela dépend du mode et lieu de rejet.

Analyse critique	Solutions
<p>Cette division d'opinions met en lumière une incertitude technique parmi les professionnels eux-mêmes. Cela suggère une absence d'études localisées ou de protocoles partagés sur les effets écotoxicologiques des saumures. Elle reflète également un manque d'harmonisation dans les pratiques de rejet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Réaliser des études scientifiques localisées (impact benthique, salinité). - Standardiser les dispositifs de rejet (profondeur, débit, zone). - Former les opérateurs sur les effets écosystémiques des saumures.

10.2.6 Évaluation de l'empreinte carbone

Tous les répondants affirment que leur station évalue son empreinte carbone. L'énergie électrique est unanimement identifiée comme source principale, suivie par le transport.

Analyse critique	Recommandations
<p>Cette réponse confirme la cohérence entre la perception des professionnels et les résultats de l'analyse ACV (2,08 kg CO₂-éq/m³). Cela démontre une sensibilisation au rôle de l'énergie dans le bilan carbone. Cependant, la réponse ne permet pas de juger de la fréquence, méthode ou exactitude des évaluations.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Standardiser les méthodes de calcul (ISO 14064, GHG Protocol). - Partager les résultats avec les parties prenantes.

10.2.7 Solutions proposées pour réduire l'empreinte carbone

- Les professionnels proposent des solutions variées :
- Recours aux énergies renouvelables (solaire, éolien).
- Optimisation des équipements (ERD, VSD).
- Maintenance renforcée.

Analyse critique	Propositions concrètes
Les réponses sont techniquement justes et alignées avec les bonnes pratiques internationales. Cela reflète une bonne compréhension des leviers d'action. Toutefois, aucune priorité ni faisabilité n'est évoquée.	Les réponses sont techniquement justes et alignées avec les bonnes pratiques internationales. Cela reflète une bonne compréhension des leviers d'action. Toutefois, aucune priorité ni faisabilité n'est évoquée.

10.2.8 Défis futurs et priorités stratégiques

Les défis identifiés incluent la consommation énergétique, les rejets, l'empreinte carbone et la recherche et développement . Les priorités mentionnées: formation, traitement des rejets, normes plus strictes.

- **Analyse critique:** La convergence des réponses montre une vision structurée des enjeux. Mais cela soulève la question de la capacité institutionnelle à les mettre en œuvre. Les coûts et les blocages réglementaires restent des barrières implicites.
- **Pistes d'action:**
 - Élaborer une stratégie nationale de transition énergétique pour le dessalement.
 - Renforcer la coopération entre stations, ministères, universités.
 - Instaurer des incitations fiscales pour les projets innovants.

Analyse critique	Pistes d'action
La convergence des réponses montre une vision structurée des enjeux. Mais cela soulève la question de la capacité institutionnelle à les mettre en œuvre. Les coûts et les blocages réglementaires restent des barrières implicites.	<ul style="list-style-type: none"> - Élaborer une stratégie nationale de transition énergétique pour le dessalement. - Renforcer la coopération entre stations, ministères, universités. - Instaurer des incitations fiscales pour les projets innovants.

10.2.9 Limites et remarques libres

Les obstacles évoqués: manque d'expertise, coûts élevés, absence de stratégie cohérente.

- **Interprétation critique :** Ces remarques confirment les lacunes du cadre national. Elles soulignent le besoin de gouvernance claire, de soutien financier et de capital humain formé.

10.2.10 Conclusion de la section

L'analyse des réponses professionnelles révèle une prise de conscience environnementale affirmée, fondée sur une expérience de terrain concrète. La station de Béni Saf se distingue par une relative maîtrise technique mais reste confrontée à des enjeux structurels. La convergence des perceptions professionnelles avec les résultats quantitatifs de l'ACV confirme la pertinence des pistes d'amélioration proposées.

Il est désormais impératif de traduire cette expertise en politiques environnementales cohérentes, intégrant innovation technologique, formation, régulation, et surtout gouvernance multi-acteurs.

10.3 Analyse du questionnaire grand public

Dans le cadre de ce travail de recherche, un questionnaire a été conçu et diffusé afin de mieux comprendre la perception du grand public algérien vis-à-vis du dessalement de l'eau de mer. L'objectif principal de cette enquête est d'évaluer le niveau de connaissance, la sensibilité environnementale, ainsi que le degré d'acceptabilité sociale autour de cette technologie, en particulier dans le contexte algérien marqué par une pression hydrique croissante.

Un total de 228 personnes a répondu à ce sondage. Les participants sont majoritairement jeunes, étudiants, et dotés d'un niveau d'éducation universitaire. Ces profils offrent une bonne représentativité des catégories de population susceptibles d'être à la fois informées et concernées par les enjeux liés à la gestion durable de l'eau.

10.3.1 Interprétation détaillée des résultats du questionnaire

Pourquoi ce public a été ciblé

Ce choix est motivé par plusieurs raisons :

- Ce groupe représente une part importante de la population urbaine instruite, souvent en interaction avec les débats publics et académiques.
- Les jeunes constituent une génération clé pour les transitions écologiques et hydriques futures.
- Le questionnaire a été diffusé dans des milieux universitaires et sur des plateformes numériques, facilement accessibles à cette tranche d'âge.

Comment cela influence les résultats

Leur niveau d'instruction élevé suggère une meilleure capacité à comprendre des notions complexes comme l'empreinte carbone ou la salinisation marine.

Cependant, l'homogénéité du profil (urbain, instruit) introduit un biais sociologique, en excluant les populations rurales ou faiblement scolarisées.

1. Profil socio-démographiques des répondants

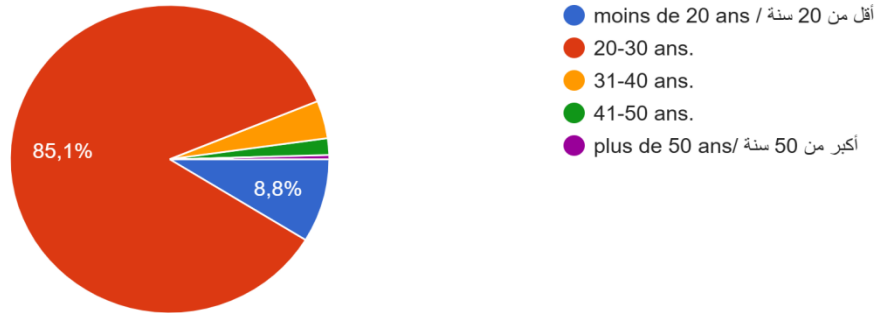
L'échantillon est composé de 228 participants, dont la majorité appartient à la tranche d'âge 20–30 ans. Ce groupe représente une jeunesse active, potentiellement engagée et sensibilisée aux questions environnementales. Ce profil se confirme par la prédominance de répondants universitaires et étudiants, ce qui donne une légitimité au traitement des sujets techniques comme le dessalement, l'empreinte carbone ou les impacts marins.

Interprétation:

Le niveau d'instruction élevé des participants suggère des réponses réfléchies et pertinentes. Cependant, ce profil sociologique relativement homogène (jeunes universitaires) limite la représentativité de l'ensemble de la population algérienne, notamment les populations rurales ou non instruites, qui pourraient avoir une vision différente du dessalement.

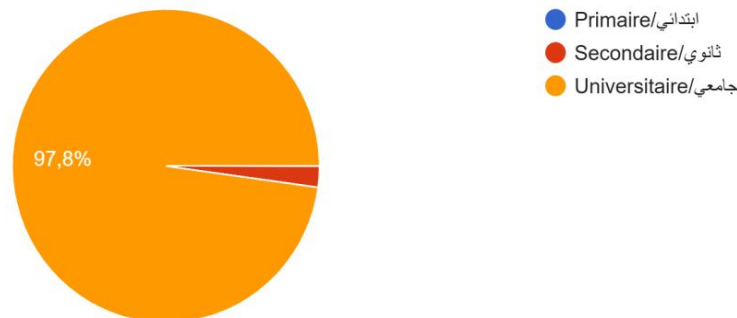
1) Quel est votre age ? ما هو عمرك؟

228 réponses



2) Quel est votre niveau d'éducation ? ما هو مستواك الدراسي؟

228 réponses



3) Quel est votre secteur d'activité ? في أي قطاع تنشط؟

228 réponses



2. Connaissance du dessalement de l'eau de mer

Question posée: « Êtes-vous familier(ère) avec le concept du dessalement ? »

Une large majorité se déclare familière avec le concept de dessalement.

Pourquoi

Le sujet est largement médiatisé dans le contexte algérien marqué par la sécheresse et les coupures d'eau.

L'enseignement supérieur et les réseaux sociaux ont joué un rôle de sensibilisation.

Comment cela affecte l'analyse

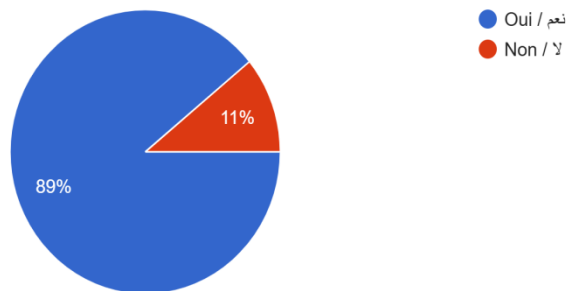
Un public informé est plus à même de formuler des critiques ou des attentes réalistes.

Cette familiarité n'implique pas nécessairement une maîtrise technique, mais une sensibilisation suffisante pour un débat citoyen éclairé.

Interprétation:

Cela témoigne d'une bonne diffusion de l'information sur le dessalement, probablement liée aux discussions médiatiques et académiques dans un contexte de crise hydrique. Le public n'est donc pas ignorant du sujet ; il est apte à formuler des attentes et des critiques constructives.

4) Etes-vous familier(ère) avec le concept du dessalement de l'eau de mer ? / هل أنتم على دراية بمفهوم تحلية مياه البحر؟
228 réponses



3. Perception de la sécurité des stations

Question posée: « Pensez-vous que les stations de dessalement sont suffisamment protégées contre les différents risques ? »

Majorité de réponses « Non » ou « Je ne sais pas ».

Pourquoi cette méfiance

- Les institutions communiquent peu sur les protocoles de sécurité.
- Le citoyen associe les installations industrielles à des risques non maîtrisés.
- Le souvenir d'accidents dans d'autres secteurs peut influencer la perception.

Comment y remédier

- Rendre publics les audits de sécurité et les inspections techniques.
- Organiser des campagnes d'information sur les procédures en place.
- Intégrer la sécurité dans la responsabilité sociétale des entreprises (RSE).

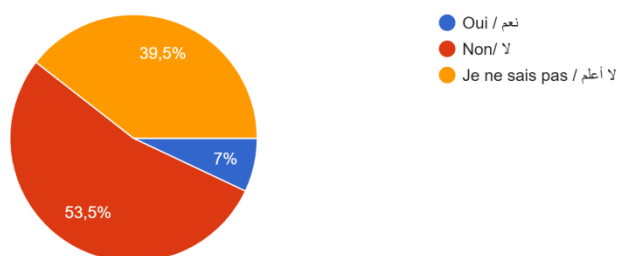
Interprétation:

La population perçoit un manque de protection ou d'informations fiables sur la sécurité des installations. Cela peut concerner:

- les risques industriels (fuites, explosions).
- les risques environnementaux (pollution marine, bruit).
- ou encore les cyber-risques.

Cette perception souligne une absence de transparence institutionnelle ou de communication sur les normes de sécurité appliquées aux infrastructures de dessalement.

1) Pensez-vous que les stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie sont suffisamment protégées contre les différents risques ? هل تعتقد أن محطات... مياه البحر في الجزائر محمية بشكل كاف ضد المخاطر المختلفة ؟
228 réponses



4. Efficacité du dessalement comme solution hydrique

Question posée: « Le dessalement est-il une solution efficace pour les besoins en eau potable ? »

Très grande majorité de « Oui ».

Pourquoi cette confiance

- Le dessalement apparaît comme une solution technique face à l'échec des autres politiques de gestion de l'eau.
- Les réussites perçues dans des pays similaires renforcent cette croyance (ex : Arabie Saoudite, Espagne).

Comment la valoriser

- Communiquer sur les performances réelles (production/jour).
- Mettre en avant les cas de réussite nationale.

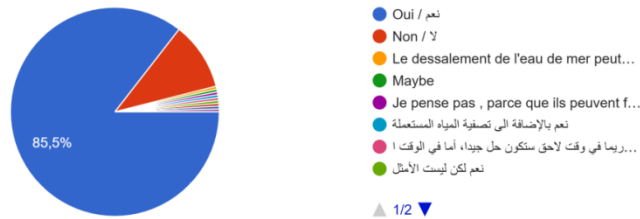
- Associer les citoyens à des visites pédagogiques de stations.

Interprétation:

Le public reconnaît que le dessalement est une réponse nécessaire et efficace au stress hydrique, notamment dans les zones côtières où les ressources en eau douce sont rares.

Cela confirme une acceptabilité sociale forte, surtout si la technologie est perçue comme fiable et maîtrisée.

2) Pensez-vous que le dessalement de l'eau de mer est une solution efficace pour répondre aux besoins en eau potable ? هل تعتقد أن تحلية مياه البحر هي حل جيد لتلبية احتياجات المياه الصالحة للشرب؟
228 réponses



5. Impacts environnementaux des saumures

Question posée: « Les rejets salins ont-ils un impact négatif sur les écosystèmes marins ? »

Majorité de réponses « Oui ».

Pourquoi cette préoccupation ?

- Les citoyens sont de plus en plus exposés à des contenus sur la biodiversité marine.
- Les effets visibles (mousses, odeurs, mortalité de poissons) peuvent influencer la perception.

Comment l'exploiter positivement

Canaliser cette inquiétude vers des revendications constructives: plus de suivi, plus de transparence, plus d'innovation.

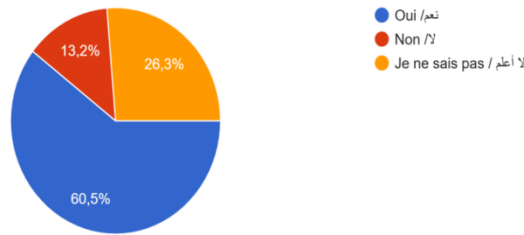
Interprétation:

Les répondants expriment une préoccupation écologique forte face à la salinité accrue dans les zones de rejet. Cela renvoie à:

- la diminution de la biodiversité marine,
- le déséquilibre des habitats côtiers,
- la perturbation des cycles naturels (oxygène, nutriments).

Cette inquiétude est pertinente: des études scientifiques montrent que les saumures à forte concentration affectent les herbiers marins, les invertébrés benthiques et parfois les ressources halieutiques locales.

1) Pensez-vous que les rejets des saumures des stations dessalement de l'eau de mer ont un impact négatif sur les écosystèmes marins ? هل تعتقد أن تصري...ات تحلية مياه البحر له تأثير سلبي على النظم البيئية البحرية؟
228 réponses



6. Impacts économiques des saumures

Question posée: « Les rejets ont-ils un impact sur les activités économiques ? »

Réponses dominées par « pêche », suivie d'« aquaculture ».

Pourquoi ces réponses

Ces activités sont directement dépendantes de la qualité des eaux côtières.

La société reconnaît que l'environnement et l'économie sont liés.

Comment agir

Intégrer les pêcheurs et aquaculteurs dans les études d'impact.

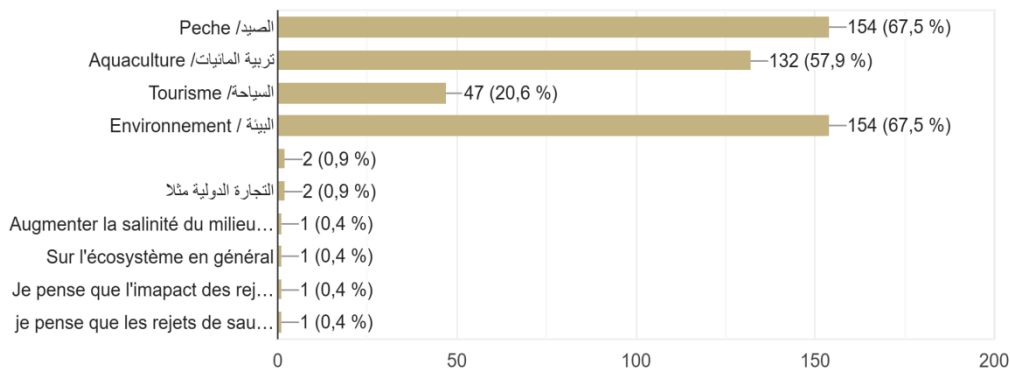
Créer des zones tampons marines autour des diffuseurs.

Interprétation:

Le rejet des saumures est vu comme une menace pour les activités littorales traditionnelles, notamment la pêche artisanale, qui dépend directement de la qualité de l'eau.

Certains évoquent l'impact indirect sur le tourisme ou l'aquaculture, qui nécessitent un environnement marin sain.

2) Pensez-vous que les rejets des saumures des stations de dessalement de l'eau de mer ont un impact négatif sur les activités économiques? هل تعتقد أن ت...ت تحلية مياه البحر له تأثير سلبي على الأنشطة الاقتصادية؟
228 réponses



7. Empreinte carbone des stations

Question posée: « Pensez-vous que les stations ont une empreinte carbone élevée ? »

Majorité de « Oui ».

Pourquoi cette conscience climatique

- Le lien entre énergie fossile et changement climatique est de mieux en mieux compris.
- Les jeunes générations suivent davantage les débats environnementaux mondiaux.

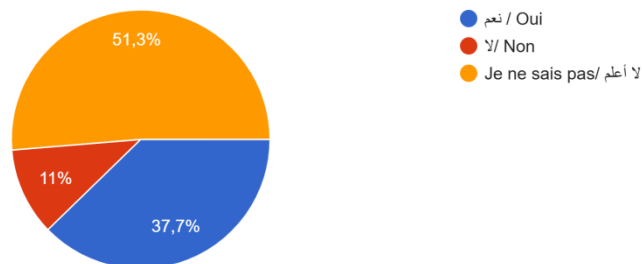
Comment renforcer cet engagement

- Intégrer les données carbone dans la communication publique.
- Valoriser les efforts de réduction d'émissions dans les projets.

Interprétation:

Le public comprend que le dessalement est une procédure énergivore, surtout lorsqu'il est basé sur des sources d'énergie fossile. Cette réponse traduit une conscience écologique importante, et aligne la perception publique avec les préoccupations mondiales liées au changement climatique.

1)Pensez vous que les staions de dessalement de l'eau de mer en Algérie ont une empreinte carbone élevée ? هل تعتقد أن محطات تحلية مياه البحر في الجزائر لها بصمة كربونية مرتفعة؟
228 réponses



8. Solutions proposées pour réduire l'empreinte carbone

Proposition dominante: énergies renouvelables.

Pourquoi cette réponse est logique

Les ENR (solaire, éolien) sont perçues comme propres, accessibles, adaptées au climat algérien.

Comment la mettre en œuvre

Inciter les pouvoirs publics à investir dans le solaire pour alimenter les stations.

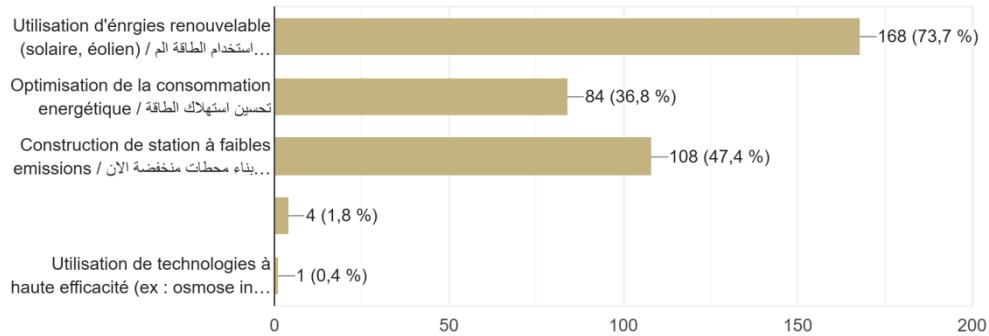
Créer des partenariats public-privé pour développer des stations hybrides (grid + PV).

Interprétation:

Les répondants ne se contentent pas de critiquer : ils proposent des solutions concrètes. Cela démontre une ouverture à l'innovation et un potentiel de soutien citoyen pour des projets de dessalement vert, si ceux-ci sont bien communiqués.

2) Quels moyens pourraient être utilisés pour réduire l'empreinte carbone des stations de dessalement de l'eau de mer ? ماهي الوسائل التي يمكن استخدامها لتقليل البصمة الكربونية لمحطات التحلية ؟

228 réponses



9. Capacité de l'Algérie à investir dans le dessalement vert

Majorité de « Oui ».

Pourquoi cet optimisme

- Le public croit au potentiel national : soleil, compétences, ingénierie locale.
- Il attend des décisions politiques fortes et cohérentes.

Comment répondre à ces attentes

Présenter des feuilles de route claires pour le dessalement vert.

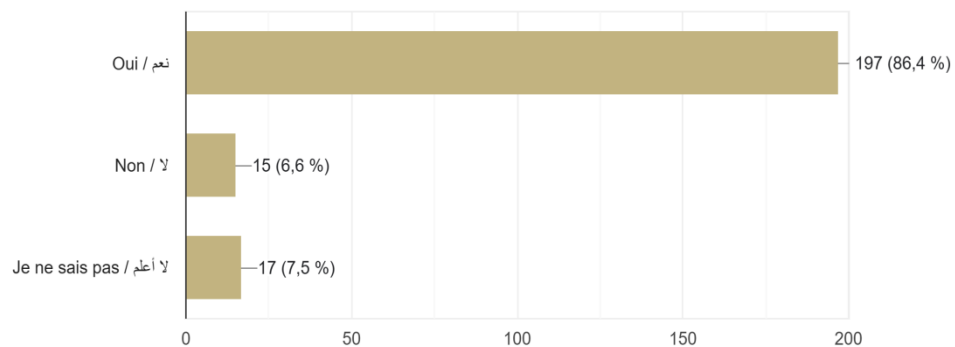
Inclure les citoyens dans l'évaluation des politiques publiques.

Interprétation:

Il existe une confiance dans les capacités nationales, tant au niveau des ressources naturelles (ensoleillement) que des compétences techniques. Cela reflète un optimisme réaliste, mais aussi des attentes claires envers les décideurs pour engager le pays dans des politiques ambitieuses et durables.

3) Pensez-vous que l'Algérie pourrait se permettre d'investir dans des stations de dessalement de l'eau de mer utilisant des énergies renouvelables? هل تعتقد... في محطات تحلية مياه البحر التي تستخدم الطاقات المتجددة؟

228 réponses



10. Connaissance des technologies de valorisation des saumures

Réponses partagées.

Pourquoi cette ignorance partielle

Manque de vulgarisation scientifique sur les procédés.

Peu d'exemples concrets visibles en Algérie.

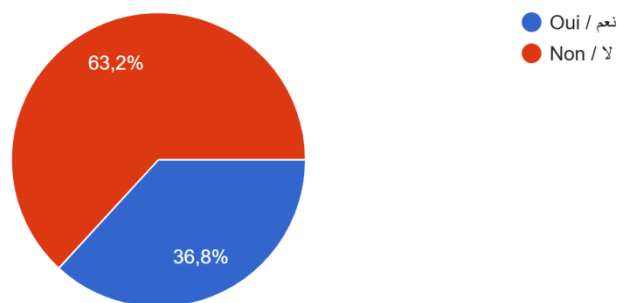
Comment améliorer cela

- Communiquer sur les co-produits possibles (sels, magnésium).
- Démonstrateurs pédagogiques dans les centres universitaires.

Interprétation:

La moitié des répondants ignorent qu'il est possible de récupérer des sels, métaux ou éléments utiles à partir des saumures. Cela révèle un besoin de vulgarisation scientifique, mais aussi une opportunité pour promouvoir l'économie circulaire appliquée au dessalement.

1) Connaissez-vous des technologies permettant de valoriser les rejets de saumures des stations de dessalement de l'eau de mer ? هل تعرف أي تقنيات تمكن من استغلال المخلفات الملحية الناتجة عن محطات تحلية مياه البحر ؟
228 réponses



10. Opinion sur la valorisation des rejets

Très majoritairement favorable.

Pourquoi ce soutien

- Elle répond à un double besoin : réduire l'impact + créer de la valeur.
- Elle ouvre des perspectives de recyclage et d'économie circulaire.

Comment aller plus loin

Mettre en place des unités pilotes.

Promouvoir la recherche appliquée sur la valorisation.

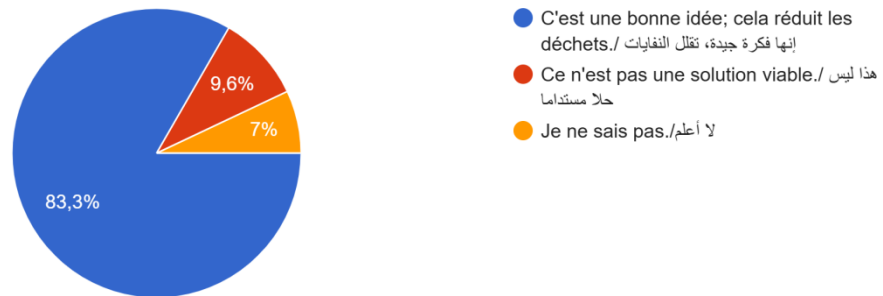
Interprétation:

La majorité voit dans la valorisation des rejets une double opportunité:

- Réduction des impacts environnementaux,
- Création de ressources valorisables (chlorure de sodium, magnésium, etc.)

Cette réponse confirme que le public apprécie les approches innovantes, à condition qu'elles soient bien expliquées et intégrées dans un cadre réglementaire.

2) Que pensez-vous de l'idée de valoriser les rejets de saumures en ressources ?
 المخلّفات الملحية إلى موارد؟
 228 réponses



12. Commentaires et suggestions libres

Les répondants expriment:

- un besoin d'accès à l'information.
- un intérêt accru pour les enjeux hydriques.
- une volonté d'être inclus dans la gouvernance.

Pourquoi c'est révélateur

Le public ne veut plus être simple spectateur.

Il souhaite participer aux choix stratégiques, à condition d'être informé et reconnu.

Comment institutionnaliser cette participation

Créer des comités citoyens de suivi des stations.

Intégrer des modules d'éducation à l'eau dans les cursus scolaires.

Organiser des forums participatifs régionaux sur l'eau.

Interprétation:

Le public souhaite être impliqué dans les décisions et mieux informé. Cela reflète une volonté de participation citoyenne, essentielle pour renforcer l'acceptabilité sociale de projets à fort impact comme les stations de dessalement.

10.4 Conclusion comparative: Professionnels vs Grand Public

L'analyse croisée des deux questionnaires révèle une convergence significative sur certains constats majeurs, mais aussi des divergences révélatrices de leur positionnement respectif face au dessalement.

1. Pourquoi une convergence sur les enjeux environnementaux

Malgré leurs profils différents, les deux groupes identifient les mêmes problématiques clés:

- L'impact des rejets salins sur le milieu marin,
- L'empreinte carbone élevée liée à la consommation électrique,
- Le besoin de moderniser les pratiques environnementales.

Explication scientifique :

Cette convergence s'explique par la présence croissante du discours environnemental dans l'espace public, alimenté par les médias, les universités et les crises hydriques vécues localement. Elle révèle également une montée générale de la conscience écologique, y compris chez les non-experts.

2. Pourquoi des différences de perception

Professionnels :

- Raisonnent à partir de leur vécu opérationnel,
- Tendent à minimiser certains impacts pour préserver l'image technique du secteur,
- Se réfèrent à des normes (ISO 14001), parfois appliquées de manière superficielle.

Grand public :

- Ressent l'environnement comme un enjeu quotidien et parfois menaçant,
- Réagit aux informations diffusées sans toujours maîtriser la complexité technique,
- Exprime une demande de participation et de transparence.

Analyse critique :

Ces différences soulignent un **déséquilibre d'accès à l'information**. Les professionnels disposent des données techniques mais leur interprétation est souvent influencée par leur rôle institutionnel. À l'inverse, les citoyens sont en quête de transparence, ce qui explique leurs perceptions plus critiques et leurs attentes plus explicites.

3. Comment interpréter ces écarts

- Le professionnel adopte une logique de « conformité procédurale » (faire ce qui est exigé),

- Le citoyen adopte une logique de « vigilance sociétale » (exiger des garanties au-delà du cadre formel).
- Cela traduit une tension classique entre régulation interne (contrôle institutionnel) et légitimité externe (acceptabilité sociale).

Pourquoi est-ce crucial

Car toute technologie à impact comme le dessalement doit conjuguer:

- Performance technique,
- Acceptation sociale,
- Soutenabilité écologique.

4. Quelles recommandations en découlent

a. Renforcer le dialogue entre expertise et société civile

- Créer des plateformes participatives locales,
- Intégrer les citoyens dans les comités de suivi environnemental.

b. Développer des outils de transparence environnementale

- Portails de données accessibles,
- Rapports vulgarisés sur l’empreinte carbone et les rejets.

c. Instaurer une gouvernance multi-acteurs

Associer les opérateurs, chercheurs, ONG, collectivités dans la planification stratégique.

5. Conclusion scientifique

L’intégration des perceptions professionnelles et citoyennes dans l’évaluation environnementale du dessalement permet de dépasser une approche purement technique. Elle révèle la nécessité d’une **écologie opérationnelle** : ancrée dans les faits, pilotée par des données, mais aussi **portée par une légitimité sociale**.

La station de dessalement de Béni Saf peut ainsi devenir un laboratoire de durabilité, à condition d’articuler expertise technique, innovation responsable, et implication citoyenne structurée.

Chapitre 12

Recommandations et Perspectives

Afin d'assurer la durabilité environnementale de la station de dessalement de Béni Saf et d'orienter de manière responsable le développement du dessalement en Algérie, les recommandations suivantes sont proposées :

1. Renforcer le suivi environnemental

Il est recommandé d'élargir le système de suivi aux paramètres physico-chimiques essentiels (pH, température, produits résiduels), avec des mesures automatisées en temps réel. L'intensification des campagnes de surveillance, idéalement à une fréquence trimestrielle, permettrait de mieux anticiper les impacts sur le milieu marin. Par ailleurs, la diffusion régulière des résultats environnementaux, conformément au décret exécutif n°22-228 sur l'accès à l'information, renforcerait la transparence. Il serait aussi pertinent d'impliquer davantage le Comité des Installations Classées de la wilaya, en y associant des représentants d'ONG et de la recherche scientifique.

2. Améliorer la gestion des rejets

Pour limiter les impacts des rejets salins, l'installation de dispositifs de dispersion plus efficaces, adaptés à la dynamique marine locale, est à envisager. En parallèle, la valorisation partielle des saumures (extraction de sel, magnésium, etc.) pourrait être explorée, conformément aux principes de l'économie circulaire. Un traitement préalable des rejets chimiques (biocides, antiscalants) est également souhaitable pour prévenir les risques de toxicité.

3. Réduire l'empreinte énergétique et améliorer la traçabilité carbone

Moderniser les équipements (récupération d'énergie, membranes haute performance) pour abaisser la consommation spécifique d'électricité.

Exiger des fournisseurs la déclaration systématique des facteurs d'émission (Scope 3) et des fiches techniques complètes pour chaque équipement, produit chimique ou pièce de rechange, afin de disposer de données fiables lors du calcul de l'empreinte carbone et de faciliter l'audit environnemental.

Évaluer la faisabilité d'une alimentation partielle en énergie solaire, en cohérence avec la stratégie nationale de transition énergétique.

Réaliser un audit énergétique régulier pour identifier les pertes et optimiser les performances.

4. Consolider la gouvernance et les compétences

Le renforcement des compétences du personnel, notamment sur les normes ISO 14001, la gestion des risques et l'environnement marin, est essentiel. La participation des acteurs locaux (collectivités, pêcheurs, associations) au suivi environnemental contribuerait à améliorer l'acceptabilité sociale. Enfin, une coopération renforcée avec les établissements universitaires et les centres de recherche nationaux favoriserait l'innovation et l'adaptation technologique.

5. Adapter le cadre réglementaire

Il serait utile d'actualiser les seuils de rejet à la lumière des nouvelles données scientifiques et des retours d'expérience nationaux. Par ailleurs, la mise en place d'incitations pour les stations intégrant des pratiques durables (aides, exonérations fiscales) encouragerait les initiatives vertueuses. Enfin, le renforcement du contrôle et des sanctions permettrait de garantir l'application effective des obligations environnementales.

6. Intégration des retours d'enquête dans l'amélioration des pratiques environnementales

Les enseignements tirés des deux enquêtes mettent en lumière des besoins spécifiques: du côté des professionnels, la nécessité de renforcer la formation continue, de formaliser un cadre technique national et de mieux prendre en compte les risques environnementaux latents ; du côté du grand public, une faible sensibilisation invite à développer des campagnes d'information, à encourager la transparence des stations et à instaurer des espaces de dialogue locaux pour améliorer l'acceptabilité sociale du dessalement.

CONCLUSION GENERALE

Le dessalement de l'eau de mer, à travers la station de Béni Saf, constitue une avancée majeure dans la stratégie nationale de sécurisation de l'approvisionnement en eau potable, dans un contexte de stress hydrique accentué par le changement climatique et la croissance démographique. Cette technologie, prometteuse pour l'avenir, soulève toutefois des défis complexes : préservation de l'environnement marin, consommation énergétique, gestion des saumures et des déchets chimiques.

L'analyse environnementale de la station de dessalement de Béni Saf met en évidence une empreinte carbone moyenne de 2,08 kg CO₂ éq/m³ d'eau produite, ce qui la positionne favorablement par rapport à d'autres installations similaires dans la région MENA. Cette performance s'explique notamment par l'utilisation de systèmes de récupération d'énergie et une gestion optimisée de la consommation électrique. Sur le plan de la conformité, la station respecte la majorité des exigences réglementaires nationales (décrets 06-141 et 07-144), avec des non-conformités ponctuelles liées à la fréquence de surveillance des rejets et à la diffusion publique des résultats.

Concernant les saumures, certaines observations documentaires et analyses contextuelles suggèrent une possible élévation de la salinité dans la zone immédiate de rejet, bien que la dispersion semble globalement efficace au large. Ce constat met en lumière la nécessité d'un suivi environnemental renforcé, fondé sur des données in situ et une modélisation hydrodynamique adaptée.

L'analyse détaillée de la station confirme ainsi l'importance d'une approche intégrée, combinant performance technique, réduction des impacts environnementaux et gouvernance participative. Les efforts existants sont encourageants, mais doivent être consolidés pour garantir la durabilité du dessalement.

En complément, deux enquêtes ont été réalisées : l'une auprès des professionnels du dessalement, l'autre auprès du grand public. Les résultats mettent en évidence un écart notable entre la perception citoyenne – encore limitée – des enjeux environnementaux du dessalement, et la conscience professionnelle des acteurs techniques quant à la nécessité de renforcer la réglementation, la transparence et le suivi.

En somme, la station de Béni Saf présente une performance environnementale globalement maîtrisée, tout en révélant des leviers d'amélioration clairs. Ce mémoire démontre la pertinence d'une démarche systémique, combinant outils normatifs, analyse technique, participation des parties prenantes et conscience écologique. Pour que le dessalement devienne un pilier durable de la sécurité hydrique nationale, il doit s'inscrire dans une stratégie intégrée fondée sur la réduction des impacts, la valorisation des rejets, l'optimisation énergétique, et le respect des équilibres écosystémiques.

À l'échelle nationale, le recours croissant au dessalement devra s'inscrire dans une politique globale de gestion intégrée de l'eau, incluant la réutilisation des eaux usées traitées, la lutte contre les pertes en réseau, et l'exploitation raisonnée des ressources conventionnelles. L'intégration des énergies renouvelables, la valorisation des rejets et l'innovation technologique représentent des leviers clés pour limiter l'empreinte écologique du secteur.

Enfin, la réussite de cette transition dépendra de la capacité du pays à s'appuyer sur les meilleures pratiques internationales, à renforcer la réglementation, et à impliquer les acteurs locaux et la société civile. En ce sens, le dessalement peut devenir un pilier du développement durable, garantissant l'accès à une eau sûre et durable pour les générations futures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Afgan, N. H., Carvalho, M. G. & Hovanov, N. V. (1999). Sustainability assessment of desalination plants in the Gulf region. *Energy*, vol. 24, n° 7, P.P 629–654
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00012-3)

Agence Ecofin. (2024). L'Algérie prévoit d'investir 5,4 milliards dans le dessalement de l'eau de mer. [En ligne]. [Consulté 03/06/2025]. Disponible sur le web :
<https://www.agenceecofin.com/gestion-publique/1410-122429-l-algerie-prevoit-d-investir-5-4-milliards-dans-le-dessalement-de-l-eau-de-mer?utm>

Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (2016). Étude d'évaluation du secteur de l'eau en Algérie. [En ligne]. [Consulté 03/06/2025]. Disponible sur le web :
https://projet.oss-online.org/maghreb-eau/sites/default/files/2020-01/Rapport-GIZ-Final_ALGERIE_0%20%283%29.pdf

Altayaran, A. M. & Madany, I. M. (1992). Impact of desalination plants on the coastal environment of Bahrain. *Water Research*, vol. 26, n° 4, P.P 435–445
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90043-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90043-6)

Alternatives économiques. (2010). L'eau, un bien rare. Hors-série, n° 85, septembre 2010, [En ligne]. [Consulté 13/07/2025]. Disponible sur le web :
<https://www.alternatives-economiques.fr/leau-rarefaction-dun-bien-vital/00060136>

Amitouche, M. (2016). Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra.

Ammitouche, M., & Baloul, H. (2022). Empreinte de carbone des stations de dessalement en Algérie. *Journal de l'Économie Circulaire et Développement Durable*, 2(1), P.P 94–102.

APS. (2021, 13 juillet). L'Algérie lance un programme d'urgence de construction de cinq stations de dessalement. *Algérie Presse Service*. [En ligne]. [Consulté 08/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.aps.dz/algerie/124002>

APS. (2023, 05 septembre). Dessalement d'eau de mer : plus de 75 % de taux d'avancement des stations en cours de réalisation. *Algérie Presse Service*. [En ligne]. [Consulté 08/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.aps.dz/economie/175669-dessalement-d-eau-de-mer-plus-de-75-de-taux-d-avancement-des-stations-en-cours-de-realisation#:~:text=ALGER%20%2D%20Le%20taux%20d'avancement,de%20l'ann%C3%A9e%20en%20cours.>

APS. (2024, 15 mai). L'Algérie prévoit de produire 3,7 millions de m³/jour d'eau dessalée d'ici fin 2024. *Algérie Presse Service*. [En ligne]. [Consulté 01/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.aps.dz/economie/175669-dessalement-d-eau-de-mer-plus-de-75-de-taux-d-avancement-des-stations-en-cours-de-realisation>

Aroua, N. (2018). *Water resources in SNAT 2030. Between economic needs and ecological requirements. Larhyss Journal*, (35), P.P 153–168.

ASTEEL. (2007). Dessalement de l'eau de mer et impacts environnementaux. *Techniques et Sciences des Méthodes*, n° 9. [En ligne]. [Consulté 03/06/2025]. Disponible sur le web : <https://astee-tsm.fr/articles/tsm-9-2007-vince/>

Balasubramanian, R. (2013). Sustainable brine management in desalination plants. *Journal of Cleaner Production*, vol. 53, P.P 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.012>

Belaribi, F. Z. (2021). Utilisation des méthodes d'aide multicritère à la décision dans la gestion des ressources en eau : Application de la méthode PROMETHEE à la sélection d'un procédé de dessalement de l'eau de mer. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, P.P 27–39.

Belmahi, I. (2024). L'eau de mer au secours de l'Algérie : le défi du dessalement. [En ligne]. [Consulté 01/04/2025]. Disponible sur le web : <https://rosaluxna.org/fr/publications/leau-de-mer-au-secours-de-lalgerie-le-defi-du-dessalement/?utm>

Benblidia, M. & Thivet, G. (2010). Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique de l'offre. *Les Notes d'analyse du CIHEAM*, n° 58. Montpellier : CIHEAM. [En ligne]. [Consulté 25/01/2025]. Disponible sur le web : <http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/NAN58.pdf>

Beni Saf Water Company. (2024). Données techniques et environnementales de la station de dessalement de Béni Saf. Rapport d'activités. Document non publié. Alger : BWC.

Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F. & Nezzal, G. (2009). Treatment of sea water using electrocoagulation. *Desalination*, vol. 246, n° 1–3, P.P 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.02.002>

- Bessenasse, M. & Ghaffor, N. (2006).** Dessalement d'eau de mer : Étude de trois stations du littoral algérien. Communication présentée à la **14^e Conférence Internationale sur la Conservation des Sols (ISCO 2006) : *Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments***, [En ligne]. [Consulté 25/01/2025]. Disponible sur le web : https://topsoil.nserl.purdue.edu/isco/isco14/1_Water_Management/Oral/T1-BESSENASSE%20-Dessalement%20Eau%20Mer-Alg%D0%92rie.pdf
- Guergueb, M., & Ferhat, A. (2021).** La gestion des eaux en Algérie : *vers un nouveau paradigme*. *Revue des recherches économiques avancées*, 6(1), P.P 303–315. <https://doi.org/10.38170/1993-006-001-018>
- Boudjema, A., Hamdane, N. & Farhat, M. (2023).** État des lieux et perspectives de la gestion environnementale dans les industries pétrochimiques algériennes. *Journal of Environmental Studies*, vol. 9, n° 1, P.P 78–92.
- Boyé, H. (2009).** *Dessalement de l'eau de mer : une ressource alternative*. [En ligne]. [Consulté 11/01/2025]. Disponible sur le web : http://ecolo.org/documents/documents_in_french/dessalement-Boye-09.pdf
- Carbo. (2024).** *Changement climatique – Définition, causes et conséquences* [En ligne]. [Consulté 17/03/2025]. Disponible sur le web : <https://www.hellocarbo.com/blog/communaute/changement-climatique-definition/>
- Cooley, H., Gleick, P. H. & Wolff, G. (2006).** *Desalination, with a grain of salt*. California : Pacific Institute, P. 35. [En ligne]. [Consulté 12/01/2025]. Disponible sur le web : <https://pacinst.org/publication/desalination-with-a-grain-of-salt/>
- CSIR (Council for Scientific and Industrial Research). (2016).** Environmental impact assessment for the proposed construction, operation and decommissioning of a seawater reverse osmosis plant and associated infrastructure at Lovu, KwaZulu-Natal South Coast: Final report [En ligne]. [Consulté 15/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.csir.co.za/sites/default/files/Documents/Lovu-Desalination-EIA-Final-Report.pdf>
- Dawoud, M. A. & Al Mulla, M. M. (2012).** Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf case study. *International Journal of Environment and Sustainability*, vol. 1, n° 3, P. 22–37. <http://dx.doi.org/10.24102/ijes.v1i3.96>
- Delmas, M. A. & Montes-Sancho, M. J. (2011).** An institutional perspective on the diffusion of international management standards: The case of the environmental

management standard ISO 14001. *Business Ethics Quarterly*, vol. 21, n° 1, P.P. 103–132. <https://doi.org/10.5840/beq20112114>

Elimelech, M. & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, vol. 333, n° 6043, P.P 717–729. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1200488>

FAO. (2008). *Aquastat - Système d'information sur l'eau pour la gestion durable des ressources en eau*. [En ligne]. [Consulté 16/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.fao.org/aquastat/fr/>

Fernandez-Torquemada, Y. & Sanchez-Lizaso, J. L. (2013). Effects of salinity on growth and survival of *Posidonia oceanica* seedlings. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 76, n° 1–2, P.P 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.09.031>

FMES. (2024). *Évolution du Fonds National de l'Eau en 2025*. [En ligne]. [Consulté 15/06/2025]. Disponible sur le web : <https://ebourse.dz/evolution-du-fonds-national-de-leau-en-2025/?utm>

Ghernaout, D. (2018). Water desalination: History, advances, and challenges. *Applied Water Science*, vol. 8, n° 1, P.P 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0669-5>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. [En ligne]. [Consulté 23/01/2025]. Disponible sur le web : <https://www.ipcc.ch/srocc>

Global Water Intelligence (GWI). (2021). *DesalData: Global desalination market data and analysis*. Oxford: Media Analytics Ltd. [En ligne]. [Consulté 23/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.desaldata.com>

Grimes, S. (2015). Conformité environnementale des installations côtières : cas des stations de dessalement en Algérie. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, vol. 4, n° 2, P.P 65–75.

Gude, V. G. (2016). Desalination and sustainability – An appraisal and current perspective. *Water Research*, vol. 89, P.P. 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.012>

Gude, V. G. (Éd.). (2018). *Renewable energy powered desalination handbook: application and thermodynamics*. Butterworth-Heinemann.

Guimard, L. (2019). *Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires.* Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1.

Haffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H. & Goosen, M. F. A. (2015). Renewable energy-driven desalination technologies : A comprehensive review. *Desalination*, vol. 356, P.P. 94–114 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.024>

Halwani, J., Ouddane, B., Abbasse, G., & Baroudi, M. (2009). Environmental impact of waste and effluents from Lebanese thermal power stations on the Mediterranean Sea. *2000 Mediterranean Conference for Environment and Solar. COMPLES'2K (Cat. No.00EX493)*, P.P 258-262. <https://doi.org/10.1109/cmples.2000.939912>

Mozas, M., & Ghosn, A. (2013). *État des lieux du secteur de l'eau en Algérie* Paris : Institut de Prospective Économique du Monde Méditerranéen (IPEMED). [En ligne]. [Consulté 13/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.ipemed.coop/fr/publications-r17/etudes-analyses-c108/Etat-des-lieux-du-secteur-de-leau-en-algerie-a2150.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report.* [En ligne]. [Consulté 18/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

International Desalination Association (IDA). (2019). *IDA Desalination Yearbook 2019–2020.* Topsfield, MA : Global Water Intelligence. [En ligne]. [Consulté 03/01/2025]. Disponible sur le web : <https://idadesal.org>

International Desalination Association (IDA). (2022). *Global Water Intelligence Reports.* [En ligne]. [Consulté 11/02/2025]. Disponible sur le web : <https://www.globalwaterintel.com>

International Organization for Standardization (ISO). (2015). *ISO 14001:2015 - Environmental management systems - Requirements with guidance for use.* Genève : ISO. [En ligne]. [Consulté 17/02/2025]. Disponible sur le web : <https://www.iso.org/standard/60857.html>

International Organization for Standardization (ISO). (2023). *ISO 14001: Environmental management systems - Requirements with guidance for use.* [En ligne]. [Consulté 28/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.iso.org/standard/60857.html>

International Organization for Standardization (ISO). (2015). *ISO 14001: Environmental management systems - Requirements with guidance for use*. Genève : International Organization for Standardization. [En ligne]. [Consulté 03/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.iso.org/standard/60857.html>

JECdd. (2023). *Rapport technique sur la performance environnementale des stations de dessalement en Algérie*. Document institutionnel interne non publié.

Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V. & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, vol. 657, n° 1343, P. 1356 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

Secrétariat général du Gouvernement (SGG). (s.d.). *Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire (JORADP)* [En ligne]. Disponible sur le web : <https://www.joradp.dz/HFR/Index.htm>

Kesieme, U. K., Milne, N., Aral, H. & Duke, M. (2013). Economic analysis of desalination technologies in the context of carbon pricing and environmental impact. *Desalination*, vol. 323, P.P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.12.005>

Kettab, A. (2011). *Les procédés membranaires de dessalement de l'eau de mer*. Alger : Office des Publications Universitaires (OPU).

Kettab, A. (2015). *L'eau en Algérie : stratégies, enjeux et gouvernance*. Alger: Office des Publications Universitaires (OPU).

Khan, S. J., Wintgens, T., Sherman, P., Zaricky, J. & Schäfer, A. I. (2004). Removal of contaminants of concern by membrane filtration for wastewater reuse. *Water Science and Technology*, vol. 50, n° 2, P.P. 195–202. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0087>

Kherbache, N. (2014). *La problématique de l'eau en Algérie : Enjeux et contraintes* Thèse de magistère, Université de Béjaïa. [En ligne]. Disponible sur le web : https://www.researchgate.net/publication/350631481_La_problematique_de_l'eau_en_Algerie_Enjeux_et_contraintes

Kherbache, N., Molle, François. (2021). La surexploitation des ressources en eau : le cas du bassin de la Macta en Algérie.

Kherbache, N. (2020). *Rareté des ressources et politique de l'eau en Algérie : Analyse de la transition d'un modèle de l'offre vers la gestion de la demande en eau (GDE)*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier.

L'Expression. (2024). *Sept nouvelles stations seront réalisées.* [En ligne]. [Consulté 03/06/2025]. Disponible sur le web : <https://lexpressiondz.com/nationale/sept-nouvelles-stations-seront-realisees-385489?utm>.

Lattemann, S. & Höpner, T. (2003). *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination.* *Desalination*, vol. 220, n° 1–3, P.P 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>.

Lattemann, S. & Höpner, T. (2008). *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination.* *Desalination*, vol. 220, n° 1–3, P.P. 1–15 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>.

Le Centre d'information sur l'eau. (2025). *Qu'est-ce que le stress hydrique ? Comment y répondre ?* [En ligne]. [Consulté 08/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.cieau.com/eautransition-ecologique/enjeux/quest-ce-que-le-stress-hydrique-comment-y-repondre/>.

Lee, J. & Kim, H. (2024). *Artificial intelligence in membrane desalination: Applications and future perspectives.* *Journal of Membrane Science*, vol. 689, n° 121045, P.P 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121045>.

Liu, Y., Wang, Y. & Li, Y. (2015). *Energy consumption and carbon footprint of desalination technologies: A comparative analysis.* *Desalination*, vol. 367, P.P 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.012>.

Ministère de l'Énergie et des Mines. (2023). *Rapport annuel sur le dessalement de l'eau en Algérie.*

Ministère de l'Énergie et des Mines. (s.d.). *Projet de dessalement de l'eau de mer.*

Ministère de la Transition de l'Espagne. (2020). *Plan d'action pour la gestion durable de l'eau.* Gouvernement d'Espagne. [En ligne]. [Consulté 19/01/2025]. Disponible sur le web : <https://www.miteco.gob.es>.

Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Algérie). (2003). *Rapport national sur les ressources en eau et la gestion durable des barrages en Algérie.* Alger : Direction des ressources hydriques.

Ministère des Ressources en Eau (MRE). (2021). *Plan National de l'Eau et Stratégie 2030.* Alger : MRE.

Ministère des Ressources en Eau (MRE). (2021). *Stratégie nationale pour le développement du dessalement en Algérie.* Alger : MRE.

Ministère des Ressources en Eau (MRE). (2020). *Bilan national des installations de dessalement en Algérie.* Alger : MRE.

Ministère des Ressources en Eau (MRE). (2024). *Stratégie nationale de l'eau 2030.* Alger : Ministère des Ressources en Eau.

Moudjeber, D. (2015). *Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l'Algérie.* Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

National Research Council. (2008). *Desalination: A national perspective.* Washington, DC : The National Academies Press, P. 22. [En ligne]. [Consulté 30/12/2024]. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.17226/12184>.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2020). *Guidelines for drinking-water quality* (4e éd.). Genève: OMS.

Pandey, D., Agrawal, M. & Pandey, J. S. (2011). *Carbon footprint: current methods of estimation.* *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 178, n° 1–4, P.P. 135–160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>.

Parlement italien. (1994). *Loi n° 36 du 5 janvier 1994 (Loi Galli).* *Journal officiel de la République italienne.* [En ligne]. [Consulté 25/03/2025]. Disponible sur le web : <https://www.normattiva.it>.

Plan Bleu. (2010). *L'eau en Méditerranée : Situation et perspectives.* [En ligne]. [Consulté 16/04/2025]. Disponible sur le web : <https://planbleu.org/publications/leau-en-mediterranee-situation-et-perspectives/>.

Plan Bleu. (2024). *Dessalement de l'eau de mer et environnement : Recommandations pour le bassin méditerranéen.* [En ligne]. [Consulté 17/06/2025]. Disponible sur le web : <https://planbleu.org/publications>.

République Française. (1992). *Loi n° 92-3 sur l'eau et les milieux aquatiques.* *Journal Officiel de la République Française.* [En ligne]. [Consulté 19/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.legifrance.gouv.fr>.

Rosa Luxemburg Stiftung - Afrique du Nord. (2023). *L'eau de mer au secours de l'Algérie : Le défi du dessalement.*

Saeed, M. & Al-Mutaz, I. (2022). *ESG integration in desalination projects. Water and Environment Journal*, vol. 36, n° 2, P.P. 90–97.

Salah, B. (2023). *Combien coûte réellement le dessalement de 1 m³ d'eau de mer ?* [En ligne]. [Consulté 29/01/2025]. Disponible sur le web : https://www.algerie360.com/lalgerien-le-paye-6-da-combien-coute-reellement-le-dessalement-de-1-m%C2%B3-deau-de-mer/?utm_.

Smith, L., Ahmed, A. & Warsinger, D. M. (2021). *Batch reverse osmosis: Modeling and analysis of a promising low-energy process. Desalination*, vol. 503, n° 114945, P.P 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114945>.

Subramani, A. & Jacangelo, J. G. (2015). *Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. Water Research*, vol. 75, P.P 164–187. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032>.

SWCC (Saline Water Conversion Corporation). (2023). *Al Khafji Solar Desalination Plant*. [En ligne]. [Consulté 19/02/2025]. Disponible sur le web : <https://www.swcc.gov.sa/en/AlKhafji>.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2008). *Desalination resource and guidance manual for environmental impact assessments*. [En ligne]. [Consulté 12/02/2025]. Disponible sur le web : <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/11896>.

Veolia Water Technologies. (2024). *Barrel™: Integrated energy recovery for efficient seawater desalination*. [En ligne]. [Consulté 25/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.veoliawatertechnologies.com/en/barrel>.

Vivien, L. (2014). *Le dessalement de l'eau de mer : Quels impacts sur l'environnement ?* [En ligne]. [Consulté 15/05/2025]. Disponible sur le web : https://fmes-france.org/le-dessalement-de-leau-de-mer-une-solution-de-facilite-face-au-stress-hydrique-au-fort-impact-environnemental/?utm_.

Wiedmann, T. & Minx, J. (2008). *A definition of 'carbon footprint'. Ecological Economics*, vol. 64, n° 1, P. 25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.005>.

World Bank Group. (2010). *Environmental, health, and safety guidelines for desalination*. [En ligne]. [Consulté 17/05/2025]. Disponible sur le web :

https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/policies-standards/ehs-guidelines.

WWF. (2019). *Les impacts environnementaux du dessalement*. [En ligne]. [Consulté 01/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/les-impacts-environnementaux-du-dessalement>.

Yousfi, A. & Chedik, L. (2024). *Étude des rejets de saumures des usines de dessalement de l'eau de mer en utilisant l'imagerie satellite*. Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie de la Construction, Département de Génie Mécanique.

Zhang, Y. & Elimelech, M. (2025). *3D-printed membranes for sustainable desalination: A review*. *Desalination*, vol. 563, n° 116591, P.P. 1–15. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.116591>.

Zhang, Y., Ruan, H., Guo, C., Liao, J. & Shen, J. (2020). *Thin-film nanocomposite reverse osmosis membranes with enhanced antibacterial resistance by incorporating p-aminophenol-modified graphene oxide*. *Separation and Purification Technology*, vol. 235, n° 116143, P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116143>.

ANNEXES

Business Model Canvas

Bureau d'étude en conformité environnementale des stations de dessalement

Définition détaillée du Business Model Canvas (BMC)

Le **Business Model Canvas (BMC)** est un **outil de modélisation stratégique** qui permet de représenter de manière visuelle et synthétique **le fonctionnement d'une organisation** ou d'un projet entrepreneurial. Il a été conçu par **Alexander Osterwalder** dans le cadre de sa thèse doctorale, puis popularisé à travers son ouvrage *Business Model Generation* publié en 2010.

Cet outil se présente sous la forme d'un **tableau structuré en 9 blocs interconnectés**, chacun représentant un élément fondamental du modèle économique de l'entreprise. L'objectif du BMC est de **comprendre comment une organisation crée de la valeur**, comment elle la **livre à ses clients**, et comment elle en **capte une partie sous forme de revenus**.

Il s'agit d'un cadre de travail visuel qui remplace les longs plans d'affaires par une carte intuitive, facilitant ainsi la **communication**, la **prise de décision**, le **pilotage stratégique**, et même la **co-création d'un modèle économique** en équipe.

Pourquoi utiliser un Business Model Canvas

- Pour **structurer** une idée de projet de manière claire et cohérente.
- Pour **visualiser rapidement** les forces, faiblesses et opportunités d'un modèle économique.
- Pour faciliter le **travail collaboratif** entre fondateurs, associés, ou intervenants.
- Pour **innover** ou **réadapter un modèle existant** à de nouveaux marchés ou contraintes.
- Pour servir de **base de discussion avec des partenaires, financeurs ou incubateurs**.
- Pour **évoluer facilement**: c'est un outil flexible, modifiable, vivant.

Les 9 blocs du Business Model Canvas

1. Segments de clients

Il s'agit des groupes de personnes ou d'organisations que l'entreprise vise à servir. Identifier ses clients permet de mieux comprendre leurs besoins, comportements, et exigences spécifiques. Exemples : particuliers, entreprises, collectivités, ONG.

2. Propositions de valeur

C'est le cœur du modèle : que propose l'entreprise à ses clients ? Quels **problèmes** elle résout, quels **besoins** elle satisfait, et par quels **bénéfices tangibles** (gain de temps, réduction de coûts, sécurité, confort, performance).

3. Canaux de distribution et de communication

Ce sont les moyens par lesquels l'entreprise **atteint ses clients** et **livre la valeur promise**. Cela inclut les canaux physiques (agences, distributeurs) et numériques (site web, réseaux sociaux, e-mailing).

4. Relations clients

Ce bloc décrit le type de relation que l'entreprise établit avec chacun de ses segments : relation personnelle, automatisée, libre-service, communauté en ligne, service après-vente, etc.

5. Sources de revenus

Il s'agit des **flux d'argent** que l'entreprise génère grâce à la vente de ses produits, services ou abonnements. Il peut s'agir de ventes ponctuelles, d'abonnements, de commissions, de licences, de revenus publicitaires, etc.

6. Ressources clés

Ce sont les actifs stratégiques (matériels, humains, financiers ou immatériels) nécessaires pour faire fonctionner le modèle. Exemples : locaux, logiciels, brevets, équipe experte, base de données, etc.

7. Activités clés

Ce sont les **actions essentielles** que l'entreprise doit mener pour livrer sa proposition de valeur, atteindre ses clients, générer ses revenus et assurer sa durabilité. Cela peut être : produire, auditer, conseiller, développer, entretenir, former, etc.

8. Partenaires clés

Ce bloc recense les **alliés externes** qui apportent un appui à l'activité : fournisseurs, partenaires techniques, institutions, incubateurs, prestataires sous-traitants, etc.

9. Structure des coûts

Il s'agit de toutes les **dépenses nécessaires** pour que le modèle fonctionne : salaires, outils, matériel, déplacements, locaux, communication, etc.

Business Model Canvas



Premier axe: Présentation du projet

1.1 Idée du projet

Le projet vise la création d'un bureau d'étude environnemental spécialisé dans l'accompagnement à la mise en conformité réglementaire des établissements et entreprises générant des impacts sur l'environnement. Il ne se limite pas aux stations de dessalement, bien qu'il en fasse une spécialité stratégique, mais s'étend à tout type d'installation : usines industrielles, hôpitaux, ports, établissements publics, zones industrielles, etc.

Le bureau proposera une offre de services diversifiée, comprenant des audits de conformité environnementale, des études d'impact, le calcul de l'empreinte carbone, la modélisation des rejets (liquides, atmosphériques), l'assistance à la certification ISO 14001 et ISO 14064, ainsi que la formation des personnels techniques. Cette offre répond à la fois à une demande réglementaire croissante et à un besoin de performance environnementale dans les organisations.

L'objectif est de proposer des prestations rigoureuses, appuyées sur les normes internationales et adaptées au contexte algérien. Le bureau se positionnera comme un acteur innovant, crédible scientifiquement, et à l'écoute des besoins spécifiques de chaque client.

Le projet se déroulera selon un planning structuré. La phase de préparation (3 mois) permettra de finaliser l'étude de marché, de créer juridiquement le bureau, et de structurer l'offre de service. Ensuite, la phase de lancement (3 mois) sera consacrée aux premières missions et à la prospection. Une phase de développement (6 mois) permettra d'étendre la zone d'intervention et de renforcer l'équipe. Enfin, la phase d'expansion (1 an) visera la diversification de l'offre (formations, solutions numériques) et des partenariats techniques.

Les services offerts incluent :

- Audits environnementaux complets
- Calcul de l'empreinte carbone
- Évaluation des impacts des rejets liquides en mer
- Élaboration de plans de gestion environnementale
- Assistance à la certification ISO et au suivi réglementaire

1.2 Valeurs proposées

Le bureau d'étude repose sur une **offre de valeur riche et différenciante**, conçue pour répondre de manière précise aux **besoins environnementaux des entreprises et des établissements**, notamment dans les secteurs à risques ou à fortes exigences réglementaires comme les stations de dessalement, les installations industrielles, portuaires, hospitalières, etc. Voici le détail des six piliers qui constituent cette proposition de valeur :

1. Spécialisation sectorielle : expertise unique en dessalement et milieux côtiers

Le bureau se distingue par une **maîtrise technique approfondie** des problématiques spécifiques au **dessalement de l'eau de mer**, un domaine complexe mêlant ingénierie des procédés, gestion des rejets en mer, consommation énergétique et contraintes réglementaires internationales. Cette spécialisation permet de répondre de manière **ciblée**,

efficace et crédible aux besoins des stations de dessalement, tout en adaptant les outils à d'autres secteurs ayant des impacts environnementaux similaires (industrie côtière, zones portuaires, etc.). Cette expertise rare constitue un **avantage concurrentiel fort** sur le marché national.

2. Conformité réglementaire: réduction des risques légaux et administratifs

L'accompagnement proposé vise à garantir une **conformité stricte aux réglementations environnementales en vigueur**, aussi bien au niveau **national** (lois algériennes, décrets d'application, normes de rejet) qu'au niveau **international** (ISO 14001, ISO 14064, conventions maritimes). En assurant une **veille réglementaire continue** et une interprétation adaptée aux réalités de terrain, le bureau permet à ses clients d'**éviter les sanctions, de répondre sereinement aux inspections, et d'améliorer leur réputation institutionnelle**. Il ne s'agit pas seulement de remplir des obligations, mais de transformer la conformité en **levier de performance durable**.

3. Engagement écologique: réduction de l'empreinte carbone et des pollutions

Le bureau s'inscrit dans une logique de **transition écologique**, en proposant des outils pour **quantifier, analyser et réduire les impacts environnementaux** des activités industrielles. Cela comprend le **calcul de l'empreinte carbone** (selon ISO 14064), l'évaluation des **rejets salins, chimiques ou thermiques** en mer, et l'élaboration de **plans d'atténuation**. L'approche vise à **favoriser l'économie circulaire**, la sobriété énergétique, la protection des milieux naturels et la responsabilisation des opérateurs vis-à-vis de leurs écosystèmes. Ce positionnement est essentiel dans un contexte de **crise climatique et hydrique mondiale**.

4. Crédibilité: approche scientifique fondée sur des normes reconnues

Les services du bureau reposent sur une **démarche scientifique rigoureuse**, articulée autour de **référentiels reconnus internationalement** (normes ISO, protocoles IPCC, lignes directrices OCDE). Les audits, rapports et recommandations s'appuient sur des **données mesurées, des modèles éprouvés, et des outils de modélisation et d'analyse multicritères**. Cette rigueur méthodologique confère une **légitimité élevée** au bureau face aux administrations, aux partenaires industriels et aux bailleurs de fonds. La transparence, la traçabilité et la qualité des livrables renforcent la **confiance des clients**.

1.3 Équipe de travail

- **Chef de projet environnemental** (fondateur du bureau)
- **Ingénieur procédés – dessalement**
- **Expert modélisation marine & carbone**
- **Chargé de conformité réglementaire**
- **Assistant administratif & communication**

1.4 Objectifs

Les objectifs du bureau d'étude en conformité environnementale sont conçus selon une **stratégie de développement progressive**, articulée en **trois horizons temporels** : court, moyen et long terme. Cette structuration permet d'assurer un **lancement maîtrisé**, une **expansion sectorielle réaliste**, et une **vision ambitieuse mais réalisable** à long terme. Chaque phase repose sur des résultats concrets, mesurables et alignés avec les besoins du marché ainsi que les compétences internes de l'équipe.

1. Objectifs à court terme (0 à 12 mois)

Lancement opérationnel du bureau et accompagnement de 5 à 10 stations pilotes

La première année sera consacrée à la **mise en place du bureau**, à la **structuration de l'offre**, et au **démarrage des premières missions terrain**. L'objectif prioritaire est de **positionner le bureau comme un prestataire crédible et opérationnel**, capable de produire des livrables professionnels et conformes aux attentes des clients.

L'équipe visera l'**accompagnement de 5 à 10 sites pilotes**, principalement des **stations de dessalement**, mais également d'autres installations prioritaires (mini-zones industrielles, stations d'épuration, centres hospitaliers, etc.). Ces projets permettront :

- D'**éprouver la méthodologie** et les outils développés,
- De **créer un portefeuille de références concrètes**,
- D'**obtenir les premiers retours clients** pour améliorer l'offre,
- De **consolider les partenariats techniques** (laboratoires, experts, institutions),
- De **rendre visible l'expertise du bureau** via le site internet, les conférences ou publications.

L'enjeu de cette première phase est de **démontrer rapidement la valeur ajoutée** du bureau dans des cas concrets, avec des résultats mesurables (rapports, recommandations, mise en conformité réelle).

2. Objectifs à moyen terme (1 à 3 ans)

Diversification sectorielle et élargissement géographique

Après une première année d'implantation réussie, le bureau visera un **élargissement de son périmètre d'intervention**. Cet objectif inclut à la fois une **diversification des secteurs couverts** et une **extension géographique** au-delà de la zone pilote (par exemple, Béni Saf et la wilaya d'Aïn Témouchent).

Les nouveaux secteurs ciblés incluront notamment :

- Les **zones industrielles côtières** (textile, agroalimentaire, métallurgie...),
- Les **infrastructures de transport portuaire et logistique**,
- Les **hôpitaux et centres de soins** (fortement réglementés en matière de déchets et d'effluents),
- Les **complexes touristiques côtiers** (soumis à des normes écologiques et paysagères).

Sur le plan opérationnel, cette phase nécessitera :

- Le **renforcement de l'équipe**, avec éventuellement l'ajout d'un ou deux profils spécialisés,
- L'amélioration continue des outils et procédures internes,
- Une **politique commerciale plus structurée**, incluant la réponse à des appels d'offres,
- Le **lancement de services complémentaires** (formations, abonnements, assistance en ligne...).

Ce développement permettra d'**asseoir la notoriété du bureau au niveau régional** et d'élargir durablement sa base de clients.

3. Objectifs à long terme (3 à 5 ans et au-delà)

Devenir un référent national en conformité environnementale des établissements

L'ambition à long terme du projet est de **faire du bureau une référence nationale** dans le domaine de l'audit et de l'accompagnement en conformité environnementale. Il ne s'agira plus seulement de répondre à des besoins ponctuels, mais de **contribuer à structurer le secteur** à travers:

- La participation active à des **réformes réglementaires** ou à des **groupes de travail techniques**,
- La **formation de cadres** dans les institutions publiques ou entreprises privées,
- Le développement d'**outils numériques ou plateformes d'auto-diagnostic**,
- La **reconnaissance comme bureau accrédité** auprès d'agences nationales ou de bailleurs de fonds internationaux,
- L'expansion vers des **projets transnationaux**, notamment dans le cadre de coopérations en Méditerranée (UE, pays du Maghreb, Golfe, etc.).

À ce stade, le bureau pourra également **se positionner comme partenaire clé de grandes entreprises** dans leur stratégie de responsabilité sociétale (RSE), ou de transition écologique.

1.5 Planning de réalisation

Phase	Activités clés	Durée estimée	Résultat attendu
Préparation	Étude de marché, cadre juridique, création du bureau	3 mois	Lancement officiel
Lancement	Début des audits, prospection clients	3 mois	Premiers contrats signés
Développement	Déploiement régional, recrutement	6 mois	Croissance du portefeuille clients
Expansion	Partenariats, offres premium	12 mois	Diversification des services

Deuxième axe: Aspects innovants

Ce projet est innovant par son positionnement spécialisé. Très peu de structures en Algérie proposent des prestations environnementales pointues, combinant expertise réglementaire, modélisation, calcul de l'empreinte carbone et accompagnement ISO. Ce bureau se positionne donc à la croisée de plusieurs domaines : ingénierie environnementale, conseil réglementaire, et formation spécialisée.

L'innovation repose également sur l'usage d'outils professionnels (SimaPro, QGIS, GABI) pour produire des rapports scientifiquement fondés, compréhensibles par les clients mais aussi exploitables par les autorités. L'intégration des normes ISO est pensée de manière opérationnelle, avec des grilles de conformité sur mesure et des plans de mise en œuvre clairs.

D'un point de vue organisationnel, l'approche modulaire et personnalisable constitue une autre originalité : les prestations sont ajustées en fonction de la taille, du secteur, et du niveau de maturité environnementale de chaque client. Cela permet de rendre l'expertise accessible à des structures variées, tout en garantissant un haut niveau de qualité.

2.1 Nature des innovations

- Intégration des normes ISO dans le secteur du dessalement
- Calcul personnalisé de l'empreinte carbone des procédés industriels
- Modélisation des rejets salins et chimiques en milieu marin
- Tableaux de bord numériques et rapports intelligents

2.2 Domaines d'innovation

Le bureau d'étude en conformité environnementale s'inscrit résolument dans une dynamique d'innovation, en intégrant des approches nouvelles à plusieurs niveaux de son modèle d'activité. L'innovation ne se limite pas aux outils utilisés, mais s'étend à la **nature des services**, aux **technologies mobilisées**, ainsi qu'à l'**organisation même de l'offre**. Cette capacité d'innovation constitue un **avantage concurrentiel majeur** et une réponse efficace aux nouveaux défis environnementaux auxquels sont confrontés les établissements publics et privés.

1. Innovation de service : évaluation environnementale multi-niveaux

L'un des principaux apports innovants du bureau repose sur sa capacité à réaliser une **évaluation environnementale globale**, structurée autour de trois dimensions clés : **réglementaire, climatique et technique**. Contrairement aux audits classiques qui se limitent souvent à une vérification de conformité administrative, le bureau propose une analyse croisée, prenant en compte :

- Le respect des **textes réglementaires algériens** (décrets, arrêtés, seuils de rejet),
- L'alignement avec les **normes internationales** (ISO 14001, ISO 14064, EMAS),
- Les **impacts climatiques directs et indirects** (émissions de GES, empreinte carbone),
- La **performance technique des installations** (efficacité énergétique, gestion des ressources, fiabilité des rejets).

Cette approche holistique permet de proposer aux clients des **plans d'action intégrés**, favorisant à la fois la **conformité légale**, la **réduction des impacts environnementaux**, et l'**amélioration continue des performances**.

2. Innovation technologique : outils avancés de diagnostic et de modélisation

Le bureau s'appuie sur une panoplie d'**outils technologiques spécialisés** qui renforcent la précision, la crédibilité et la visualisation des résultats. Parmi ces outils, on retrouve notamment :

- Les **Systèmes d'Information Géographique (SIG)**, utilisés pour cartographier les installations, les rejets, les zones sensibles ou les panaches de dispersion en mer,
- Les logiciels d'**Analyse de Cycle de Vie (ACV)** comme **SimaPro** ou **Gabi**, permettant de quantifier les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle d'un procédé (de l'approvisionnement à l'évacuation),
- Des outils de **modélisation des panaches de rejet**, permettant de simuler, en fonction de la bathymétrie et des courants marins, la trajectoire et la concentration des rejets salins, chimiques ou thermiques issus des installations industrielles ou stations de dessalement.

L'usage combiné de ces technologies permet de passer d'un diagnostic subjectif à une **analyse scientifique fondée sur des données**, facilitant ainsi la **prise de décision environnementale basée sur des preuves**.

3. Innovation organisationnelle : offre flexible et personnalisée

Sur le plan organisationnel, le bureau propose un modèle **modulaire et adaptable**, capable de répondre aussi bien aux besoins d'une grande entreprise industrielle qu'à ceux d'une petite station publique. L'offre est conçue pour s'ajuster en fonction de plusieurs variables : **taille de l'établissement, type d'activité, maturité environnementale, capacités financières, niveau de risque écologique**.

Cette innovation repose notamment sur :

- La mise en place de **formules d'intervention flexibles** : audits ponctuels, diagnostics simplifiés, abonnements annuels, assistance à la certification, etc.
- La possibilité de **travailler à distance** pour certaines étapes (collecte documentaire, reporting, visioconférences techniques),
- Une approche orientée **co-construction** avec le client, afin d'identifier les priorités et les solutions les plus pertinentes.

Cette logique de personnalisation permet d'**abaisser les barrières à l'accès** à l'expertise environnementale, tout en garantissant une prestation **rigoureuse et de qualité**, quel que soit le profil du client.

Troisième axe: Analyse stratégique du marché

Le marché cible du bureau est constitué d'acteurs publics et privés confrontés à des exigences environnementales : entreprises industrielles, exploitants de stations de dessalement, collectivités locales, hôpitaux, ports, établissements d'enseignement, etc. Tous sont concernés, à des degrés divers, par des obligations de conformité, que ce soit dans le cadre d'un permis d'exploitation, d'un projet d'aménagement, ou d'une procédure de certification.

En parallèle, des opportunités existent auprès des institutions publiques (ministères, agences environnementales, directions de wilayas), ainsi que des bailleurs de fonds qui financent des projets sensibles sur le plan écologique.

La concurrence directe est limitée. Quelques bureaux généralistes existent, mais peu sont spécialisés dans la réglementation environnementale ni capables de proposer une expertise technique poussée. Ce contexte constitue une opportunité de positionnement différenciant, avec une offre de niche à forte valeur ajoutée.

La stratégie de pénétration du marché s'articulera autour de plusieurs canaux : la mise en ligne d'un site vitrine professionnel, la participation à des salons et forums spécialisés, la publication de contenus techniques (études de cas, fiches ISO, outils de diagnostic), et une prospection ciblée auprès d'opérateurs stratégiques. Des relations de confiance seront également développées avec les universités et laboratoires de recherche.

3.1 Marché potentiel

Le marché ciblé par le bureau d'étude en conformité environnementale est à la fois **diversifié, en expansion et stratégiquement positionné** au croisement des enjeux réglementaires, industriels et écologiques. En réponse à l'évolution des normes environnementales, à la pression croissante des institutions de contrôle, ainsi qu'à la sensibilité accrue des citoyens aux questions de durabilité, de nombreuses structures recherchent désormais un **accompagnement technique fiable et spécialisé**. Le bureau se positionne ainsi comme un acteur capable de répondre à des **besoins concrets**, dans des secteurs clés. Voici une analyse détaillée de ses cibles prioritaires :

1. Sociétés de dessalement (publiques et privées)

Les stations de dessalement, qu'elles soient gérées par des entités publiques comme l'ADE (Algérienne des Eaux), l'ANDES (Agence Nationale de Dessalement) ou par des sociétés privées en concession (ex. Béni Saf Water Company SPA), représentent un **segment prioritaire**. Ces installations sont soumises à des **exigences strictes en matière de rejets en mer**, de consommation énergétique, et de suivi environnemental. De plus, leur exposition croissante aux audits internationaux (en cas de financements étrangers) renforce le besoin d'un **accompagnement technique conforme aux normes ISO**.

Le bureau peut intervenir à différents niveaux : audits périodiques de conformité, modélisation des rejets salins, évaluation de l'empreinte carbone par m³ d'eau produite, assistance à la certification, ou encore formation du personnel aux bonnes pratiques

environnementales. La **spécialisation du bureau dans le dessalement** constitue ici un avantage concurrentiel majeur.

2. Institutions publiques : Ministère de l'Environnement, ANPE, ANDES

Les **organismes publics nationaux** représentent un **marché institutionnel stratégique**, notamment pour des missions d'expertise, de vérification, ou de renforcement des capacités. Le **Ministère de l'Environnement** et ses directions locales peuvent avoir besoin d'études de terrain, de diagnostics environnementaux ou de validations techniques de rapports d'impact. De même, l'**Agence Nationale des Changements Climatiques (ANCC)**, l'**ANPE** (Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement), ou l'**ANDES** peuvent solliciter des bureaux d'étude dans le cadre d'appels d'offres ou de programmes pilotes.

Le bureau pourra ainsi être mobilisé pour **fournir une expertise indépendante, accompagner des projets pilotes en matière de durabilité, ou former des agents de l'administration** aux nouveaux outils de suivi et de contrôle environnemental.

3. Collectivités locales, ports industriels et zones économiques spéciales

Les **collectivités locales** (wilayas, communes côtières, offices d'aménagement) sont de plus en plus impliquées dans la **gestion environnementale du territoire**, notamment dans les zones industrielles, portuaires ou côtières. Elles sont souvent confrontées à des problématiques complexes : pollution des eaux, bruit, déchets industriels, conflits d'usage, etc. N'ayant pas toujours les compétences internes suffisantes, elles recherchent des **prestataires externes** pour mener des études d'impact, des audits réglementaires, ou proposer des **plans d'action territoriaux**.

Les **ports industriels** ou **zones économiques spéciales**, en tant qu'espaces à forte densité d'activités, constituent également des clients potentiels. Ils doivent se conformer à une multitude de normes (qualité de l'eau, gestion des déchets dangereux, lutte contre les pollutions marines), souvent sous le regard des autorités nationales et internationales. Le bureau pourra y proposer des **audits multisites**, des **outils de gestion environnementale partagée**, ou encore des **rapports de conformité intégrés**.

4. Laboratoires environnementaux, organismes de certification et bureaux partenaires

Le bureau peut aussi développer des **relations B2B** avec d'autres entités techniques. Par exemple, les **laboratoires environnementaux accrédités** peuvent faire appel à lui pour des missions de terrain (prélèvements, accompagnement client), tandis que les **organismes de certification** (notamment pour les normes ISO) peuvent sous-traiter certaines parties d'audit ou recommander le bureau à leurs clients comme **conseiller de mise en conformité**.

De même, certains **bureaux d'études généralistes** ou **bureaux d'ingénierie** peuvent faire appel à ce bureau pour des expertises très spécifiques : modélisation de panaches de rejet, ACV sectorielle, conformité ISO 14064, etc. Cela ouvre la voie à un **marché indirect basé sur des coopérations techniques**, notamment dans le cadre de projets financés par des bailleurs ou des institutions internationales.

3.2 Concurrence

L'environnement concurrentiel dans lequel s'inscrit le bureau d'étude est relativement favorable, du fait de la **faible présence d'acteurs spécialisés** dans le domaine de la **conformité environnementale appliquée au dessalement** et plus largement aux **infrastructures techniques à forte sensibilité écologique**.

1. Concurrence limitée et peu spécialisée

Sur le marché algérien, l'offre en matière d'études environnementales est **majoritairement constituée de bureaux généralistes**, souvent focalisés sur les **études d'impact environnemental (EIE)**, les **plans de gestion des déchets**, ou les **dossiers réglementaires classiques**. Ces structures ont une approche large, mais rarement une **expertise technique pointue** sur les installations industrielles complexes comme les stations de dessalement, les centrales thermiques, ou les infrastructures portuaires.

Par ailleurs, ces bureaux ne disposent que rarement de **compétences internes en modélisation**, en **analyse de cycle de vie (ACV)** ou en **quantification carbone**, et font peu appel aux référentiels ISO dans leur démarche. Leur approche reste souvent descriptive, basée sur des grilles de conformité classiques, sans réelle **valeur ajoutée technique ou stratégique** pour le client.

2. Positionnement différencié et à haute valeur ajoutée

Le bureau d'étude proposé se positionne volontairement sur une **niche spécialisée**, alliant rigueur réglementaire, ingénierie environnementale avancée et modélisation technique. Ce positionnement repose sur plusieurs éléments différenciateurs :

- Une **expertise sectorielle approfondie** sur les stations de dessalement et les installations industrielles en milieu côtier,
- L'usage de **méthodes scientifiques robustes** (ACV, empreinte carbone, modélisation des rejets),
- Une **approche intégrée ISO 14001 / ISO 14064**, rare sur le marché local,
- Une capacité à produire des **livrables visuellement professionnels** (cartes SIG, tableaux de bord, visualisations dynamiques),
- Une **souplesse organisationnelle** permettant d'adapter les prestations selon la taille, le budget et les priorités du client.

Cette combinaison d'atouts permet au bureau de répondre à des **besoins insatisfaits**, que ce soit en matière de certification environnementale, d'audits carbone, ou de mise en conformité intégrée.

3. Barrières à l'entrée et opportunité stratégique

Le domaine ciblé présente également des **barrières à l'entrée naturelles**, qui limitent l'émergence de nouveaux concurrents spécialisés :

- La **maîtrise des outils techniques** (SIG, SimaPro, QGIS, GABI) nécessite une formation spécifique,

- La **compréhension des référentiels réglementaires** (nationaux et internationaux) implique une veille constante et une expertise juridique,
- La **confiance institutionnelle** se construit dans la durée, via des livrables sérieux, des partenariats crédibles et une posture éthique.

Ainsi, le bureau bénéficie d'une **fenêtre stratégique** pour s'imposer comme **acteur de référence** dans son domaine. En développant une **marque professionnelle forte**, en entretenant un **réseau actif avec les institutions**, et en misant sur la **qualité technique des livrables**, il pourra durablement conserver une **position de leader sur sa niche**.

3.3 Stratégie marketing

La mise en place d'une stratégie marketing claire et ciblée est un levier essentiel pour assurer la visibilité, la crédibilité et la croissance du bureau d'étude. Contrairement à des produits physiques, les **prestations environnementales** reposent sur la **confiance**, l'**expertise démontrée**, et la **capacité à répondre à des enjeux techniques spécifiques**. Il est donc fondamental de développer une communication professionnelle et crédible, adaptée au public visé (entreprises, institutions, collectivités). La stratégie marketing du bureau s'articule autour de quatre axes principaux, complémentaires et cohérents :

1. Création d'un site vitrine professionnel et interactif

Le premier pilier de la communication du bureau repose sur la **mise en ligne d'un site internet professionnel**, conçu comme une **vitrine digitale** de ses compétences, services et réalisations. Ce site ne se limitera pas à une présentation institutionnelle, mais comprendra :

- Une **présentation claire des prestations** proposées (audits, ACV, assistance ISO, etc.)
- Des **études de cas anonymisées** illustrant des interventions réussies
- Un espace de **publication d'articles techniques et d'analyses réglementaires**
- Un module de **prise de contact rapide** (formulaire, messagerie directe)
- Une **base documentaire téléchargeable** : fiches ISO, guides réglementaires, infographies

Ce site contribuera à **asseoir la crédibilité** du bureau dès les premiers contacts, et servira de **porte d'entrée stratégique** pour les clients institutionnels, industriels ou académiques.

2. Réseautage à travers conférences, forums et salons professionnels

Le second axe de communication repose sur une **présence active dans les événements spécialisés**, tels que les **conférences sur l'eau et l'environnement**, les **salons professionnels**, les **forums sur la durabilité** ou encore les **journées scientifiques universitaires**.

Ces événements permettent de :

- **Rencontrer des clients potentiels** et des partenaires techniques
- **Présenter les services** du bureau dans des contextes professionnels
- **Observer les tendances du marché** et les besoins émergents

- **Participer à des tables rondes** ou ateliers techniques pour renforcer l'image d'expertise

La participation régulière à ce type d'événements favorisera le **bouche-à-oreille professionnel** et facilitera l'intégration du bureau dans les **réseaux nationaux et régionaux** de l'environnement, de l'industrie et de l'ingénierie.

3. Publication de contenus techniques et études de cas

Pour affirmer sa **légitimité scientifique et technique**, le bureau s'engage à produire et diffuser des **contenus spécialisés** à forte valeur ajoutée, à travers différents supports :

- **Notes techniques** sur des normes environnementales (ISO, seuils algériens, etc.)
- **Études de cas anonymisées**, illustrant les résultats obtenus chez des clients (avant/après)
- **Articles vulgarisés** pour les décideurs (directeurs techniques, responsables QHSE, etc.)
- **Webinaires ou vidéos explicatives courtes**, accessibles depuis le site ou les réseaux

Cette production régulière de contenu permet non seulement de **créer de la confiance**, mais aussi de **se différencier de la concurrence**, souvent limitée à une approche commerciale. Elle servira aussi à **nourrir le référencement naturel** du site internet (SEO) et à capter de nouveaux clients à travers des recherches ciblées.

4. Démarchage ciblé et prospection directe

Enfin, une stratégie de **prospection directe** sera mise en place pour toucher les **opérateurs industriels prioritaires**, identifiés sur la base de critères stratégiques (niveau de risque environnemental, obligations réglementaires, situation géographique, taille).

Le démarchage se fera sous plusieurs formes :

- **Envoi de courriers personnalisés** avec plaquette de présentation
- **Prise de contact téléphonique** ou via LinkedIn avec les responsables environnement / QHSE
- **Visites sur site** pour évaluer les besoins et proposer des solutions sur mesure
- **Participation à des appels d'offres publics ou privés**

Cette approche personnalisée vise à établir une **relation de confiance directe avec les décideurs**, à détecter des **besoins latents** et à générer un **flux régulier de missions** pour assurer la viabilité économique du bureau.

Quatrième axe: Organisation et production

L'organisation du bureau s'appuiera sur une équipe de base composée de cinq profils : un chef de projet environnemental (responsable technique et commercial), un ingénieur procédés, un analyste spécialisé en ACV et empreinte carbone, un expert réglementaire (en freelance ou consultant), et un assistant administratif. Cette équipe assurera une couverture complète des besoins du client, depuis la collecte de données sur le terrain jusqu'à la remise du rapport et au suivi post-audit.

La production des services suivra un schéma rigoureux : mission sur site (entretiens, prélèvements, observation), traitement des données et analyses au bureau (grilles de conformité, modélisation), rédaction des livrables (rapport technique, synthèse client), puis accompagnement à la mise en œuvre et aux démarches de certification. Si nécessaire, des partenaires techniques (laboratoires, experts sectoriels) seront sollicités ponctuellement.

Les moyens matériels comprendront des postes informatiques performants, des logiciels spécialisés (QGIS, SimaPro, Excel avancé), un système de sauvegarde en ligne, ainsi que du matériel léger pour les visites de terrain (GPS, fiches de relevé, appareils photo, etc.).

Le bureau s'installera dans un local professionnel, accessible, permettant de recevoir des clients et de travailler en équipe. Il fonctionnera sur un mode semi-numérique, avec une base documentaire interne, des outils de planification partagée, et des modèles standardisés de rapports, mais toujours adaptables.

4.1 Processus de production

Le **processus de production** du bureau d'étude repose sur une **méthodologie rigoureuse et séquencée**, adaptée aux exigences des projets environnementaux. Il suit une démarche logique, combinant **travail de terrain, analyses techniques et réglementaires**, et **accompagnement personnalisé**, afin de garantir à chaque client une **intervention complète, fiable et conforme aux standards internationaux**. Voici les étapes clés du processus :

1. Visite sur site et collecte de données

Toute mission commence par une **visite de terrain**, essentielle pour comprendre le fonctionnement réel de l'installation et identifier ses impacts environnementaux potentiels. Cette étape inclut:

- Des **entretiens** avec les responsables techniques ou environnementaux du site,
- L'**observation directe** des procédés (production, traitement, rejet),
- La **vérification documentaire** (autorisations, registres, plans, protocoles),
- La **collecte de données primaires** (débits, consommations, relevés sur site, etc.),
- Éventuellement, des **prélèvements d'échantillons** si le contrat le prévoit.

Cette phase permet de **contextualiser l'étude**, d'identifier les écarts éventuels avec la réglementation, et de poser les bases d'un audit crédible.

2. Analyse technique et réglementaire

Les données collectées sont ensuite **analysées en profondeur** au sein du bureau. Cette analyse croise plusieurs dimensions :

- L'**analyse technique** : évaluation de la performance des équipements, de l'efficacité des systèmes de traitement, du comportement des rejets, etc.
- L'**analyse réglementaire** : comparaison avec les normes nationales (algériennes) et internationales (ISO, conventions maritimes, etc.).
- L'**évaluation environnementale** : identification des impacts significatifs (eau, air, sol, biodiversité, bruit) et quantification (si possible) de leur gravité ou fréquence.
- L'**analyse de conformité ISO** (si le client vise une certification ou un alignement volontaire).

Des **grilles d'évaluation standardisées**, des logiciels de simulation (SIG, ACV, GES) et des bases réglementaires à jour sont utilisés pour garantir la rigueur de l'analyse.

3. Rédaction de rapports et recommandations

Une fois les analyses finalisées, un **rapport professionnel structuré** est rédigé. Il comprend :

- Un **état des lieux** technique et réglementaire,
- Une **cartographie des non-conformités** ou des zones à risque,
- Une **synthèse des impacts environnementaux** identifiés,
- Des **recommandations opérationnelles** (immédiates, à moyen terme, à long terme),
 - Si nécessaire, un **plan de mise en conformité** ou un **plan de gestion environnementale**,
 - Des annexes techniques (relevés, cartes, tableaux comparatifs, photos...).

Ce rapport constitue le **principal livrable** de la mission. Il est présenté au client sous format **papier et numérique**, avec possibilité d'en discuter les points clés lors d'une réunion de restitution.

4. Suivi post-audit et assistance à la mise en conformité

Le bureau ne se limite pas à la production d'un rapport. Il propose également un **suivi post-audit**, afin d'**accompagner le client dans la mise en œuvre des recommandations**. Cela peut inclure :

- La **priorisation des actions à entreprendre**,
- La **rédaction de procédures internes** (gestion des déchets, rejets, sécurité...),
- L'**assistance à la demande de certification ISO 14001 ou 14064**,
- L'**élaboration d'indicateurs de suivi** et de tableaux de bord environnementaux,
- L'**animation de sessions de formation** pour le personnel.

Ce suivi garantit une **amélioration continue**, une montée en compétence du client, et une consolidation durable de la conformité environnementale.

4.2 Approvisionnement

Le bon fonctionnement du bureau repose sur un **approvisionnement ciblé en ressources matérielles, logicielles et logistiques**, nécessaires à la conduite des missions. Ces ressources sont choisies en fonction de leur **pertinence technique**, de leur **compatibilité avec les standards internationaux**, et de leur **adaptabilité à différents types de projets**.

1. Logiciels spécialisés

L'équipe s'appuiera sur un ensemble de **logiciels professionnels**, indispensables pour garantir la qualité et la fiabilité des analyses :

- **SimaPro** ou **Gabi** : pour la réalisation d'**analyses de cycle de vie (ACV)**, permettant de quantifier les impacts environnementaux globaux des procédés industriels.
- **QGIS** : pour la **cartographie SIG**, la spatialisation des données, la modélisation des panaches de rejets (en mer, en rivière, etc.) et l'analyse des zones sensibles.
- **Excel avancé** ou **Power BI** : pour la création de **tableaux de bord**, l'automatisation des calculs réglementaires, la visualisation dynamique des indicateurs.

Ces logiciels feront l'objet de **formations internes** pour garantir leur bonne utilisation par l'équipe.

2. Matériel d'échantillonnage et de mesure

Même si la plupart des analyses seront externalisées à des laboratoires accrédités, le bureau disposera de **matériel léger de prélèvement** pour les visites sur site, notamment :

- Des **flacons stériles et chaînes de froid** pour prélèvements d'eau ou d'effluents,
- Des **sondes portables** (pH, température, conductivité, salinité),
- Des **GPS et appareils photo** pour le repérage et la documentation.

Ces outils sont essentiels pour garantir une **traçabilité** et une **qualité des données de terrain**, même avant l'intervention de partenaires spécialisés.

3. Fournitures de bureau, hébergement cloud et maintenance informatique

Le bureau aura besoin d'un **équipement bureautique fiable**, incluant :

- Des **ordinateurs performants**, imprimantes, scanners A3, routeurs,
- Des **fournitures classiques** (classeurs, papier, supports de présentation, etc.),
- Un **système de sauvegarde cloud sécurisé**, pour archiver les projets et partager les fichiers avec les clients,
- Un **contrat de maintenance informatique**, pour assurer la stabilité technique et la protection des données confidentielles.

Un soin particulier sera apporté à la **gestion documentaire** et à la **sécurisation des informations sensibles**, éléments critiques dans les missions de conseil environnemental.

4.3 Ressources humaines

- 1 Chef de projet environnemental
- Ingénieurs procédés

- Analystes ACV/carbone
- Expert réglementaire (freelance possible)
- Assistant administratif

4.4 Partenaires

- Universités/ENSSMAL pour stage ou recherche
- Laboratoires accrédités pour analyses
- Experts indépendants certifiés
- Fournisseurs d'outils de modélisation marine

Cinquième axe: Plan financier

Le plan financier du projet repose sur une structure de charges réaliste et des prévisions de revenus solides.

Les principales dépenses concernent d'abord la masse salariale de l'équipe, estimée à 7 500 000 DA par an. Viennent ensuite l'équipement informatique et bureautique (1 200 000 DA), les logiciels et licences spécialisés (800 000 DA), les frais de déplacement et missions terrain (1 200 000 DA), les frais de fonctionnement (loyer, internet, électricité, assurances – 1 000 000 DA), les dépenses de communication et marketing (700 000 DA), et un montant dédié aux imprévus et à la maintenance (300 000 DA). Le total des charges annuelles s'élève ainsi à **12 700 000 DA**.

Pour couvrir ce montant, plusieurs sources de financement sont prévues : 2 000 000 DA en fonds propres du porteur de projet, 4 000 000 DA sous forme de crédit bancaire professionnel, 1 500 000 DA à travers un appui d'incubateur ou subvention environnementale, et 5 200 000 DA recherchés auprès d'organismes publics ou privés soutenant l'entrepreneuriat vert.

Les revenus escomptés pour la première année proviennent de la vente de prestations : audits (500 000 DA × 12 = 6 000 000 DA), évaluations de l'empreinte carbone (400 000 DA × 10 = 4 000 000 DA), accompagnement à la certification ISO (700 000 DA × 5 = 3 500 000 DA), et formations réglementaires (100 000 DA × 15 = 1 500 000 DA). Le chiffre d'affaires total estimé est de **15 000 000 DA**, ce qui permet de dégager un **bénéfice net prévisionnel de 2 300 000 DA**.

Ce résultat positif, associé à une bonne gestion et une montée en charge progressive, garantit la viabilité économique du bureau dès sa première année d'activité.

5.1 Charges et dépenses estimées (1ère année)

Poste de dépense	Montant (DA)
Équipement informatique (PC, scanner, GPS, modem)	1 200 000
Logiciels & licences (SimaPro, Gabi, QGIS, ISO)	800 000
Salaires annuels (5 personnes)	7 500 000
Déplacements & interventions terrain	1 200 000
Location, électricité, internet, assurances	1 000 000

Poste de dépense	Montant (DA)
Communication, marketing, web	700 000
Divers (maintenance, imprévus)	300 000
Total charges estimées	12 700 000 DA

5.3 Revenus prévisionnels (année 1)

Service	Prix unitaire (DA)	Qté	Total
Audit environnemental complet	500 000	12	6 000 000
Évaluation empreinte carbone + rapport	400 000	10	4 000 000
Accompagnement à la certification ISO	700 000	5	3 500 000
Formation réglementaire environnement	100 000	15	1 500 000
Chiffre d'affaires estimé			15 000 000 DA
Bénéfice prévisionnel			+ 2 300 000 DA

Tableau récapitulatif: Business Model Canvas

Élément	Contenu
Partenaires clés	Universités, laboratoires, fournisseurs logiciels, consultants ISO
Activités clés	Audits, calcul carbone, EIES, accompagnement, formations
Valeur ajoutée	Expertise sectorielle, conformité réglementaire, innovation environnementale
Relation client	Suivi sur mesure, disponibilité, communication continue
Segments clients	Stations de dessalement, autorités environnementales, bureaux d'études
Ressources clés	Équipe technique, logiciels, réseau de partenaires, expertise spécialisée
Canaux	Appels d'offres, site web, réseautage, publications, salons
Structure de coûts	Salaires, équipements, déplacements, logiciels, location
Sources de revenus	Prestations d'audit, consulting ISO, formations, rapports carbone