

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique
Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Filière : QHSE-GRI



ABENGOA

Mémoire de Projet de Fin d'Etude
en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en QHSE-GRI

Etude de la qualité d'eau potable provenant de la station de dessalement d'eau de mer Unión
Temporal de Empresas DESSALADORA Operación y Mantenimiento Ténès, et mise en
conformité avec la norme ISO 22000 par l'application de l'HACCP

Présenté par : BECETTI Yousra

Encadrement :

Mme. S. BENTAALLA-KACED	Maitre de conférences Classe B.	ENP
M. A. CHERGUI	Professeur	ENP
Mme F. KEDARI	Intervenante Externe	ENP
M. R. SEFTA	Manager HSE	DESSALADORA OyM

Présenté et soutenu publiquement le 01 juillet 2025 devant le jury composé de :

M. H Yousfi	Professeur	ENP	Président
M A. BENMOKHTAR	Maitre de conférences Classe A.	ENP	Examineur
M M. SENOUCI-BEREKSI	Maitre de conférences Classe B.	ENP	Examineur
Mme. S. BENTAALLA-KACED	Maitre de conférences Classe B.	ENP	Encadrante
M. A. CHERGUI	Professeur	Enp	Encadrant
Mme F. KEDARI	Intervenante Extérieure	ENP	Encadrante

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique
Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Filière : QHSE-GRI



ABENGOA

Mémoire de Projet de Fin d'Etude
en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en QHSE-GRI

Etude de la qualité d'eau potable provenant de la station de dessalement d'eau de mer Unión
Temporal de Empresas DESSALADORA Operación y Mantenimiento Ténès, et mise en
conformité avec la norme ISO 22000 par l'application de l'HACCP

Présenté par : BECETTI Yousra

Encadrement :

Mme. S. BENTAALLA-KACED	Maitre de conférences Classe B.	ENP
M. A. CHERGUI	Professeur	ENP
Mme F. KEDARI	Intervenante Externe	ENP
M. R. SEFTA	Manager HSE	DESSALADORA OyM

Présenté et soutenu publiquement le 01 juillet 2025 devant le jury composé de :

M. H Yousfi	Professeur	ENP	Président
M A. BENMOKHTAR	Maitre de conférences Classe A.	ENP	Examineur
M M. SENOUCI-BEREKSI	Maitre de conférences Classe B.	ENP	Examineur
Mme. S. BENTAALLA-KACED	Maitre de conférences Classe B.	ENP	Encadrante
M. A. CHERGUI	Professeur	Enp	Encadrant
Mme F. KEDARI	Intervenante Extérieure	ENP	Encadrante

الملخص:

يسعى العالم الحديث الى تحقيق الامن المائي لتلبية الاحتياجات المتزايدة للسكان لاستخدامات عديدة: غذائية، منزلية، صناعية وغيرها يتطلب هذا الهدف إدارة دقيقة للجوانب الصحية، التقنية، المعيارية والتكنولوجية. يتناول هذا البحث هذه المحاور من خلال دراسة عملية تحلية مياه البحر، مع توظيف أدوات ال HACCP، AMDEC، ومعيار 22000 وصولا لبرامج المراقبة لتعزيز السلامة الصحية للمياه المنتجة. الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، HACCP، AMDEC، ISO 22000، السلامة الصحية.

Abstract:

Modern societies seek to ensure water security to meet the growing needs of populations (nutritional, industrial domestic uses, etc.). This objective requires strict management of sanitary, technical, normative, and technological dimensions.

This thesis explores these aspects through a study of seawater desalination, using tools such as HACCP, FMEA, and the ISO 22000 by the use of monitoring software or digital tracking platforms standard to enhance the sanitary safety of the produced water.

Keywords: Desalination, FMEA, HACCP, ISO 22000, Water safety.

Résumé :

Le monde moderne cherche à garantir la sécurité hydrique pour répondre aux besoins croissants des populations (faits nutritionnels, domestiques, etc.). Cet objectif repose sur une gestion rigoureuse des aspects sanitaires, techniques, normatifs et technologiques.

Ce mémoire aborde ces dimensions à travers l'étude du dessalement de l'eau de mer, en intégrant des outils d'évaluation tels que l'AMDEC, le HACCP, et la norme ISO 22000, s'appuyant sur des logiciels de surveillance ou des plateformes numériques de suivi afin de renforcer la sécurité sanitaire de l'eau produite.

Mots-clés : Dessalement, HACCP, AMDEC, ISO 22000, Sécurité sanitaire.

Remerciement

Avant toute chose, je tiens à exprimer, avec une sincérité profonde, toute ma gratitude envers celles et ceux qui m'ont accompagné tout au long de ce projet de fin d'études. Au-delà d'un travail académique, ce mémoire a été une expérience humaine marquante, rendue possible grâce à l'implication, la confiance et la bienveillance de nombreuses personnes.

À **Madame S. BENTAALLA-KACED**, je tiens à adresser une reconnaissance toute particulière. Au-delà de son rôle d'encadrante, elle a été pour moi une présence constante, rassurante, et profondément humaine. Sa patience, et sa Son regard critique, Elle a su, avec discrétion et bienveillance, semer la confiance là où elle manquait, et transformer les obstacles en leçons de persévérance. Je lui dois bien plus que des remerciements formels — je lui dois une part de l'aboutissement de ce travail, et je ne l'oublierai pas.

À **Madame F. KEDARI**, pour la justesse de ses remarques, son exigence constructive. Grâce à elle, ce projet a pris une dimension plus aboutie, plus cohérente, son écoute authentique et ses conseils toujours justes m'ont porté dans les moments de doute, m'ont aidé à garder le cap lorsque la fatigue ou l'incertitude prenaient le dessus. et je lui en suis profondément reconnaissant(e).

À **Monsieur A. CHERGUI**, pour sa grande disponibilité, sa clarté d'analyse et son accompagnement . Ses conseils concrets et son expérience ont été d'un apport considérable. Sa confiance a renforcé ma motivation et m'a permis d'aborder les étapes les plus complexes avec assurance.

Je tiens également à remercier de tout cœur mon **encadrant professionnel, Monsieur R. SEFTA**, pour son accueil au sein de **UTE Desaladora OyM**, sa bienveillance sur le terrain, et sa précieuse guidance. Son approche pratique, ses conseils avisés et sa patience m'ont permis de confronter mes connaissances théoriques à la réalité du terrain, dans un esprit de professionnalisme et de partage. Je garderai un excellent souvenir de cette expérience.

J'adresse ensuite mes plus sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail :

À **Monsieur le Président du jury, H. Yousfi**, pour sa lecture attentive et ses remarques enrichissantes,

À **Monsieur A. BENMOKHTAR** et **Monsieur M. SENOUCI-BEREKSI**, examinateurs, pour leurs observations pertinentes et leur regard bienveillant.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur le Chef du Département **M. Mohamed BOUBAKEUR** ainsi qu'à **l'ensemble des enseignants du département MRIE**, pour la rigueur académique et les conseils qui ont enrichi mon parcours, tant sur le plan scientifique que personnel.

Je souhaite également exprimer une gratitude toute particulière à Monsieur l'Adjoint Technique du département **Reda Bourdjoul** , dont le soutien constant, la générosité et

l'esprit de service ont grandement facilité notre quotidien. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance la plus profonde : **il mérite tout le bonheur et toutes les belles choses que la vie peut lui offrir.** A toutes ces personnes, je dis merci. Ce mémoire est aussi un peu le vôtre.

Dédicace

À Dieu, le Tout-Puissant, mon refuge dans les tempêtes silencieuses, ma force quand plus rien ne faisait sens. Dans les moments où l'envie d'abandonner prenait le dessus, c'est vers Toi que mon cœur se tournait. Sans Ta lumière, je n'aurais jamais trouvé le chemin.

À moi-même. À cette fille qui a tenu bon, qui a porté ce projet jusqu'à la dernière seconde, malgré le poids, malgré le doute. À celle qui a continué à avancer, fière, forte, libre. À la jeune femme que je suis devenue, façonnée par la douleur, la solitude, mais surtout par la foi, l'amour et la volonté.

À ma famille, qui a cru en moi même quand je doutais de moi-même. Votre amour silencieux a été mon abri.

À tous ceux et celles qui m'ont donné la force de continuer, parfois sans le savoir. Un mot, une présence, un simple regard ont parfois suffi à rallumer la flamme.

À mes nuits blanches, à mes larmes cachées, à mes prières murmurées dans le noir... Vous êtes devenues des pierres solides sous mes pas tremblants.

Et à vous tous...Merci.

Ce travail est bien plus qu'un mémoire, c'est une partie de mon âme.

Table des matières

Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Liste des Plans	
Liste des Abréviations	
Introduction Générale	14
Chapitre I :Généralité sur la station OyM	
I.1 Introduction :	17
I.2. Présentation de la station de dessalement :	17
I.3. Processus de dessalement de la station Desaladora OyM :	19
I.3.1. Première étape : Capture de l'eau de mer	21
I.3.2. Deuxième étape : Prétraitement.....	22
I.3.2.a. Prétraitement physique :	22
(ii). Filtrations à cartouche :	23
I.3.2.b. Prétraitement chimique.....	24
(ii) Coagulation – Flocculation :	24
(iii). Dosage de métabisulfite :	24
(iv). Dosage d'inhibiteur anti-scalant :	25
I.3.3. Troisième étape : l'osmose inverse :	25
I.3.4. La Reminéralisation :	27
I.3.5 Stockage et Désinfection avant Distribution :	29
I.4 Cadre réglementaire de la qualité de l'eau :	31
I.4.1. Normes algériennes :	31
I.4.2 Normes internationales (OMS) :	32
I.4.3. Comparaison entre les normes :	33
I.4 Conclusion :	34
Chapitre II : Analyse Processus par l'approche AMDEC	
II.1 Introduction :	36
II.2 Présentation de la méthode AMDEC :	36
II.2.1 Justification du choix de AMDEC - Processus :	37
II.3. Application de la méthode AMDEC au processus de dessalement :	37
II.3.1. Découpage fonctionnel du procédé :	37
II.3.2. Identification des fonctions et des défaillances possibles :	38
II.3.3. Cotation des défaillances	38

II.3.4. Élaboration du tableau AMDEC	40
II.3.5 Interprétation de graphique circulaire :	44
II.4 Étude qualitative des impacts des défaillances sur la qualité de l'eau.....	46
II.4.1 Captage d'eau de mer.....	46
II.4.2. Deuxième étape : prétraitement	48
(ii). Filtrations à cartouche :	48
II.4.2.b. Prétraitement chimique.....	49
(ii). Coagulation-Floculation	50
(iii). Dosage métabisulfite :	50
(iv) Dosage inhibiteur anti-scalant :	51
II.4.3. Troisième étape : Osmose inverse	51
II.4.4. Quatrième étape :Reminéralisation.....	52
II.4.5 Cinquième étape : Stockage et distribution :	53
II.5. Analyses des impacts des défaillances sur les paramètres critique d'eau :	54
II.5.1. Voie chimique :	54
II.6.2. Voie biochimique :	54
II.6. Conclusion :	55
Chapitre III : Étude sanitaire par l'approche HACCP	
III.1 Introduction :	57
III.2.Présentation générale de la méthode HACCP :	57
III.2.1 Principes et étapes de la méthode :	57
1. Constituer une équipe HACCP.....	58
2. Décrire le produit.....	58
3. Identifier l'utilisation prévue.....	58
4. Élaborer un diagramme de fabrication.....	58
5. Vérifier le diagramme sur site	58
6. Analyser les dangers (Principe 1)	58
7. Identifier les points critiques pour la maîtrise (CCP) (Principe 2)	59
III.2.2.a Interprétation de l'arbre de décision	60
8. Établir des limites critiques pour chaque CCP (Principe 3)	60
9. Établir un système de surveillance pour chaque CCP (Principe 4)	60
10. Établir des actions correctives (Principe 5).....	60
11. Mettre en place des procédures de vérification (Principe 6)	60
12. Tenir des registres et une documentation (Principe 7)	61
III.3 Démarches HACCP pour la station de dessalement.....	61

Étape1- Constituer une équipe HACCP :.....	61
Étape2 Description du produit :	61
Étape 3. Définir l'utilisation prévue :	62
Étape 4. Élaborer un diagramme de fabrication	63
Étape 5. Vérification sur place du diagramme de processus	63
Étape 6. Analyser les dangers (Principe 1) :	64
(i) Matrice d'impact (gravité (G))	64
(ii) Matrice de la probabilité (fréquences (F))	66
Consolidation des étapes 8 à 11 de la méthode HACCP : Analyse complète des CCP identifiés	81
Etape 12. Constitution d'un système documentaire et enregistrement des données.	95
Etape12.1 :Application dans le contexte du dessalement de l'eau de mer OyM :....	95
III.4 Conclusions :	97
Chapitre IV : Engagement vers la norme ISO 22000_Toc203743092	
IV.1 Introduction	99
IV2 Présentation de la norme ISO 22000 :.....	99
IV21 Définition et champs d'application :.....	99
IV22 Objectifs et bénéfices du SMSDA :.....	99
IV23. Principes du SMSDA :	100
IV3 Principes fondamentaux de la norme ISO 22000	100
IV31 Structure de la norme (HLS)	100
IV32 Approche processus et cycle PDCA:	101
IV4 mises en place de la norme iso-22000 au sein de DESALADORA OyM :	101
IV41. Matrice SWOT de l'engagement d'une station de dessalement vers la norme ISO 22000	101
IV42 Plan d'Actions SWOT - Engagement ISO 22000 Station de Dessalement :	103
IV42a Principes clés du classement :.....	103
IV.4.2.b. Conclusion du plan :	107
IV5 Application pratique de la norme ISO 22000 : Approche par check List.....	107
Interprétation :	111
IV51 Synthèse de l'évaluation HACCP et stratégie de mise en conformité ISO 22000.....	111
IV.5.2. Synthèse quantitative des écarts.....	115
IV.5.2. Conclusion stratégique :	116
IV6 les pratiques d'analyse du laboratoire dans le contrôle de la qualité de l'eau	116
IV.6.1.Gestion et traçabilité des résultats	116

IV.7	Comparaison analytique : mise en perspective de la qualité de l'eau dessalée	117
IV.61	Objectif et intérêt de l'analyse comparative :	117
IV.62	– Méthodologie et codification de l'analyse :	117
IV.63	conclusions d'analyse	122
IV.7	Conclusion	122
Chapitre V : Logiciel de surveillance		
V1	Introduction	124
V2	Architecture générale de la plateforme de monitoring:	124
V21.	Base de données normative (OMS) :	124
V22	Saisie manuelle des données :	126
V23.	Analyse automatique des données entrées :	128
V23a	Génération d'un graphique comparatif :	129
V23b	Création d'un rapport en format PDF :	130
V3.	Matrice SWOT :	130
V2	Le Business Model Canvas (BMC):	132
V3.	Estimation budgétaire économique du développement logiciel	134
V4.	Conclusion	134
Conclusion Générale		136
Références		139
ANNEXES		142

Liste des Figures

Figure I.1 : Situation géographique de la station de dessalement UTE Desaladora Ténès [1]	17
Figure I.2 : les partenaires clés de la station de dessalement UTE Desaladora Ténès	18
Figure I.3 : Architecture organisationnelle de l'unité de dessalement	19
Figure I.4 : Illustre le schéma global du processus de dessalement par osmose inverse de la station OyM (auteur).....	20
Figure I.5: Photo sous-marine des conduites de captage en PRFV.....	21
Figure I.6 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les deux filtres Beaudry pour la filtration primaire (filtration mécanique).....	21
Figure I.7 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les bassins de filtres à sable	22
Figure I.8 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les pompes HP intermédiaires	23
Figure I.9 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les filtres à cartouches	23
Figure I.10 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les cuves de dosage de l'antitartre (Métabisulfite)	25
Figure I.11 : photo prise dans la station de dessalement illustrant le rack d'osmose inverse.....	26
Figure I.12 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les silos de stockage de CaCO_3	28
Figure I.13 : photo prise dans la station de dessalement illustrant le saturateur de $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O}$	29
Figure I.14 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les pompes HP pour la distribution de l'eau produite.....	29
Figure I.15 : photo illustrant le réservoir de stockage de l'eau dessalée produite.....	29
Figure I.16 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les pompes HP pour la distribution de l'eau produite	29
Figure I.17 : photo illustrant le réservoir de stockage de l'eau dessalée produite.....	30
Figure II.18 : Représentation circulaire de la répartition des modes de défaillance identifiés dans l'analyse AMDEC selon leur fréquence.....	44
Figure III.19 : Arbre de décision pour l'identification des CCP (Codex Alimentarius, Section 4.5)	59
Figure III.20 : Chaîne de traitement de l'eau de mer par dessalement.....	63
Figure III.21 : matrice de criticité de risque 5x5.....	64
Figure III.22 : Illustration les points critique du processus de dessalement d'eau de mer en eau potable (Auteur).....	80
Figure IV.23 : Évaluation des performances analyses de l'iso-22000 : conformité des résultats	111
<i>Figure IV.24 : Comparaison des paramètre physico-chimiques de différentes eaux analysées par rapport aux recommandations de l'OMS.....</i>	120
Figure V.25 : Interface principale du logiciel	125
Figure V.26 : Interface de saisie manuelle des résultats de la station de dessalement	127
Figure V.27 : Les trois boutons fonctionnels du prototype	128
Figure V.28 : Affichage du diagnostic automatique avec codage couleur	129
Figure V.29 : Affichage des recommandations de la situation vécue	129
Figure V.30 : Graphique de comparaison entre les normes OMS et les données réelles, avec écarts signalés	130
Figure V.31 : Graphique de comparaison entre les normes OMS et les données réelles, avec écarts signalés	130
Figure V.32 : Modélisation stratégique du prototype sous forme de Business Model Canvas (BMC)	133
Figure V.33 : Modélisation stratégique du prototype sous forme de Business Model Canvas (BMC)	133
Figure V.34 : Modélisation stratégique du prototype sous forme de Business Model Canvas (BMC)	133
Figure II.35 : Représentation circulaire de la répartition des modes de défaillance identifiés dans l'analyse AMDEC selon leur fréquence.....	124
Figure II.36 : Représentation circulaire de la répartition des modes de défaillance identifiés dans l'analyse AMDEC selon leur fréquence.....	156

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Exigences réglementaires algériennes en matière de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine (Décret exécutif n°11-125).....	31
Tableau I.2 : Valeurs guides de l'OMS concernant les paramètres clés de la qualité de l'eau potable	33
Tableau II.1 : Échelles de gravité des effets de la différence (G)	39
Tableau II.2 : Échelles de fréquence d'apparition de la défaillance (F).....	39
Tableau II.3: Échelles de fréquence d'apparition de la défaillance (D).	39
Tableau II.4: Tableau d'Évaluation des Risques par Criticité et Actions Requises.	40
Tableau II.5 : Synthèse des défaillances critiques selon la méthode AMDEC appliquée au traitement par osmose inverse.....	41
Tableau II.6 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite étape de captage d'eau de mer - captage d'eau de mer [15–18].....	46
Tableau II.7 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite - Filtration à sable [16,17]	48
Tableau II.8 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite- Filtrations à cartouche[18,19]	48
Tableau II.9 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite- Désinfection [15,16].....	49
Tableau II.10 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite - Coagulation-Floculation [15,16]	50
Tableau II.11 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite - Dosage métabisulfite [13,18]	50
Tableau II.12 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite - Dosage inhibiteur anti-scalant [16]	51
Tableau II.13 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite - Osmose inverse [15,16,17].....	51
Tableau II.14 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite – Reminéralisation [10,11,15,16]	52
Tableau II.15 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico-chimique et biochimique de l'eau produite - Stockage et distribution [15,17]	53
Tableau III.1 : Les caractéristiques du produit par la station de dessalement d'eau de mer OyM.....	62
Tableau III.2 : Échelle de gravité (G) des dangers.....	65
Tableau III.3 : Échelle de fréquence (F) des dangers.....	66
Tableau III.4 : Analyse des Dangers, Cotations de Risque et Mesures Préventives pour une Station de Dessalement d'Eau de Mer (Étape 6 HACCP)	67
Tableau III.5 : Identification des points critiques de contrôle (CCP) selon l'arbre de décision HACCP (étape 7).....	77
Tableau III.6 : Etude HACCP global des points critiques du procédé de dessalement.....	81
Tableau IV.1 : matrice SWOT de l'engagement de la station de dessalement ver l'iso 22000.....	102
Tableau IV.2 : Plan d'action issu de la matrice SWOT de l'engagement de la station de dessalement vers la norme ISO 22000	104
Tableau IV.3 : Évaluation consolidée de la conformité aux exigences de l'ISO 22000	108
Tableau IV.4 : Analyse globale consolidée du niveau de conformité aux exigences ISO 22000	110
Tableau IV.5 : Évaluation croisée de la conformité ISO 22000 et de l'impact de l'étude HACCP.....	113
Tableau IV.6 : Analyse des écarts et priorités pour la mise en conformité ISO -22000.....	115
Tableau IV.7 : Comparaison des paramètres physico-chimiques des eaux analysées avec les normes de l'OMS.....	118
Tableau IV.8 : Analyse d'eau pour les marques d'eau étudiées	121
Tableau V.1 : Matrice SWOT du prototype de plateforme de surveillance de la qualité de l'eau dessalée	131
Tableau V.2 : Estimation budgétaire du prototype	134

Liste des Plans

- Plan I.1 les partenaires clés de la station de dessalement UTE Desaladora Ténès
- Plan I.2: Architecture organisationnelle de l'unité de dessalement

Liste des Abréviations

- THM : Trihalométhanes
- SDI : Indice de colmatage (Silt Density Index)
- TDS : Solides dissous totaux (Total Dissolved Solids)
- TSS : Solides en suspension totaux (Total Suspended Solids)
- CFU : Unités Formant Colonies (Colony Forming Units)
- EDTA : acide éthylènediaminetétraacétique
- AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
- HACCP : Hazard Analysis and Critical Control Points (Analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise).
- OI : Osmose inverse
- ISO : International Organization for Standardization

Introduction Générale

L'eau est une ressource vitale, indispensable à la vie et à tous les secteurs clés de la société humaine. Sa gestion durable est devenue un enjeu indispensable pour l'équilibre environnemental, économique et sanitaire mondial. Pourtant, le monde fait face à une crise hydrique majeure. En 2023, près de 703 millions de personnes n'avaient pas accès à une source d'eau de base, et plus de 2 milliards étaient privées de services d'eau potable sécurisés (ONU, 2023) [1]. À l'horizon 2030, 1,8 milliard de personnes pourraient vivre en situation de pénurie absolue, et la moitié de la population mondiale sera exposée à un stress hydrique sévère.

L'Algérie n'échappe pas à cette réalité. Le pays subit une pression croissante sur ses ressources en eau, accentuée par la baisse des précipitations, le dérèglement climatique, la croissance démographique et des difficultés de gestion. En juin 2024, la ville de Tiaret a connu de vives protestations à la suite de longues coupures d'eau, illustrant concrètement la gravité de la situation [2].

Afin de répondre durablement aux défis posés par la crise hydrique, les autorités algériennes ont engagé une stratégie axée sur le dessalement de l'eau de mer. Depuis 2025, sept stations utilisant la technologie de l'osmose inverse ont été mises en service, portant la capacité nationale de production à 3,7 millions de m³ par jour. Si cette initiative a déjà produit des résultats concrets, la quantité ne suffit pas à elle seule : l'enjeu majeur réside dans la garantie d'une qualité sanitaire et environnementale conforme aux normes, accompagnée d'un système de contrôle transparent inspirant la confiance des usagers.[3]. Atteindre cet objectif nécessite une gouvernance rigoureuse et l'intégration d'outils méthodologiques éprouvés. La démarche HACCP, soutenue par des référentiels internationaux et renforcée par une surveillance technique continue ainsi que l'implication des instances de contrôle, s'impose comme un levier essentiel pour encadrer les risques spécifiques aux procédés de dessalement.

Dans cette perspective, ce mémoire propose une analyse globale de la qualité de l'eau dessalée produite en Algérie, en abordant ses dimensions sanitaires, techniques, normatives et technologique. Il s'articule autour de cinq chapitres principaux : le premier (i) s'intéresse à la présentation technique de la station UTE Desaladora Ténès et du procédé de dessalement mis en œuvre ; le second(ii) traite des défaillances potentielles et des risques susceptibles de compromettre la qualité de l'eau ou la continuité du service ; le troisième(iii) développe l'application de la démarche HACCP pour maîtriser les dangers sanitaires liés à l'eau produite ; le quatrième explore(iv) l'intégration des exigences de la norme ISO 22000 dans le pilotage

de la qualité ; enfin, le cinquième (v) propose un système de monitoring visant à assurer un suivi structuré, garantir la conformité de l'eau dessalée et renforcer son acceptabilité auprès des consommateurs.

Chapitre I :

Généralité sur la station OyM

I.1 Introduction :

L'accès à l'eau potable constitue une priorité sanitaire et environnementale, en particulier dans les régions confrontées à une pénurie de ressources hydriques naturelles. Ce chapitre présente la station de dessalement, ses missions ainsi que le contexte opérationnel du projet. Il inclut également une description du procédé de dessalement utilisé dans cette station [4]. Enfin, les normes de qualité de l'eau potable établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2017) sont présentées comme cadre de référence pour l'évaluation de la qualité de l'eau traitée. Les chapitres suivants aborderont les aspects méthodologiques et techniques, notamment à travers les analyses AMDEC et HACCP des risques associés au fonctionnement du système.

I.2. Présentation de la station de dessalement :

La station est implantée sur la côte méditerranéenne, à environ 6 km à l'ouest de la ville de Ténès et à 52 km au nord de la ville de Chlef. Elle se situe dans la wilaya de Chlef, à environ 60 km de son chef-lieu et à 260 km à l'ouest d'Alger. Cette région côtière s'étend sur 129 km de littoral [4].

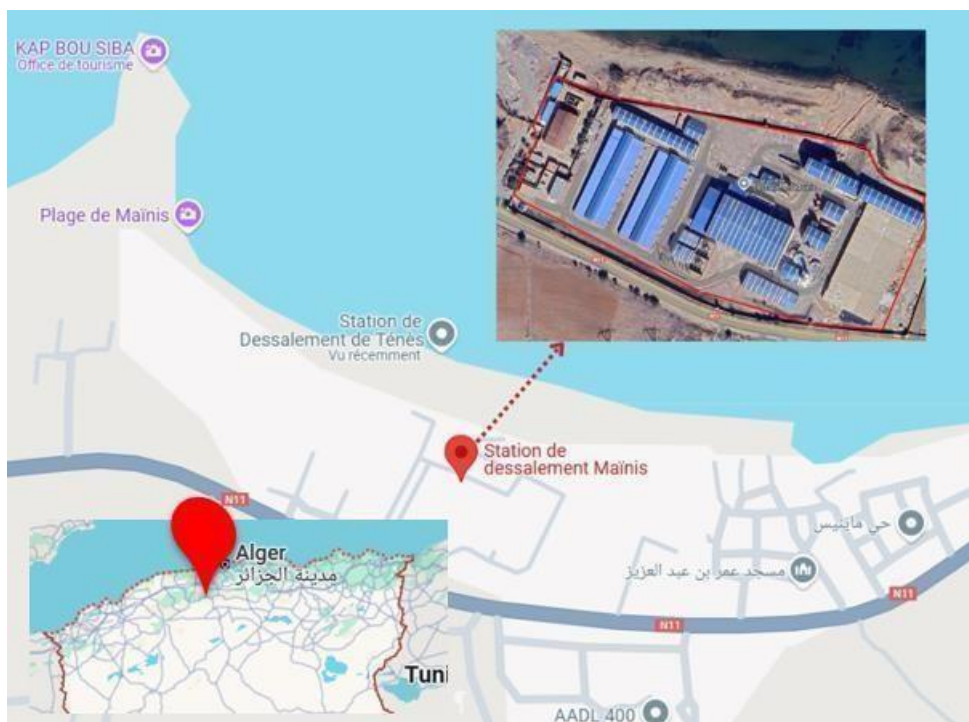


Figure I.1 : Situation géographique de la station de dessalement UTE Desaladora Ténès [1]

D'une superficie de 8 hectares, la station abrite l'ensemble des installations industrielles nécessaires au processus de dessalement.

La collaboration entre des entreprises algériennes et la multinationale espagnole ABENGOA, spécialisée dans les domaines de l'énergie et de la gestion de l'eau, a donné naissance à un partenariat stratégique structurant. [5].

Dans le cadre de cette collaboration, ABENGOA a investi 51 % du coût total du projet, apportant son

Savoir-faire technologique et son expérience en dessalement d'eau de mer [5]. Les 49 % restants ont été financés par les entreprises algériennes SONATRACH et SONELGAZ, deux acteurs clés du secteur énergétique national.

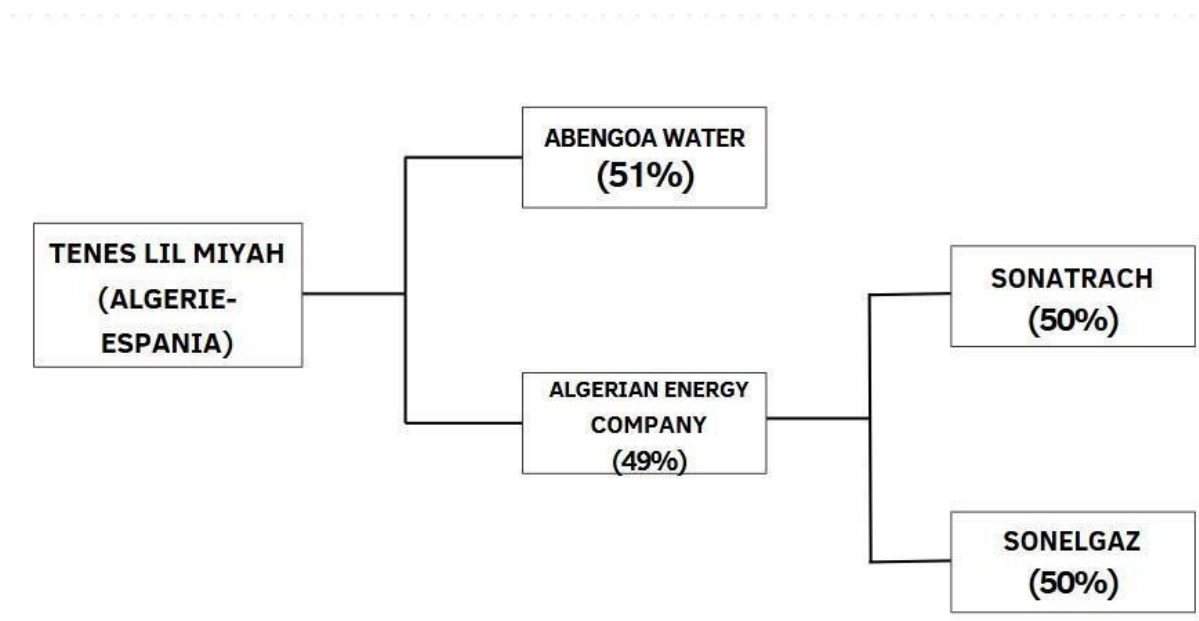


Figure I.2 : les partenaires clés de la station de dessalement UTE Desaladora Ténès

Ce modèle de coopération s'inscrit également dans le cadre de la stratégie nationale de renforcement des infrastructures hydriques, reposant sur des partenariats public-privé et l'intégration de l'expertise internationale afin de promouvoir des solutions durables et pérennes.

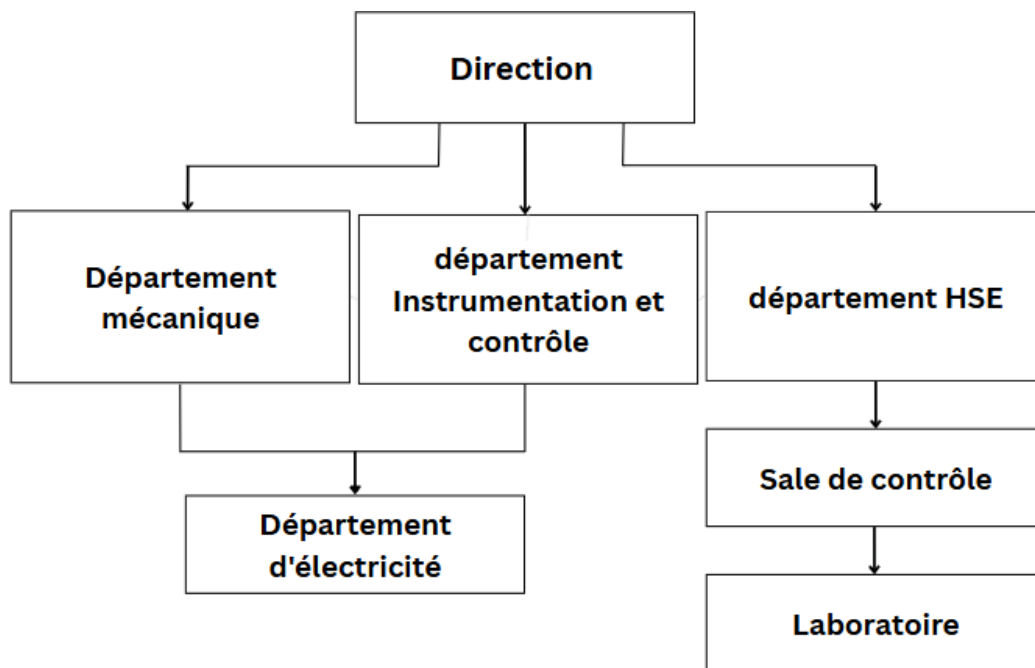


Figure I.3 : Architecture organisationnelle de l'unité de dessalement

Mise en service en 2014, la station fonctionne selon une organisation technique structurée, avec des 3 départements spécialisés (mécanique, instrumentation et contrôle, électricité, HSE) supervisés par la direction. Cette configuration garantit une coordination optimale entre les activités opérationnelles, le contrôle de la qualité de l'eau et le respect des normes de sécurité. La station de dessalement d'eau de mer de Ténès, DESSALADORA OyM, est une infrastructure stratégique d'une capacité de 200 000 m³/jour. [5] Exploitant l'osmose inverse, elle couvre environ 95 % des besoins en eau potable de Ténès et des communes avoisinantes, réduisant ainsi la dépendance aux précipitations irrégulières.

Après avoir présenté les caractéristiques institutionnelles et organisationnelles de la station OyM, il convient à présent d'introduire son fonctionnement technique à travers une présentation globale du processus de dessalement. [4]

I.3. Processus de dessalement de la station Desaladora OyM :

Avant de procéder à l'analyse détaillée du processus technique, il est judicieux de commencer par une vue d'ensemble. Le schéma suivant illustre les principales étapes du traitement appliqué à l'eau de mer au sein de la station OyM. [4]. Il permet de visualiser l'enchaînement des opérations et d'en saisir la logique globale, de la prise d'eau à son stockage final.

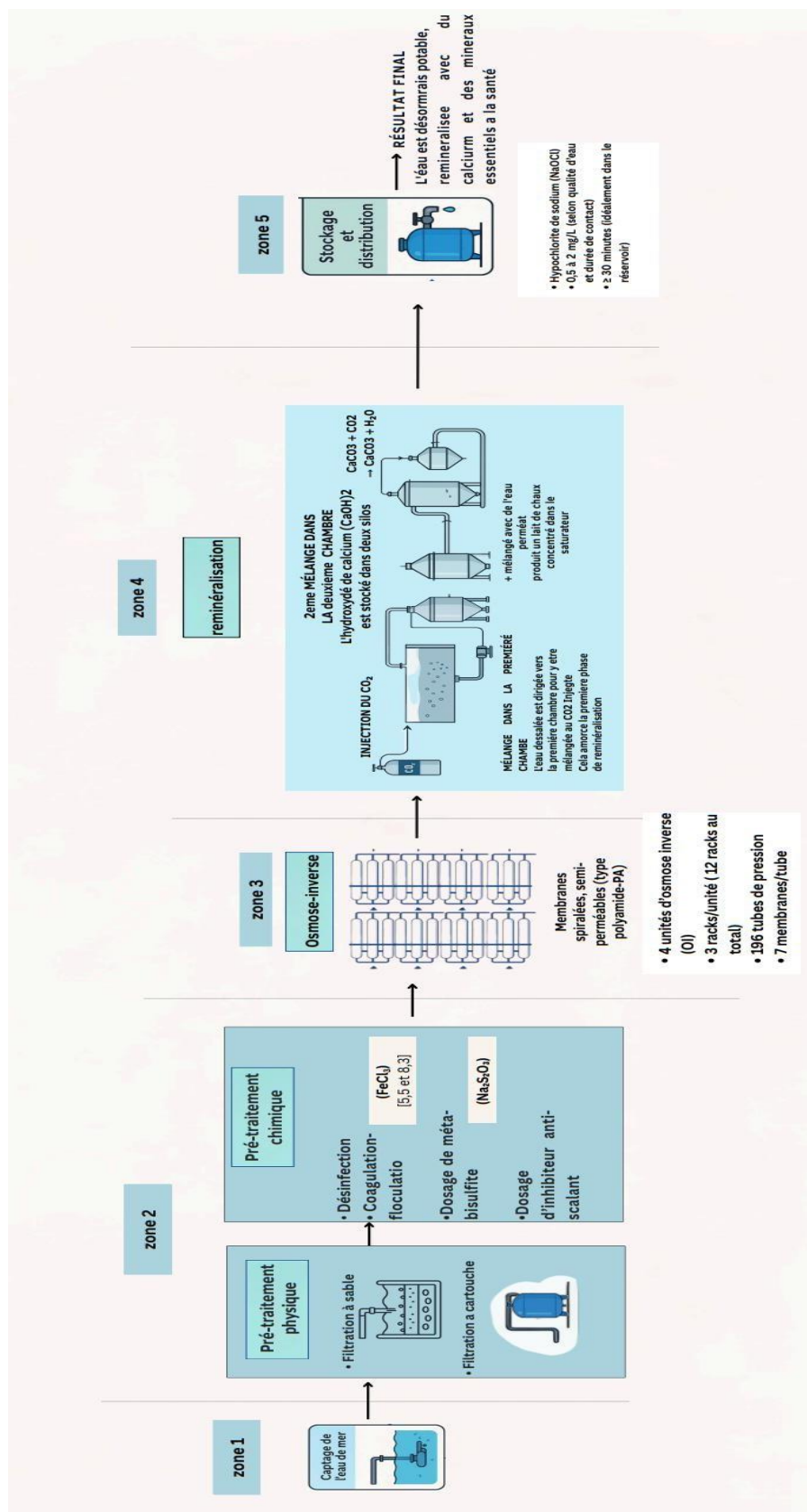


Figure I.4 : Illustre le schéma global du processus de dessalement par osmose inverse de la station OyM (auteur)

I.3.1. Première étape : Capture de l'eau de mer

L'eau de mer est prélevée à l'aide de deux conduites en PRFV (Polyester Renforcé de Fibres de Verre), immergées à une profondeur de 10 mètres. Ces tuyauteries, d'une longueur de 600 mètres et d'un diamètre de 1600 mm, permettent une capacité maximale de captage atteignant 540 000 m³ par jour. Ce système, conçu pour aspirer l'eau à une profondeur intermédiaire, permet de la conduire vers des réservoirs de collecte tout en réduisant l'entrée de sable. Des grilles de type Beaudry sont également installées en amont afin de retenir les déchets de grande taille présents dans l'eau de mer [4].



Figure I.5: Photo sous-marine des conduites de captage en PRFV



Figure I.6 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les deux filtres Beaudry pour la filtration primaire (filtration mécanique)

I.3.2. Deuxième étape : Prétraitement

La seconde étape du processus de dessalement a pour objectif de supprimer les solides en suspension, les matières organiques et les micro-organismes présents dans l'eau. Elle s'effectue en deux étapes principales

I.3.2.a. Prétraitement physique :

(i). Filtration à sable :

Le système décrit utilise la filtration gravitaire avec des filtres à sable bicouches composés d'anthracite et de silice pour éliminer la plupart des particules en suspension ; Chaque filtre a une surface d'environ 94m^2 et une vitesse de filtration de 5.77 m/h . Le lavage des filtres est effectué avec de la saumure et de l'air, grâce à des groupes électropompes horizontaux ayant un débit de lavage de $3\,800\text{ m}^3/\text{h}$. L'eau est pompée vers les 36 filtres à sable à l'aide de 4 pompes, dont un est de réserve. Après filtration, l'eau est dirigée vers un réservoir d'eau filtrée avant de passer à l'étape suivante.

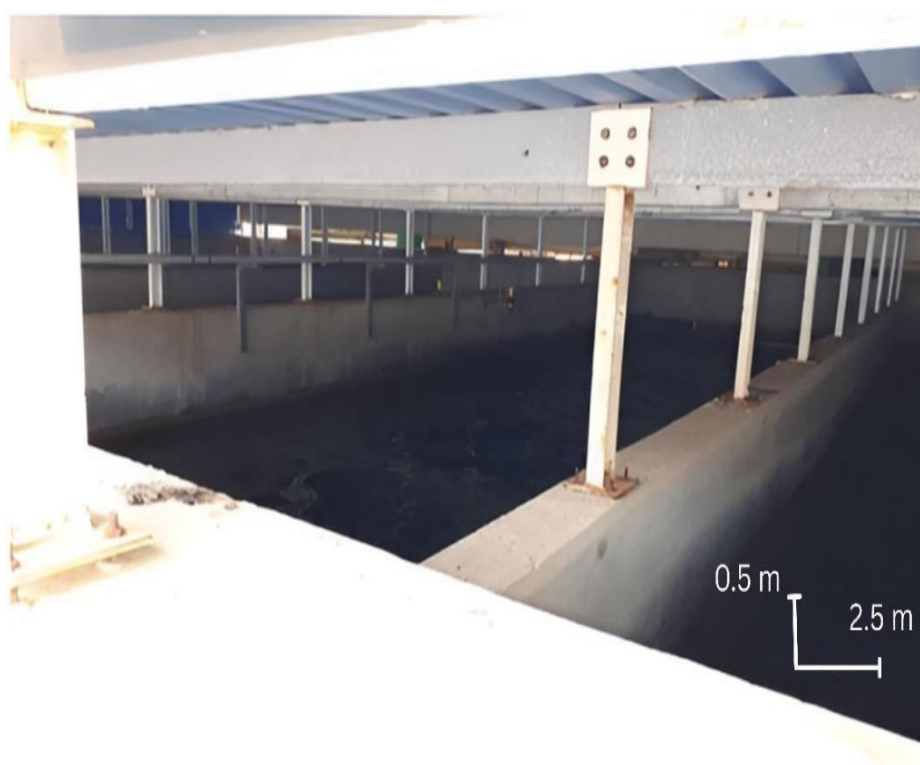


Figure I.7 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les bassins de filtres à sable

(ii). Filtrations à cartouche :

Après avoir traversé le filtre à sable, l'eau est soumise à une microfiltration via des filtres à cartouches. Ces filtres, au nombre de 22, sont répartis en deux groupes : 12 lignes alimentent les récupérateurs d'énergie et 10 lignes alimentent les pompes haute pression pour acheminer l'eau vers l'étage d'osmose inverse. Cette étape constitue la dernière étape de prétraitement de l'eau avant sa purification par osmose inverse.



Figure I.8 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les pompes HP intermédiaires

Les filtres à cartouches sont très performants et économiques pour le traitement des effluents contenant moins de 100 ppm de contamination. Ils permettent une microfiltration pour les contaminations allant de 0,5 à 150 microns, ce qui contribue à éliminer les particules fines comme le sable, le calcaire, la rouille, la chaux, etc.



Figure I.9 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les filtres à cartouches

I.3.2.b. Prétraitement chimique

(i). Désinfection :

La désinfection est une étape critique dans les processus de traitement des eaux. Ainsi, cette phase a pour objectifs de réduire ou d'éliminer les pathogènes de l'eau de mer, notamment les bactéries, les virus, les protozoaires et d'autres micro-organismes pathogènes pour la qualité de l'eau traitée ou qui peuvent endommager l'équipement de traitement [4].

Le NaOCl (hypochlorite de sodium), généralement dosé dans une plage comprise entre 0,5 et 1 mg/L, est l'agent désinfectant le plus couramment utilisé. Il s'agit d'un oxydant puissant qui agit en détruisant la structure des micro-organismes par un mécanisme d'oxydation, ce qui entraîne leur inactivation ou destruction. Dans ce cas, l'hypochlorite de sodium est utilisé pour :

- L'élimination des micro-organismes pathogènes présents dans l'eau brute contribuera à la santé et à la sécurité de l'eau traitée.
- Empêche la formation de biofilm sur les membranes d'osmose inverse, entraînant une réduction significative des performances de filtration et l'encrassement des membranes.
- Risque réduit de contamination pendant le transport et le stockage de l'eau brute avant les
- Processus de filtration avancés.

(ii) Coagulation – Flocculation :

Le coagulant $FeCl_3$ est mélangé à l'eau de mer à l'aide des pompes d'eau de mer, avec un dosage compris entre 5,5 et 8,3 mg/L. La coagulation et la flocculation sont appliquées lorsque l'eau de mer a une turbidité élevée [4].

Les microparticules produites lors de ce processus sont retenues dans les filtres à sable et éliminées lors du nettoyage des filtres ; Conformément au processus de nettoyage du filtre, le matériau stocké doit être éliminé correctement pour éviter de réintégrer l'eau traitée. En appliquant ces mesures, on peut s'assurer que l'eau est correctement traitée pour produire une eau potable de haute qualité [4].

(iii). Dosage de métabisulfite :

Le métabisulfite de sodium est utilisé pour éliminer le chlore résiduel de l'eau

avant qu'elle n'atteigne les membranes d'osmose inverse, protégeant ainsi ces dernières de l'oxydation. L'injection de la solution de $Na_2O_5S_2$ se fait par deux composants réservoirs d'accumulation dissolution et d'une pompe doseuse par ligne [4] .



Figure I.10 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les cuves de dosage de l'antitartre (Métabisulfite)

(iv). Dosage d'inhibiteur anti-scalant :

L'anti-scalant, dosé avant l'osmose inverse, empêche les dépôts minéraux (carbonates, sulfates, silicates) de se former sur les membranes, évitant ainsi une baisse de performance ou des dommages irréversibles. Il disperse les ions pour bloquer la cristallisation, permettant à l'eau de rester stable malgré sa forte concentration en sels. Ajusté grâce à l'analyse de l'eau et du système, ce traitement réduit les nettoyages, prolonge la durée des membranes et assure une production d'eau dessalée régulière [4].

I.3.3. Troisième étape : l'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de traitement de l'eau qui permet de la purifier en éliminant les impuretés, les sels et les contaminants grâce à une membrane semi-

perméable. Dans ce procédé, l'eau est soumise à une forte pression qui la force à traverser la membrane et à laisser derrière elle les impuretés et les sels. L'eau qui en résulte est donc purifiée et peut être utilisée pour différents usages tels que la consommation humaine, l'irrigation, l'industrie, etc. La section de d'osmose inverse (OI) comprend des blocs composés de 4 unités, chacune contenant 3 racks. Au total, il y a 12 racks, chacun contenant 196 tubes de pression et 7 membranes dans chaque tube. L'eau prétraitée est acheminée par les pompes hautes pression (HP) vers les racks à une pression de 65 bars. Cette configuration permet une filtration efficace de l'eau en éliminant les impuretés, les sels et les contaminants pour produire de l'eau pure. La capacité de production nominale d'eau dessalée par rack est de 17 391 m³/jour. Ainsi, la capacité totale de production des quatre unités d'osmose inverse est de 208 696 m³/jour, ce qui est une quantité importante d'eau purifiée pouvant répondre à de nombreux besoins industriels [4].



Figure I.11 : photo prise dans la station de dessalement illustrant le rack d'osmose inverse

- L'osmose inverse purifie l'eau en éliminant les sels, bactéries, virus et minéraux, produisant une eau dessalée souvent trop pauvre en éléments essentiels. Cela peut poser un problème : d'une part, cette eau, très corrosive, risque de dissoudre les métaux des tuyaux, comme le plomb, contaminant ainsi l'eau et menaçant la santé. D'autre part, l'absence de minéraux comme le calcium ou le magnésium, important pour réguler la pression artérielle et soutenir le cœur, pourrait augmenter les risques de maladies cardiovasculaires.
- C'est pourquoi la quatrième la reminéralisation, est nécessaire pour assurer la qualité de l'eau produite

I.3.4. La Reminéralisation :

Pour reminéraliser l'eau dessalée produite par l'osmose inverse, on utilise deux produits : le dioxyde de carbone (CO_2) et l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$).

- L'ajout de CO_2 permet d'augmenter la dureté de l'eau et de maintenir l'équilibre entre carbonate, bicarbonate et dioxyde de carbone libre, tandis que l'ajout d'hydroxyde de calcium permet d'ajouter du calcium à l'eau produite.
- Pour doser ces deux produits, on utilise des chambres situées à l'entrée du réservoir d'eau produite. L'injection de CO_2 se fait à la sortie du perméat, puis l'eau est dirigée vers la première chambre de réservoir pour y être mélangée avec le CO_2 .
- Quant à l'hydroxyde de calcium, il est stocké dans deux silos de stockage.



Figure I.12 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les silos de stockage de CaCO_3

Il est mélangé avec de l'eau perméat pour obtenir un lait de chaux concentré, qui est ensuite pompé vers le saturateur pour diminuer la concentration de la solution $\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ sous agitation. Ensuite, cette solution est dirigée vers la deuxième chambre de réservoir pour y être mélangée avec l'eau déjà reminéralisée avec du CO_2 .

Ainsi, en mélangeant les deux solutions dans la deuxième chambre de réservoir, la réaction suivante se produit : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Ce qui permet d'obtenir une eau potable reminéralisée contenant du calcium et d'autres minéraux essentiels à la santé [4].



Figure I.13 : photo prise dans la station de dessalement illustrant le saturateur de $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O}$

I.3.5 Stockage et Désinfection avant Distribution :

Après la reminéralisation, l'eau est envoyée dans un réservoir de stockage en béton armé pour le stockage. À ce stade, de l'hypochlorite de sodium est ajouté pour une désinfection finale, afin d'éliminer les micro-organismes restants. À partir de ce réservoir, l'eau est ensuite transportée vers les points de distribution à l'aide de cinq pompes haute pression.



Figure I.14 : photo prise dans la station de dessalement illustrant les pompes HP pour la distribution de l'eau produite

L'utilisation de chlore pour désinfecter l'eau avant sa distribution est une pratique courante pour assurer sa potabilité. L'hypochlorite de sodium, spécifiquement, est efficace pour éliminer des pathogènes comme les bactéries, virus et parasites. Dans la méthode décrite, ce produit désinfectant est incorporé à deux points clés : initialement dans la section subaquatique, là où l'eau brute est captée, garantissant une première désinfection dès son introduction dans le système ; ensuite dans la chambre de pompage, immédiatement avant le transfert vers les usagers. Cette double mise en œuvre diminue considérablement les dangers de contamination durant l'ensemble du processus de transport, assurant ainsi une eau pure et fiable à la livraison [4].



Figure I.17 : photo illustrant le réservoir de stockage de l'eau dessalée produite

L'analyse détaillée du processus de dessalement présentée ici constitue une base essentielle pour la suite de cette étude. Elle permet de comprendre les enchaînements techniques et les exigences opérationnelles de chaque étape, éléments clés pour la mise en œuvre d'analyses approfondies telles que l'AMDEC ou l'approche HACCP. Ces fondations faciliteront l'identification des points sensibles du système, la proposition d'actions préventives et correctives, et la mise en place d'un niveau de sécurité renforcé du procédé.

Dans cette logique, il devient tout aussi essentiel de s'intéresser au cadre normatif qui gouverne la qualité de l'eau produite. En effet, Les normes nationales,

internationales celles recommandées par l’OMS sont des références incontournables pour évaluer la conformité du processus et orienter les décisions techniques. Il est donc pertinent de présenter les principales références réglementaires applicables à la station OyM.

I.4 Cadre réglementaire de la qualité de l’eau :

I.4.1. Normes algériennes :

Dans le cadre de cette étude, il est nécessaire de prendre appui sur les exigences réglementaires définies par la législation algérienne en matière de qualité de l’eau destinée à la consommation humaine. [3] Le décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 constitue, à cet effet, la référence nationale principale. Le tableau ci-dessous présente une sélection des paramètres considérés comme les plus critiques, en lien direct avec les enjeux du dessalement et de la sécurité sanitaire [6].

Tableau I.1 : Exigences réglementaires algériennes en matière de qualité de l’eau destinée à la consommation humaine (Décret exécutif n°11-125)

Paramètre	Limite réglementaire	Unité
pH	6,5 – 9	—————
Turbidité	5	NTU
TDS (résidu sec)	1500	mg/L
Conductivité électrique	2800	µS/cm
Nitrates (NO ₃ ⁻)	50	mg/L
Fluorures (F ⁻)	1,5	mg/L
Fer total	0,3	mg/L
Aluminium	0,2	mg/L
Plomb (Pb)	10	µg/L
Arsenic (As)	10	µg/L
Escherichia coli	0	/100 mL
MES totaux	0	/100 mL

Le décret définit les exigences de qualité essentielles que l’eau produite doit respecter selon la réglementation algérienne. Il identifie les paramètres les plus importants pour l’évaluation des risques et les comparaisons ultérieures. Une synthèse de ces seuils est présentée ci-dessous, tandis que le tableau détaillé figure en annexe (Annexe 1).

Par ailleurs, L'étude des normes internationales complète cette approche et permet de situer l'Algérie dans le contexte mondial de la gestion de la qualité de l'eau, domaine où les enjeux sanitaires transcendent les frontières.

I.4.2 Normes internationales (OMS) :

Les normes de l'OMS, fondées sur des données scientifiques, constituent une référence internationale pour évaluer la qualité de l'eau potable. Leur application permet de garantir la sécurité sanitaire des eaux traitées, notamment par dessalement. Le tableau ci-dessous présente les principaux paramètres et leurs valeurs guides recommandées [7].

Tableau I.2 : Valeurs guides de l'OMS concernant les paramètres clés de la qualité de l'eau potable

B	Limite réglementaire	Unité
Ph	6,5 – 8.5	—————
Turbidité	1	NTU
TDS (résidu sec)	1000	mg/L
Conductivité électrique	800	µs/cm
Nitrates (NO ₃ ⁻)	50	mg/L
Fluorures (F ⁻)	1,5	mg/L
Fer total	0,3	mg/L
Aluminium	0,2	mg/L
Plomb (Pb)	0	µg/L
Arsenic (As)	0	µg/L
Escherichia coli	0	/100 ml
Coliformes totaux	0	/100 ml

Le tableau présente les seuils recommandés par l'OMS pour garantir une eau potable sans risque pour la santé. Ces valeurs guides permettent d'identifier les limites à ne pas dépasser pour les principaux paramètres de qualité, et servent ainsi de base pour l'évaluation de la sécurité de l'eau produite , Le tableau détaillé est présenté en annexe (Annexe 2).

I.4.3. Comparaison entre les normes :

Une comparaison de ces deux documents de référence révèle une forte similitude sur des aspects cruciaux tels que les nitrates, les fluorures, les métaux courants et les impératifs microbiologiques. Cependant, la norme algérienne se montre plus permissive concernant certains critères physico- chimiques tels que la turbidité, la conductivité ou les matières sèches, une adaptation qui pourrait s'expliquer par les spécificités des ressources locales ou des moyens techniques de traitement disponibles. Parallèlement, les recommandations de l'OMS, visant une protection sanitaire maximale, affichent des seuils plus stricts pour les métaux lourds comme le plomb ou l'arsenic [4].

I.4 Conclusion :

À travers le premier chapitre, nous avons posé les bases nécessaires à la compréhension de du travail réalisé. La description de la station, du processus de dessalement par osmose inverse et des normes de qualité de l'eau offre une vue d'ensemble du sujet. Ces concepts clés serviront de base à une étude plus détaillée, dans les chapitres suivants, sur la gestion des risques et le contrôle de la qualité de l'eau produite, à l'aide de méthodes rigoureuses.

Chapitre II : Analyse Processus par l'approche AMDEC

II.1 Introduction :

La production d'une eau douce destinée à la consommation humaine doit impérativement répondre aux normes sanitaires et réglementaires en vigueur. Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est un processus complexe, au cours duquel chaque phase peut être vulnérable à des défaillances techniques ou à des contaminations sanitaires.

Ces risques peuvent nuire à la qualité de l'eau produite ou perturber le fonctionnement continu de l'installation.

Dans ce contexte, une approche méthodologique est proposée afin d'identifier, d'analyser et maîtriser les dangers associés au processus de traitement. Cette approche repose sur la méthode AMDEC car elle permet d'évaluer les défaillances techniques potentielles et de hiérarchiser les actions correctives en fonction de leur gravité.

II.2 Présentation de la méthode AMDEC :

L'AMDEC constitue une méthode d'analyse des risques de type a priori et inductive, visant à repérer les défaillances potentielles d'un système. Ces défaillances sont examinées afin d'évaluer leur criticité, d'identifier leurs causes principales et, en dernier lieu, d'élaborer des actions adaptées pour réduire les risques. Conçue dans les années 1940 aux États-Unis par l'armée américaine, cette méthode a progressé au fil du temps et s'est étendue à de nombreuses applications [8].

La criticité est calculée à partir de trois critères fondamentaux :

Gravité (G), Fréquence (F) et Détectabilité (D).

La formule généralement utilisée est : $C = G \times F \times D$.

Avant de justifier le choix du type d'AMDEC utilisé dans cette étude, il est utile de rappeler les principales variantes de cette méthode. En effet, l'AMDEC peut être appliquée à différents niveaux d'analyse, selon la nature du système étudié et les objectifs de maîtrise des risques visés. On distingue ainsi généralement trois grandes catégories :

(i) **AMDEC produit** : Elle analyse les modes de défaillance liés aux composants ou aux caractéristiques d'un produit fini. Son objectif est de garantir la fiabilité et la sécurité du produit tout au long de son cycle de vie

[9][10].

(ii) **AMDEC conception** : Appliquée dès les premières phases de conception, elle permet d'anticiper les défauts potentiels liés à l'architecture du système, aux matériaux choisis ou aux conditions d'utilisation prévues [10][11].

(iii) **AMDEC processus** : Elle évalue les défaillances susceptibles de se produire au cours des étapes de fabrication ou de traitement. Cette approche est essentielle pour améliorer la robustesse des processus industriels et limiter les non-conformités [9][10].

II.2.1 Justification du choix de AMDEC - Processus :

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur l'AMDEC processus, car elle s'adapte spécifiquement à l'analyse des risques liés aux étapes opérationnelles du traitement par dessalement. Contrairement aux variantes produit ou conception, cette approche permet d'évaluer les défaillances potentielles des opérations en conditions réelles, tout en facilitant la mise en place d'actions préventives ciblées.

Le choix s'explique également par le fait que la qualité de l'eau produite est étroitement dépendante de la maîtrise du processus de traitement. L'AMDEC processus permet ainsi de sécuriser l'ensemble du procédé, en identifiant les points sensibles susceptibles d'altérer les performances ou la conformité de l'eau dessalée. Elle contribue donc directement à garantir un niveau de qualité répondant aux normes en vigueur.

II.3. Application de la méthode AMDEC au processus de dessalement :

Après avoir présenté les principes fondamentaux de la méthode AMDEC et justifié le choix de son application au niveau du processus, la présente section expose son application concrète au système de dessalement étudié.

II.3.1. Découpage fonctionnel du procédé :

La première étape de l'analyse consiste à distinguer les principales unités fonctionnelles du système de dessalement par osmose inverse. Le procédé a été découpé en cinq (5) étapes successives, chacune remplissant une fonction spécifique dans le traitement de l'eau :

1. Captage de l'eau de mer
2. Prétraitement physique + chimique (Filtration à sable / cartouche criblage,

coagulation, filtration)

3. Osmose inverse (barrière principale contre les sels et les contaminants)

4. Reminéralisation

5. Stockage et désinfection finale et distribution

- Le découpage permet d'avoir une vue claire des fonctions attendues à chaque étape, et de cibler les points sensibles dans le processus [5].

II.3.2. Identification des fonctions et des défaillances possibles :

Pour chaque étape du processus, la fonction principale est identifiée, ainsi que les défaillances susceptibles d'en compromettre la performance. Ces scénarios de défaillance sont construits à partir de données techniques, de retours d'expérience, de normes de qualité et de pratiques industrielles courantes.

II.3.3. Cotation des défaillances

Chaque défaillance identifiée est ensuite évaluée selon trois critères classiques

de l'AMDEC : Gravité (G) : impact potentiel sur le système (qualité de l'eau,

continuité de service) Fréquence (F) : probabilité de survenue

Détectabilité (D) : capacité à détecter la défaillance avant

qu'elle n'ait un effet Chacun de ces paramètres est noté sur

une échelle de 1 (faible) à 5 (élevée). La criticité (C) est

calculée selon la formule : $C=G \times F \times D$

Les tableaux suivants présentent ces grilles d'évaluation, utilisées comme référence tout au long de l'analyse [13].

(Les cotations ont été attribuées sur une échelle de 1 à 4 pour chaque paramètre, selon la nature et le contexte des défaillances identifiées.)

1- Le premier tableau ci-dessous présente l'échelle de cotation utilisée pour le critère de **gravité (G)**, en fonction de l'impact potentiel de la défaillance sur le système.

Tableau II.1 : Échelles de gravité des effets de la différence (G)

Niveau	Valeur	Définition
Mineure	1	La défaillance arrête le composant mais pas l'installation, Qui continue à fonctionner en mode dégradé.
Moyenne	2	La défaillance arrête l'équipement mais pas la production, qui continue à fonctionner en mode dégradé.
Majeure	3	La défaillance arrête la production et nécessite une intervention de maintenance.
Importante	4	La défaillance arrête la production, impliquant des problèmes graves pour les hommes ou l'installation.

2- Le tableau suivant concerne la **fréquence (F)**, qui évalue la probabilité d'apparition de chaque scénario de défaillance [13].

Tableau II.2 : Échelles de fréquence d'apparition de la défaillance (F).

Niveau	Valeur	Définition
Exceptionnel	1	Pas de mémoire de participant
Rare	2	Cela est déjà arrivé 1 ou 2 fois
Fréquent	3	Cela est déjà arrivé plusieurs fois
Certain	4	Cela arrivera à coup sûr

3- le troisième tableau expose l'échelle relative à la **détectabilité (D)**, c'est-à-dire la capacité à repérer la défaillance avant qu'elle ne produise ses effets [13].

Tableau II.3: Échelles de fréquence d'apparition de la défaillance (D).

Niveau	Valeur	Définition
Évident	1	Détection certaine
Possible	2	DéTECTABLE par l'opérateur
Improbable	3	Difficilement détectables
Impossible	4	Indétectable

4. le quatrième tableau expose la criticité de la multiplication des trois

paramètres de gravité (G) , fréquence (F)et détectabilité (D),

Tableau II.4: Tableau d'Évaluation des Risques par Criticité et Actions Requises.

Criticité (G×O×D)	Niveau de Risque	Action recommandée
1 – 8	Faible	Acceptable, suivi standard
9 – 24	Modéré	Définir des actions préventives
25 – 48	Élevé	Prioriser actions correctives
49 – 64	Critique	Intervention immédiate

Cette méthode permet de hiérarchiser les risques et d'identifier les scénarios les plus critiques à traiter en priorité [14].

Afin de guider l'attribution des notes aux critères Gravité (G), Fréquence (F) et Détectabilité (D), des **échelles de cotation adaptées** ont été établies en cohérence avec les pratiques recommandées dans la littérature.

II.3.4. Élaboration du tableau AMDEC

L'ensemble des données est compilé dans un tableau synthétique structuré selon les recommandations méthodologiques de l'analyse AMDEC [14]

Le tableau ci-dessous synthétise les scénarios de défaillance les plus critiques identifiés dans le cadre de l'analyse AMDEC. Ces résultats ont été sélectionnés en fonction de leur niveau de criticité, afin d'illustrer les risques majeurs à maîtriser en priorité.

Tableau II.5 : Synthèse des défaillances critiques selon la méthode AMDEC appliquée au traitement par osmose inverse

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Filtres a cartouche	Réduire particules < 0,5 µm	Endommagement mécanique (SDI > 5)	Cartouche percée	-Encrassement des membranes OI, -Débit -30 %	3	4	2	24	- Effectuer un test SDI (Silt Density Index) chaque 24 heures. - Remplacement des filtres si SDI > 4 dans les 6 heures. - Nettoyage des logements des cartouches (corps d filtre), vérification des joints toriques. -Installer des manomètres à l'entrée et à la sortie du filtre à cartouche. -Calibration périodique des instruments de mesur (SDI, manomètres) -Séances de sensibilisation trimestrielles pour tou les opérateurs.

		Obstruction des buses ($\Delta P > 3$ bars)	Colmatage pores	- Production réduite - surcharge OI	3	4	3	36	- Utilisation un filtre fin ($\leq 50 \mu m$) en amont pour éviter particules trop grosses. - Remplacement ou nettoyage immédiat des buse si $\Delta P > 2,5$ bars - Installation de capteurs de pression différentielle (ΔP) en amont et aval des buses. -- Rinçage à contre-courant avec air + eau ou produit anti-encrassement en cas de colmatage répété.
Pompes HP	Fournir eau à 65 bars	Refus de démarrage (0 bar)	Grillage du moteur électrique	- Arrêt OI - production nulle	4	2	1	8	- Contrôle thermographique régulier du moteur afin de détecter des échauffements anormaux avant l panne - Vérification des paramètres électriques d l'intensité, tension, cos ϕ pour anticiper surcharg ou déséquilibre. - maintenance préventive programmée (tous les 3 6 mois) Nettoyage du moteur, contrôle de roulements, graissage, alignement arbre. - Mise en place d'une pompe de secours montée en parallèle (by-pass) - Capteurs de vibration et de température moteu

									(surveillance conditionnelle)
		Fuite de liquide (pression < 60 bars)	Joints usés	-Débit de perméat réduit (-20 %) -stress membranes	2	4	2	16	-Installation de capteurs de pression en entrée/sorti de la pompe HP -Remplacement systématique de joints d'étanchéité tous les 3 à 6 mois (joints en Viton (FKM)) -Inspection visuelle hebdomadaire de la pomp (présence de fuites) -Choix de pompes avec cartouche de join facilement remplaçable (type split seal)

- Le tableau complet de l'analyse AMDEC est disponible en (**Annexe 3**), incluant l'ensemble des étapes et cotations.

L'analyse du système de dessalement par osmose inverse a permis d'identifier les principaux modes de défaillance affectant la performance du système et la qualité de l'eau produite. À travers une évaluation structurée des risques, il est apparu que la fiabilité globale repose sur la robustesse des équipements sous pression, la stabilité des dosages chimiques et l'efficacité des systèmes de détection.

La représentation tabulaire précédente fournit une base d'analyse rigoureuse. Afin de faciliter l'interprétation globale des résultats, les défaillances ont été regroupées et représentées graphiquement selon leur fréquence d'apparition.

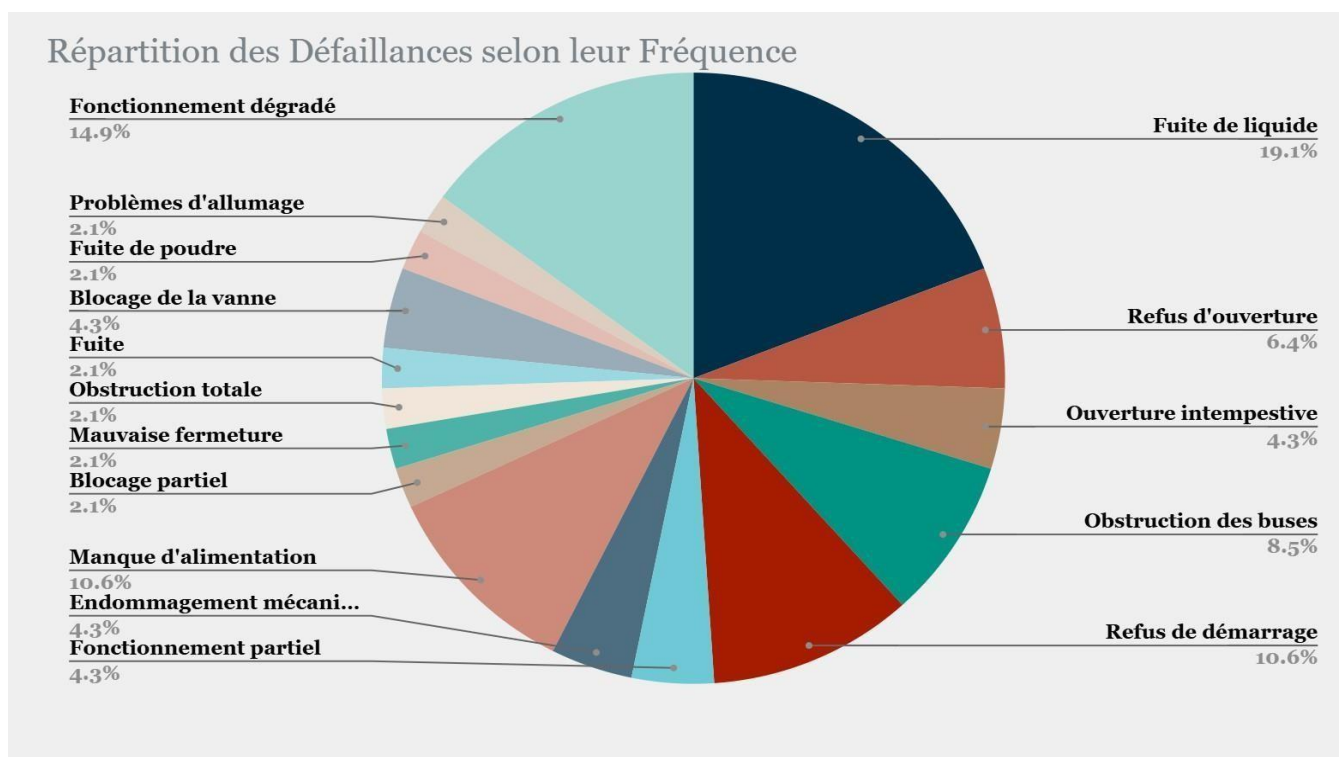


Figure II.18 : Représentation circulaire de la répartition des modes de défaillance identifiés dans l'analyse AMDEC selon leur fréquence

II.3.5 Interprétation de graphique circulaire :

Le diagramme circulaire entre clairement la distribution des types de défaillance observer au sein du processus de dessalement cette représentation permet de visualiser rapidement les modes dominants ainsi que les défaillances secondaires.

(i) Les principales défaillances supérieures à 10 % :

- i.1 Fuite de liquide 19,1 % : Il s'agit du mode de défaillance le plus

fréquent, ce qui révèle une vulnérabilité majeure au niveau de l'étanchéité des installations, notamment au niveau des tuyauteries, des pompes, des joints et des vannes. ce type de dysfonctionnement peut entraîner non seulement une perte de rendement mais également des risques de corrosion et de pollution croisée.

i.2 Fonctionnement dégradé 14,9 % :Cela traduit une diminution de performance des équipements des vies pression concentration souvent non immédiatement détectés mais impactant progressivement la qualité de l'eau produite.

i.3 Refus de démarrage / manque d'alimentation chacune 10,6% : ces défaillances indiquent des dysfonctionnements en amont généralement dû à des défauts d'alimentation en énergie ;en réactif chimique Cl₂ CO₂ peuvent entraîner un arrêt total du système, affectant directement la **continuité du service et compromettant les performances opérationnelles de l'installation.**

(ii) Les défaillances intermédiaires 4-9 %

ii.1 Obstruction des buses 8,5% : Typique des problèmes de prétraitement cette défaillance peut être liée au colmatage par les matières en suspension ou au biofilm.

ii.2 Refus des ouvertures / fonction partiel / endommagement mécanique / blocage de la vanne / ouverture intempestive tout entre (4,3- 6,4) : Ces modes de défaillance sont liés à des défauts mécaniques ou de régulation ils traduisent un besoin de renforcement des opérations de maintenance préventive notamment sur des organes de commande.

(iii) Les défaillances rares inférieurs à 4 % :

iii.1 Fuite de poudre ; problème d'allumage ; obstruction totale fuite simple ; mauvaise fermeture, blocage partiel 2,1% chacune

iii.2 Ces pannes apparaissent marginales mais ne doivent pas être négligées. Dans des conditions cumulatives ou si elles surviennent à des points critiques du système, elles peuvent déclencher des pannes en cascade.

La représentation graphique des fréquences de défaillance a mis en évidence la prédominance des fuites, des fonctionnements dégradés et des pannes liées au démarrage ou à l'alimentation. Ces résultats orientent les priorités vers une

sécurisation de l'interface hydraulique et un renforcement des automatismes de contrôle.

II.4 Étude qualitative des impacts des défaillances sur la qualité de l'eau

Produite :

L'analyse AMDEC a révélé des pannes critiques dans le dessalement, mais reste insuffisante pour évaluer pleinement leur impact sur la qualité de l'eau. Une étude additionnelle, a permis d'analyser qualitativement les effets de ces dysfonctionnements sur les propriétés physico-chimiques et microbiologiques de l'eau, en différenciant les processus chimiques et biochimiques, Les tableaux ci-dessus illustrent l'impact des défaillances identifiées dans le processus de dessalement sur la qualité finale de l'eau produite dans chaque phase :

II.4.1 Captage d'eau de mer

Tableau II.6 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite étape de captage d'eau de mer - captage d'eau de mer [15–18].

Composant	Mode	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Tuyaux PRFV	Fuite d'eau salée (500 L/h perdu)	Pas d'impact direct (fuite externe), mais si débit réduit, concentration accrue de sels dans l'eau entrante (TDS potentiel > 35 000 mg/L au captage).	TSS > 20 mg/L possible par introduction indirecte de micro- organismes marins via débit réduit (CFU > 100/ml si filtration aval inefficace).
	Blocage partiel (débit < 450 000 m ³ /j)	TDS > 35 000 mg/L dans l'eau brute (concentration accrue), risquant TDS > 500 mg/L final si OI surchargée.	TSS > 20 mg/L (accumulation de particules), SDI > 5, favorisant bio-encrassement dans le prétraitement (CFU > 100/mL possible si micro-organismes concentrés).

Système captage	Refus d'ouverture grille	Pas d'eau produite, donc aucun impact chimique.	Pas d'eau produite, donc aucun changement dans TSS, SDI ou CFU.
	Ouverture intempestive	TDS > 500 mg/L possible si particules riches en sels passent et surchargent OI[17].	TSS > 50 mg/L, SDI > 5 (particules > 5 mm passent), CFU > 100/mL par bio-encrassement potentiel dans les filtres[17].
Grilleurs Beaudry	Mauvaise fermeture (trous > 15 mm)	TDS > 500 mg/L possible si débris salins traversent et affectent OI[18].	TSS > 20 mg/L, SDI > 5, CFU > 100/mL par passage de matières organiques favorisant bio-encrassement[19].
	Obstruction totale	Pas d'eau produite, donc aucun impact chimique.	Pas d'eau produite, donc aucun changement dans TSS, SDI ou CFU.

II.4.2. Deuxième étape : prétraitement

II.4.2.a. Prétraitement physique

(i). Filtration à sable :

Tableau II.7 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite - **Filtration à sable** [16,17]

Composant	Mode de Défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Filtres à sable	Obstruction de s buses	TDS > 500 mg/L si TSS > 5 mg/L surcharge OI, réduisant le rejet des sels[17].	TSS > 5 mg/L, SDI > 5, CFU > 100/mL possible par bio-encrassement dans OI dû à une filtration réduite[17].
	Fuite de liquide	TDS > 1000 mg/L (eau brute salée, TDS > 35 000 mg/L, contamine le filtrat)[17].	CFU > 100/mL, TSS > 5 mg/L, SDI > 5 par passage de microbes et particules de l'eau brute[16].
Pompes lavage	Refus de Démarrage	TDS > 500 mg/L si colmatage persistant (TSS > 10 mg/L) surcharge OI[18].	TSS > 10 mg/L, SDI > 5, CFU > 100/mL possible par bio-encrassement accru dans OI[17].
	Fonctionnement partiel	TDS > 500 mg/L si lavage insuffisant augmente TSS > 5 mg/L, affectant OI.	TSS > 5 mg/L, SDI > 5, CFU > 100/mL par risque de bio-encrassement dans OI.

(ii). Filtrations à cartouche :

Tableau II.8: Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite- **Filtrations à cartouche**[18,19]

Composant	Mode de Défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Filtres cartouche	Endommagement mécanique	TDS > 500 mg/L (particules salines > 0,5 µm passent,	SDI > 5, TSS > 1 mg/L, CFU > 100/mL Possible par bio-

			encrassement dans
	Obstruction des buses	TDS > 500 mg/L si SDI > 5 réduit l'efficacité OI.	SDI > 5, TSS > 1 mg/L, CFU > 100/mL possible par bio-encrassement accru dans OI.
Pompes HP	Refus de démarrage	Pas d'eau produite, donc aucun impact chimique.	Pas d'eau produite, donc aucun changement dans TSS, SDI ou CFU.
	Fuite de liquide	TDS > 500 mg/L (pression < 60 bars réduit rejet des sels par OI).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (pression affecte la chimie, non la biologie).

II.4.2.b. Prétraitement chimique

(i) Désinfection (chloration) :

Tableau I.9 : : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite- **Désinfection [15,16]**

Composant	Mode de Défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Dosage hypochlorite	Manque D'alimentation	Aucun effet direct sur TDS ou pH ($\text{Cl}_2 < 0,2$ mg/L).	CFU > 100/mL par désinfection insuffisante, risque de bio-encrassement dans OI.
	Fuite de liquide	Cl_2 libre > 1,5 mg/L (goût chloré, sous-produits comme THM possibles).	CFU réduit (< 100/mL), mais risque de formation de THM biochimiques.

(ii). Coagulation-Floculation

Tableau I.10 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite - **Coagulation-Floculation** [15,16]

(iii). Dosage métabisulfite :

Dosage FeCl_3	Manque d'alimentation	TDS > 500 mg/L Si TSS > 15 mg/L surcharge OI[18].	TSS > 15 mg/L, SDI > 5, CFU > 100/mL possible par bio- encrassement dans OI
	Fuite de liquide	Fe > 0,5 mg/L (eau brunâtre, non potable).	Aucun effet direct sur CFU ou SDI (Fe agit chimiquement, non biologiquement).

Tableau II.11 :

Tableau II.11 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite - **Dosage métabisulfite** [13,18]

Composant	Mode de défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Pompe doseuse	Blocage de la vanne	TDS > 500 mg/L (Cl_2 > 0,1 mg/L oxyde OI, réduisant rejet des sels).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (Cl_2 endommage OI chimiquement).
	Fonctionnement partiel	TDS > 500 mg/L (Cl_2 > 0,08 mg/L dégrade OI progressivement).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (impact limité à la chimie d'OI).

(iv) **Dosage inhibiteur anti-scalant :**

Tableau II.12 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite - **Dosage inhibiteur anti-scalant [16]**

Composants	Mode de défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Système dosage	Refus d'ouverture	TDS > 500 mg/L tartre réduit efficacité OI, moins de rejet des sels.	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI .
	Fuite de liquide	Aucun effet direct sur TDS ou pH (excès d'anti-scalant non toxique).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (anti-scalant n'a pas d'action biologique).

II.4.3. Troisième étape : Osmose inverse

Tableau II.13 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite - **Osmose inverse [15,16,17]**

Composants	Mode de défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Membranes OI	Fonctionnement dégradé	TDS > 500 mg/L (biofilm réduit rejet des sels).	SDI > 5, CFU > 100/mL par bio- encrassement microbien sur membranes.
	Endommagement mécanique	TDS > 1000 mg/L (Cl ₂ endommage OI, laissant passer les sels).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (dommage purement chimique).

Pompes HP	Refus de démarrage	Pas d'eau produite, donc aucun impact chimique.	Pas d'eau produite, donc aucun changement dans TSS, SDI ou CFU.
	Fuite de liquide	TDS > 500 mg/L (pression < 60 bars réduit rejet des sels).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (pression affecte la chimie).
Tubes pression	Fuite de la vanne	TDS > 500 mg/L (mélange eau salée/produit).	CFU > 100/ml possible si contaminants biologiques de la saumure passent.

II.4.4. Quatrième étape :Reminéralisation

Tableau II.14 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite – **Reminéralisation [10,11,15,16]**

Composant	Mode de défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Dosage CO ₂	Manque d'alimentation	-pH < 6,5 (eau acide, corrosive).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (pH bas n'induit pas de croissance microbienne immédiate).
	Ouverture intempestive	-pH < 6 -CO ₂ libre > 20 mg/L -Eau acide -Goût chimique	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (excès de CO ₂ n'affecte pas La biologie).
Dosage Ca(OH) ₂	Refus d'ouverture	Ca < 20 mg/L (eau agressive, non potable).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (calcium n'a pas d'action biologique).

	Fuite de liquide	Ca > 120 mg/L (eau dure, non souhaitable).	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (excès de Ca n'affecte pas la Biologie).
Silos stockage	Fuite de poudre	Aucun effet direct, mais risque Ca < 30 mg/L à terme si stock Épuisé.	Aucun effet direct sur CFU, TSS ou SDI (perte de poudre n'impacte pas la biologie).

II.4.5 Cinquième étape : Stockage et distribution :

Tableau II.15 : Analyse qualitative des impacts des défaillances techniques sur la qualité physico- chimique et biochimique de l'eau produite - **Stockage et distribution [15,17]**

Composant	Mode de défaillance	Impact chimique sur la qualité de l'eau	Impact biochimique sur la qualité de l'eau
Réservoir	Fuite de liquide	TDS > 500 mg/L possible si eau externe salée Entre.	CFU > 100/mL si contaminants biologiques externes pénètrent, TSS > 1 mg/L possible.
	Fonctionnement dégradé	Aucun effet direct sur TDS ou pH (Cl ₂ < 0,2 mg/L).	CFU > 100/mL par désinfection insuffisante.
Dosage hypochlorite	Manque d'alimentation	Aucun effet direct sur TDS ou pH.	CFU > 200/mL par contamination bactérienne accrue.
	Ouverture intempestive	Cl ₂ libre > 1,5 mg/L (goût chloré, sous-produits Chimiques).	CFU réduit (< 100/mL), mais risque de THM biochimiques.
Pompes HP	Refus de démarrage	Pas d'eau distribuée, donc aucun impact chimique.	Pas d'eau distribuée, donc aucun changement dans TSS, SDI ou CFU.
	Fuite de liquide	Aucun effet direct sur TDS ou pH (pression instable).	TSS > 1 mg/L et CFU > 100/ml possibles si contamination externe via fuite.

L'étude compile les modes de défaillance examinés dans les procédures antérieures (AMDEC produit et processus), et l'étude qualitative des impacts des défaillances sur la qualité de l'eau produite démontre pour chacun d'eux, les effets escomptés sur les indicateurs chimiques (comme le TDS, le pH, la dureté, etc.) et biochimiques (la présence de micro-organismes, la contamination organique, etc.) de l'eau.

Elle offre donc la possibilité d'observer de manière tangible comment une irrégularité technique spécifique peut affecter la qualité de l'eau traitée à chaque phase du processus.

II.5. Analyses des impacts des défaillances sur les paramètres critique d'eau :

II.5.1. Voie chimique :

- **TDS** : Augmente avec des fuites (ex. : filtres à sable, tubes pression) ou des défaillances OI (ex. : endommagement mécanique, pression basse), car les sels ne sont pas rejetés efficacement. Norme OMS : $\text{TDS} < 1000 \text{ mg/L}$ [17].
- **pH** : Réduit ($< 6,5$) par manque de CO_2 ou Ca(OH)_2 en reminéralisation, rendant l'eau acide et corrosive[17]. Excessif (> 8) avec surdosage, hors normes OMS ($6,5-8,5$)[17].
- **Calcium** : Trop faible ($< 20 \text{ mg/L}$) ou trop élevé ($> 120 \text{ mg/L}$) avec des problèmes de dosage, affectant la stabilité chimique[17].

II.6.2. Voie biochimique :

- **TSS/SDI** : Augmentent avec obstructions ou ouvertures intempestives au captage/prétraitement, Ces anomalies entraînent une surcharge en particules vers les membranes d'osmose inverse, ce qui augmente le risque d'encrassement biologique (biofouling) et compromet l'efficacité du traitement [14].
- **CFU** : Des concentrations élevées en unités formant colonie ($> 100 \text{ CFU/mL}$) résultent souvent d'une désinfection insuffisante ou d'une contamination microbienne, rendant l'eau impropre à la consommation humaine selon les normes de l'OMS ($\text{CFU} < 100/\text{mL}$) .

Un traitement par chloration permet de réduire cette charge, mais une surdose peut entraîner la formation de sous-produits toxiques comme les trihalométhanes (THM).

II.6. Conclusion :

L'association de l'analyse AMDEC et de l'étude complémentaire a permis de comprendre plus précisément l'effet réel des pannes techniques sur la qualité de l'eau dessalée, tant en termes chimiques que microbiologiques. Cette double analyse, combinant l'évaluation des risques et l'observation analytique, a révélé les relations directes entre certaines irrégularités du processus et les fluctuations de paramètres critiques de la qualité. Cette base analytique renforce l'importance d'une approche préventive basée sur l'HACCP, en fournissant un soutien solide pour repérer les points critiques et garantir la sûreté sanitaire de l'eau. Cela s'inscrit aussi dans une démarche de respect des normes internationales relatives à la gestion de la sécurité alimentaire, comme stipulé par la norme ISO 22000. Par conséquent, l'articulation entre le diagnostic technique et la gestion sanitaire représente un outil indispensable pour assurer de manière pérenne la qualité de l'eau produite.

Chapitre III :

Étude sanitaire par l'approche HACCP

III.1 Introduction :

L'étude du processus de dessalement réalisée dans le chapitre précédent, au moyen de la technique AMDEC, a permis de repérer les éventuels dysfonctionnements pouvant nuire à l'efficacité du système. Cependant, même si cette méthode est importante, elle se concentre principalement sur les aspects techniques et ne garantit pas une compréhension exhaustive des risques susceptibles d'entraver la sécurité sanitaire de l'eau produite.

Dans cette perspective, il est essentiel d'opter pour une stratégie plus préventive qui puisse ordonner toutes les bonnes pratiques à chaque phase du processus de dessalement. La méthode HACCP vise précisément à identifier, évaluer et contrôler les risques associés à la sécurité du produit fini, une approche reconnue mondialement pour son efficacité. L'objectif de son inclusion dans cette recherche est donc d'assurer la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, tout en préservant l'efficacité globale du système de production.

III.2. Présentation générale de la méthode HACCP :

Le système HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points), soit en français « Analyse des dangers – points critiques pour leur maîtrise », constitue une méthode structurée destinée à identifier, évaluer et maîtriser les dangers pouvant compromettre la sécurité sanitaire d'un produit. Initialement développée pour le secteur agroalimentaire, cette approche a été reconnue et normalisée par le Codex Alimentarius comme un outil de référence international en matière de prévention des risques sanitaires

[20].

Fondée sur des principes scientifiques, la méthode HACCP privilégie une démarche préventive à l'analyse a posteriori du produit fini. Elle permet non seulement de renforcer la sécurité des produits, mais aussi d'assurer une traçabilité rigoureuse et de répondre aux exigences des autorités réglementaires. Dans le cadre du traitement de l'eau potable, cette méthode s'avère particulièrement pertinente pour garantir une maîtrise continue des risques tout au long du procédé.

III.2.1 Principes et étapes de la méthode :

Dans cette perspective, il est essentiel d'opter pour une stratégie plus intégrée et préventive qui puisse ordonner toutes les bonnes pratiques à chaque phase du processus de dessalement. La méthode HACCP vise précisément à identifier, évaluer et contrôler les risques associés à la sécurité du produit fini, une approche reconnue mondialement pour son efficacité. L'objectif de son inclusion dans cette recherche est donc d'assurer la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, tout en préservant l'efficacité globale du système de production.

1. Constituer une équipe HACCP

Former une équipe multidisciplinaire avec des compétences en production, qualité, hygiène, etc., pour assurer une analyse complète des risques, conformément au Codex Alimentarius , Section 4.1 [20].

2. Décrire le produit

Détailler les caractéristiques du produit (ingrédients, composition, emballage, durée de conservation, etc.) afin d'identifier les risques spécifiques associés, conformément à la norme ISO 22000:2018, clause 8.5.2.2 [20].

3. Identifier l'utilisation prévue

Définir comment le produit sera utilisé (consommation directe, cuisson, public cible, etc.) pour évaluer les dangers liés à son usage, conformément à la norme ISO 22000:2018 [20].

4. Élaborer un diagramme de fabrication

Créer un schéma détaillant chaque étape du processus de production, de la réception des matières premières à la distribution, conformément ISO 22000:2018 [20].

5. Vérifier le diagramme sur site

Confirmer que le diagramme correspond à la réalité des opérations en production pour garantir l'exactitude des analyses, conformément à la norme ISO 22000 :2018, clause 8.5.2.3 [20].

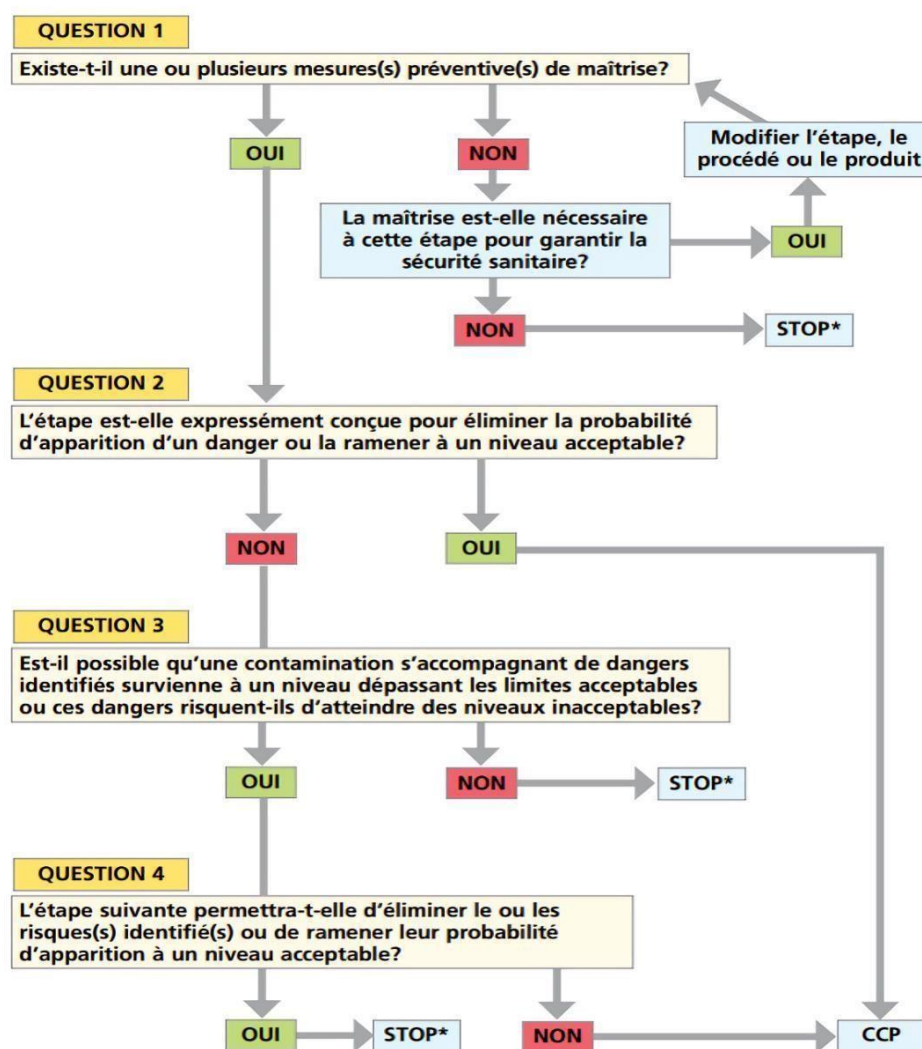
6. Analyser les dangers (Principe 1)

Identifier les dangers à chaque étape (biologiques, chimiques, physiques, allergènes) et évaluer leur gravité et probabilité, conformément [20].

7. Identifier les points critiques pour la maîtrise (CCP) (Principe 2)

Utiliser un arbre de décision pour déterminer les étapes où un contrôle est essentiel pour éliminer ou réduire un danger, conformément au *Codex Alimentarius* [20] .

- À cette étape, l'utilisation de l'arbre de décision proposé par le Codex Alimentarius (Section 4.5) permet de guider l'évaluation de chaque étape du procédé à travers une série de questions logiques afin de déterminer si un CCP doit être établi.



* Cette étape n'est pas un point critique pour la maîtrise (CCP). Passer à l'étape suivante.

Figure III.19 : Arbre de décision pour l'identification des CCP (Codex Alimentarius, Section 4.5)

III.2.2.a Interprétation de l'arbre de décision

L'arbre de décision est un outil logique structuré en quatre questions binaires (« Oui » ou « Non »), utilisé pour déterminer si une étape du procédé constitue un Point Critique pour la Maîtrise (CCP).

Chaque réponse conditionne la question suivante ou conduit à une conclusion. Deux cas principaux permettent d'identifier un CCP :

Soit la réponse à la deuxième question indique que l'étape élimine ou réduit significativement un danger identifié, Soit, en l'absence de maîtrise à cette étape (réponse « non » à la deuxième question), les réponses aux troisième et quatrième question montrent que le danger risque d'apparaître à un niveau inacceptable sans possibilité de maîtrise ultérieure.

Dans ces deux cas, l'étape est classée comme CCP, nécessitant alors des mesures de surveillance renforcées. Cet outil, bien qu'optionnel, est fortement recommandé par le Codex Alimentarius pour harmoniser l'analyse des dangers et garantir la rigueur méthodologique dans l'identification des CCP. [20]

8. Établir des limites critiques pour chaque CCP (Principe 3)

Fixer des seuils précis (ex. : température minimale de cuisson à 75°C) pour garantir la sécurité alimentaire, conformément au *Codex Alimentarius* [21]

9. Établir un système de surveillance pour chaque CCP (Principe 4)

Définir les méthodes et fréquences de contrôle (ex. : thermomètre toutes les heures) pour s'assurer

que les limites critiques sont respectées, conformément au *Codex Alimentarius* [21]

10. Établir des actions correctives (Principe 5)

Décrire les mesures à prendre en cas de dépassement des limites critiques (ex. : rejeter un lot, ajuster un équipement), conformément au *Codex Alimentarius*, et au *Code d'usage international recommandé* [21]

11. Mettre en place des procédures de vérification (Principe 6)

Vérifier régulièrement l'efficacité du système HACCP par des audits, tests microbiologiques, etc, conformément au *Codex Alimentarius* et au *Code d'usage international recommandé – Principes généraux d'hygiène alimentaire*, Principe 6 [21].

12. Tenir des registres et une documentation (Principe 7)

Documenter toutes les procédures, surveillances, écarts et actions correctives pour assurer la traçabilité et la conformité réglementaire, conformément au *Codex Alimentarius* et au *Code d'usage international recommandé* [21].

III.3 Démarches HACCP pour la station de dessalement

Elle constitue une étape complémentaire essentielle, visant à renforcer le contrôle des dangers sanitaires potentiels liés à la production d'eau potable, tout en apportant une contribution significative à la résolution de la problématique centrale de ce travail ; par l'application des 12 étapes de la méthode étudiée d'une manière détaillée :

Étape1- Constituer une équipe HACCP :

Pour mettre en place la méthode HACCP dans notre station de dessalement d'eau de mer, nous avons réuni une équipe aux compétences variées. Elle regroupe des experts en ingénierie des procédés, en microbiologie, en gestion de la qualité, en hygiène et en maintenance.

Chacun apporte son savoir-faire pour analyser en profondeur les risques. Grâce à cette diversité, nous pouvons examiner les pratiques et identifier les points critiques à surveiller tout au long du processus de dessalement. Cette approche respecte les recommandations du *Codex Alimentarius*, Section 4.1 [7] pour garantir une analyse solide et complète.

Étape2 Description du produit :

Le produit final de notre station est de l'eau potable destinée à la consommation humaine, obtenue à partir d'eau de mer par osmose inverse. Voici ses principales caractéristiques :

**Tableau III.1 : Les caractéristiques du produit par la station de dessalement d’eau de mer
OyM**

Le produit final	L’eau potable destinée à la consommation humaine
Procédé	Osmose inverse
Origine	Eau de mer traitée
Aspect	- Claire - Sans couleur - Sans odeur
Conditionnement	Distribuée via un réseau ou stockée dans des réservoirs
Conservation	Reste potable tant qu’aucune contamination n’intervient après production
Qualité	Conforme aux normes de l’OMS et aux réglementations locales (pH, conductivité, TDS, etc.)

Cette description détaillée nous aide à repérer les risques spécifiques liés au produit. Elle suit les exigences de la norme ISO 22000 :2018, clause 8.5.2.2 [8], pour assurer une évaluation précise.

Étape 3. Définir l’utilisation prévue :

L’eau produite par la station de dessalement est destinée à être consommée directement par la population, sans qu’un traitement supplémentaire soit nécessaire au niveau des maisons. Elle s’adresse à tout le monde, des enfants aux personnes âgées, y compris les groupes sensibles qui nécessitent une eau d’une qualité irréprochable. L’eau obtenue par osmose inverse à partir d’eau de mer, est vendue à des organismes publics comme l’Algérienne des Eaux (ADE), qui la distribue via des réseaux de canalisations, souvent en passant par des châteaux d’eau. Ces châteaux d’eau, utilisés pour stocker et réguler la distribution de l’eau, jouent un rôle clé dans la chaîne d’approvisionnement. Cependant, ils peuvent devenir des points à risque si leur entretien n’est pas

rigoureux.

Étape 4. Élaborer un diagramme de fabrication

Un diagramme de fabrication basique a été élaboré pour représenter les étapes principales du processus, comme illustré dans le schéma:

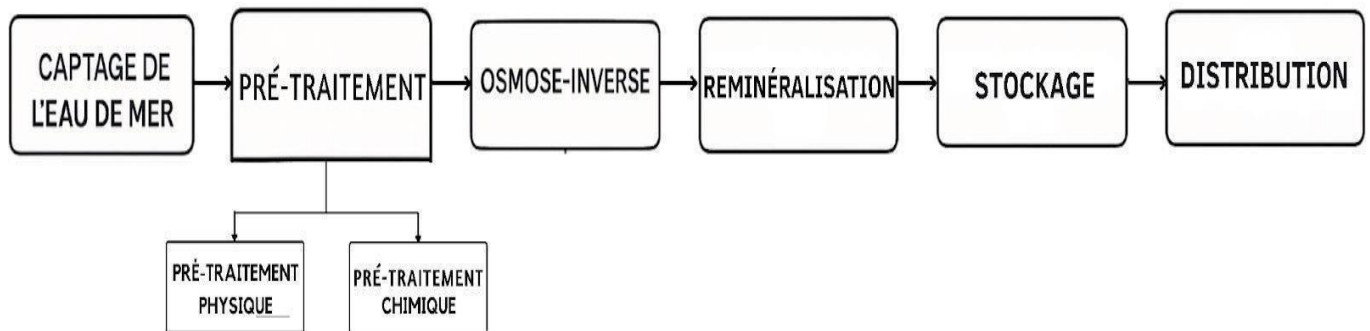


Figure III.20 : Chaîne de traitement de l'eau de mer par dessalement

Ce schéma regroupe les phases essentielles suivantes : captage de l'eau de mer, prétraitement (divisé en prétraitement physique et chimique), osmose inverse, reminéralisation, stockage, et distribution. Un schéma plus détaillé du processus de dessalement, incluant les sous-étapes, les équipements spécifiques, et les paramètres opérationnels, est présenté dans le chapitre précédent de ce mémoire (Figure I.2 " Schéma détaillée du processus de dessalement de la station OyM"). Ce diagramme détaillé prend également en compte les infrastructures de stockage et de distribution, Cette approche permet de poser les bases nécessaires à l'analyse des dangers et s'aligne sur les recommandations du Codex Alimentarius, CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003, Section 4.3 [7], qui exige un schéma précis pour identifier les points critiques dans le cadre de la méthode HACCP.

Étape 5. Vérification sur place du diagramme de processus

Une vérification sur site a été réalisée pour vérifier que le schéma basique "Chaîne de traitement de l'eau de mer par dessalement " (voir Figure III.2) et la figure détaillée du chapitre précédent correspondent aux opérations réelles. Cette inspection a couvert les étapes : captage de l'eau de mer, prétraitement (physique et chimique), osmose inverse, reminéralisation, stockage, et distribution.

L'équipe a visité chaque étape avec les opérateurs pour confirmer les

procédures et corriger les différences, comme des équipements supplémentaires. Cette démarche suit le Codex Alimentarius, CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003, Section 4.3 [7].

Étape 6. Analyser les dangers (Principe 1) :

L'intention est de détecter tous les risques éventuels susceptibles de mettre en danger la sûreté sanitaire de l'eau dessalée à chaque phase du processus (capture d'eau, prétraitement, osmose inverse, post-traitement, stockage et distribution). On évalue les risques en tenant compte de leur possibilité de survenance et de leur impact sur la santé humaine.

En croisant ces deux paramètres, on obtient un **niveau de risque** permettant de déterminer si le danger est **acceptable**, **tolérable sous conditions**, ou **inacceptable**. Cette approche est indispensable pour établir les points critiques de contrôle (CCP) et garantir un niveau élevé de maîtrise sanitaire tout au long du processus.

		Impact				
		Insignifiant	Mineur	Modéré	Majeur	Catastrophique
Probabilité	Très probable	5 - Moyen	10 - Elevé	15 - Très élevé	20 - Très élevé	25 - Très élevé
	Probable	4 - Moyen	8 - Moyen	12 - Elevé	16 - Très élevé	20 - Très élevé
	Possible	3 - Faible	6 - Moyen	9 - Moyen	12 - Elevé	15 - Très élevé
	Peu probable	2 - Très faible	4 - Faible	6 - Moyen	8 - Moyen	10 - Elevé
	Improbable	1 - Très faible	2 - Très faible	3 - Faible	4 - Moyen	5 - Moyen

Figure III.21 : matrice de criticité de risque 5x5

(i) Matrice d'impact (gravité (G))

La matrice de gravité évalue l'**impact potentiel** du danger sur la santé humaine ou la qualité de l'eau potable,

Tableau III.2 : Échelle de gravité (G) des dangers

Score	Niveau	Description
1	Insignifiant	Aucun impact sanitaire ou organoleptique significatif.
2	Mineur	Impact organoleptique ou sanitaire mineur (ex. : inconfort léger).
3	Modéré	Impact sanitaire temporaire ou qualité réduite affectant la conformité.
4	Majeur	Maladies graves ou toxicité aiguë, impact sanitaire significatif.
5	Catastrophique	Risque mortel ou toxicité chronique à long terme.

(ii) Matrice de la probabilité (fréquences (F))

La matrice de fréquence évalue la probabilité qu'un danger se produise dans les conditions du procédé de dessalement, en tenant compte des équipements

Tableau III.3 : Échelle de fréquence (F) des dangers

Score	Niveau	Description
1	Impossible	Le danger ne se produit que dans des conditions exceptionnelles, grâce à des contrôles robustes.
2	Peu probable	Le danger peut survenir occasionnellement, mais est maîtrisé par des mesures standards.
3	Possible	Le danger est possible dans des conditions courantes sans contrôles stricts.
4	Probable	Le danger est fréquent si les mesures de maîtrise sont insuffisantes.
5	Très probable	Le danger est quasi certain sans intervention.

(iii) Approche méthodologique adoptée pour l'analyse des risques

Les matrices de gravité et de fréquence ont été élaborées spécifiquement pour le contexte d'une station de dessalement. Elles reposent sur une échelle de 1 à 5, couramment utilisée dans les méthodes HACCP et AMDEC afin de hiérarchiser les dangers selon leur criticité. Cette approche permet une évaluation graduée et opérationnelle des scénarios identifiés. En l'absence de référentiel normatif strict, la construction de ces grilles s'appuie sur les caractéristiques techniques du procédé étudié et les recommandations de la littérature, notamment l'ouvrage de Mortimore & Wallace (2013) [23], qui préconisent l'adaptation des outils d'analyse aux réalités du terrain

Tableau III.4 : Analyse des Dangers, Cotations de Risque et Mesures Préventives pour une Station de Dessalement d'Eau de Mer (Étape 6 HACCP)

Etape	Type de danger	Danger identifié	Causes	Evaluation Des risques			Mesure préventive
				G	F	C	
1.Capture de l'eau de mer	Dangers biologiques	Contamination par des micro-organismes pathogènes	-Pollution côtière (rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles près de la prise d'eau). -Ruissellement terrestre transportant des pathogènes via les courants marins. -Mauvais positionnement des tuyauteries (proximité de sources de contamination).	4	2	8	- Positionner la prise à 10 mètres loin des rejets - Installer des grilles Baudry efficace à la ligne Seabed Infiltration Gallery (SIG) - Test microbiologique

		Prolifération d'algues toxiques	-Blooms algaux dus à des conditions environnementales (température élevée, excès de nutriments comme azote/phosphore). -Aspiration d'eau contaminée par des algues lors d'épisodes saisonniers. -Défaillance des grilles Beaudry laissant passer des fragments d'algues.	5	2	10	- Surveillance des blooms par des satellites ou capteurs - Maintenir les grilles -Préfiltrer l'eau brut
	Dangers chimiques	Polluants industriels/maritimes	-Pollution marine par des rejets industriels ou portuaires (navires, usines côtières). -Déversements accidentels d'hydrocarbures ou produits chimiques. -Présence de microplastiques dans l'eau de mer (dégradation de déchets plastiques).	4	2	8	- Analyser eau brute (métaux, HAP), - Eloigner prise des zones industrielle - Filtres à charbon actif

		Résidus agricoles	-Ruissellement agricole transportant des pesticides/nitrates vers la mer. -Proximité de zones agricoles côtières avec rejets non contrôlés.	3	2	6	- Surveiller nitrates/ - Prise loin des zones agricoles - Filtration avancée
	Dangers physiques	-Particules et débris	-Colmatage ou défaillance des grilles Beaudry (mauvaise maintenance, surcharge). -Fortes tempêtes ou courants marins augmentant la turbidité et les débris. -Usure des tuyauteries PRFV laissant pénétrer des sédiments.	3	2	6	- Maintenir grilles - Inspecter tuyauteries PRFV - Surveiller turbidité
2.Prétraitement– Physique A.1 Filtration à	Dangers biologiques	-Biofilms (Pseudomonas aeruginosa, Legionella)	-Lavage insuffisant des filtres -maintenance inadéquate, température/humidité favorisant la croissance bactérienne.	4	2	8	- Lavage régulier (saumure/air) - -Surveillance microbiologique - -Maintenance filtres bicouches

sable	Danger chimiques	-Relargage de contaminants des filtres (anthracite, silice)	Dégradation des matériaux filtrants, mauvais choix de matériaux non conformes.	2	2	4	- Utiliser matériaux conforme - Inspecter filtres
	Dangers physiques	-Particules résiduelles (sable, sédiments)	Encrassement des filtres (surface 94 m², vitesse 5,77 m/h), défaillance des électropompes de lavage.	3	3	9	- Surveiller turbidité, - Maintenir pompes - Remplacer filtres encrassés
2. Prétraitement - Physique A.2 Filtration à cartouches	Dangers biologiques	-Formation de biofilms	-Non-remplacement des cartouches (0,5–150 microns) -Accumulation de matière organique.	4	2	8	- Remplacer cartouches (0,5–150 microns) régulièrement - Surveillance microbiologique
	Dangers chimiques	-Relargage de microplastiques/monomères des cartouches	-Usure chimique/physique des cartouches.	3	2	6	- Utiliser cartouches certifiées - Inspecter leur état

	Dangers physiques	-Passage de particules fines	-Saturation des cartouches, -Défaillance des lignes de filtration	3	3	9	- Surveiller pression lignes - Remplacer cartouches saturées
2. Prétraitement – Chimique B.1 Désinfection (NaOCl)	Dangers biologiques	-Désinfection insuffisante	-Dosage incorrect de NaOCl (<0,5 mg/L), défaillance des pompes doseuses -Forte charge organique.	5	2	10	- Contrôler dosage NaOCl (0,5–1 mg/L), - Calibrer pompes - Mesurer chlore résiduel
	Dangers chimiques	-Sous-produits de désinfection (trihalométhane, acides haloacétiques)	- Réaction du chlore avec matière organique résiduelle, -Mauvais contrôle du dosage.	4	3	12	- Réduire matière organique (filtration), - Analyser trihalométhane - Ajuster NaOCl
		-Surdosage de NaOCl (goût chloré, toxicité)	- Dosage excessif (>1 mg/L), - dysfonctionnement des pompes doseuses.	4	4	16	- Calibrer pompes, - Surveiller chlore résiduel (<1 mg/L)

2. Prétraitement - Chimique B.2 Coagulation- Floculation	Dangers biologiques	-Survie de micro-organismes si la floculation inefficace	-Dosage incorrect de coagulant (5,5–8,3 mg/L) -Filtration à sable insuffisante.	5	4	20	- Ajuster dosage coagulant - Contrôler efficacité filtration
	Dangers chimiques	-Résidus de coagulant (sels D'aluminium/fer)	-Surdosage de coagulant -Mauvais contrôle des pompes doseuses.	5	4	20	- Calibrer pompes, - Analyser résidus coagulants
	Dangers physiques	-Particules résiduelles	-Floculation inefficace -Saturation des filtres à sable.	3	3	9	- Optimiser floculation - Surveiller turbidité - Maintenir filtres
2. Prétraitement – Chimique B.3 Métabisulfite de sodium	Dangers biologiques	-Survie de micro-organismes (floculation inefficace)	-Élimination totale du chlore sans désinfection finale, -Surdosage de métabisulfite.	5	4	20	- Assurer désinfection finale - Calibrer dosage métabisulfite - Contrôler la qualité microbiologique avant reprise de la Production.

	Dangers chimiques	-Résidus de sulfites	-Surdosage de métabisulfite -Dysfonctionnement des pompes doseuses.	5	4	20	- Calibrer pompes, - Analyser résidus sulfites
2. Prétraitement – Chimique B.4 Anti-scalant	Dangers chimiques	-Résidus d’anti-scalant (polyphosphates)	-Surdosage d’anti-scalant, -Analyse inadéquate de l’eau/système.	4	3	12	- -Ajustement de dosage via l’analyse eau/système - Calibration des pompes doseuses
3 doseuses . Osmose inverse	Dangers biologiques	-Contamination par micro-organismes (membranes endommagées)	-Membranes endommagées, prétraitement inefficace (filtration/désinfection).	5	5	25	- Inspection des membranes - Renforcement du prétraitement (filtration et désinfection). - Vérification microbiologique avant reprise.
	Dangers chimiques	-Relargage de Monomères/plastifiants	-Dégradation des membranes -Utilisation de membranes non conformes.	3	3	9	- Utilisation des membranes certifiées, - Inspection de L’intégrité des membranes

	Dangers physiques	-Particules résiduelles (membranes endommagées)	-Usure des membranes (4 unités, 12 racks, 196 tubes), -Maintenance insuffisante.	3	3	9	- Surveillances de la pression (65 bars), - Inspection des membranes
4. Reminéralisation	Dangers chimiques	-Surdosage de CO ₂ ou Ca(OH) ₂	-Dosage incorrect dans les chambres/saturateurs -Dysfonctionnement des pompes doseuses.	4	3	12	- Calibration des pompes, - Surveillance de pH/dureté, - Analyse CO₂/Ca(OH)₂
	Dangers biologiques	-Contamination des produits (CO ₂ , Ca(OH) ₂)	-Impuretés dans les produits, -Stockage inapproprié (silos contaminés).	4	2	8	- Utiliser produits purs, - Stocker silos hermétiquement - Tests microbiologiques
5. Stockage/	Dangers biologiques	-Prolifération bactérienne (<i>Legionella</i> , <i>Pseudomonas</i>)	-Désinfection insuffisante (NaOCl) -Maintenance inadéquate des réservoirs bétonnés, -Stagnation de l'eau.	5	3	15	- Maintenir chlore résiduel (<1 mg/L), - Nettoyer réservoirs - Eviter stagnation

Désinfection	Dangers chimiques	-Sous-produits de désinfection (trihalométhane, haloacétiques)	-Réaction du chlore avec matière organique résiduelle -Dosage incorrect.	5	3	15	-Réduire matière organique -Analyser trihalométhane Ajuster de NaOCl
		-Surdosage de NaOCl	-Dosage excessif dans la chambre de pompage -Défaillance des pompes doseuses.	4	4	16	- Calibrer pompes, - Surveiller ch
	Dangers physiques	-Corrosion des Réservoirs/tuyaux (particules métalliques)	-Usure du béton armé ou des tuyaux, absence de revêtements anti -Corrosion, maintenance insuffisante.	4	3	12	- Utiliser matériaux résistants, - Inspection des tuyaux/réservoirs

Après avoir identifié les dangers significatifs à chaque étape du procédé (étape 6), il est désormais crucial de déterminer ceux qui nécessitent une maîtrise stricte. Pour cela, l'arbre de décision HACCP du Codex Alimentarius constitue l'outil de référence. Il repose sur une série de quatre questions logiques permettant d'identifier objectivement les CCP.

Bien qu'une réponse dès la deuxième question puisse parfois suffire à trancher, l'ensemble des quatre questions a été systématiquement suivi. Cette démarche assure une analyse rigoureuse, cohérente et traçable, en s'appuyant sur des justifications techniques basées sur le fonctionnement réel de la station, les normes applicables et les conditions d'exploitation.

Le tableau suivant illustre cette analyse détaillée : chaque danger est examiné à travers les quatre questions, avec des réponses argumentées et une décision finale quant à la nature de CCP.

Tableau III.5 : Identification des points critiques de contrôle (CCP) selon l'arbre de décision HACCP (étape 7)

CCP	Étape	Q1 : Existe-t-il des Mesures Préventives ?	Justificatif Q1	Q2 : Cette étape est-elle conçue pour éliminer ou réduire les dangers ?	Justificatif Q2	Q3 : La contamination pourrait-elle dépasser les niveaux acceptables ?	Justificatif Q3	Q4 : Une étape ultérieure éliminera-t- elle ou réduira-t-elle les dangers ?	Justificatif Q4	Décision Finale
CCP 1	Prise d'eau de mer	Oui	- Surveillance de la qualité, -site éloigné - grilles	Non	La prise d'eau ne Traite pas l'eau, elle la capte simplement	Oui	-L'eau brute Peut contenir Pb, coliformes, turbidité> normes	Oui	Étapes comme filtration, désinfection et osmose-inverse gèrent les dangers	 Non- CCP

CCP2	Filtration Physique (sable + cartouche)	Oui	-Rétro lavage, remplacement des cartouches -contrôle pression	Oui	Conçue pour retenir particules et abaisser turbidité	Oui	-Turbidité excessives. -risque de micro-organismes	Non	Aucune autre étape ne corrige les défauts de filtration	✓ CCP
CCP3	Désinfection primaire (NaOCl)	Oui	Dosage maîtrisé, suivi THM, temps de contact	Oui	Élimine les pathogènes microbiens	Oui	-Les pathogènes résiduels dangereux pour la santé	Non	Aucun traitement désinfectant avant Osmose inverse.	✓ CCP
CCP4	Coagulation -floculation (FeCl ₃)	Oui	Dosage, pH, turbidité surveillés	Oui	Favorise l'agglomération des particules et clarifie l'eau	Oui	-Turbidité et Fe résiduel en cas de mauvais fonctionnement	Non	Étapes suivantes Ne compensent pas l'inefficacité de cette étape	✓ CCP
CCP5	Neutralisation du chlore (Na ₂ S ₂ O ₅)	Oui	Neutralisation chimique contrôlée, pH suivi	Oui	Protège les membranes d'osmose contre le chlore.	Oui	-Chlore résiduel endommage les membranes	Non	Aucune étape ultérieure ne peut corriger cette erreur	✓ CCP

CCP6	Antitartre	Oui	Dosage d'antitartre et LSI surveillés	Oui	Réduit risque de précipitation de sels	Oui	Risque d'entartrage et colmatage des membranes	Non	Dommages irréversibles sur les membranes	✓ CCP
CCP7	Osmose inverse	Oui	Tests d'intégrité, conductivité, pression surveillées	Oui	Élimine pathogènes, sels, produits chimiques	Oui	Passage de contaminants si défaillance des membranes.	Non	Aucun autre traitement d'épuration après	✓ CCP
CCP8	Reminéralisation (CO ₂ + Ca(OH) ₂)	Oui	Dosage contrôlé, suivi pH et Ca ²⁺	Oui	Corrige dureté et pH stabilise l'eau	Oui	-Eau trop agressive ou entartrant en cas d'erreur	Non	Dernière étape de stabilisation, pas de correction possible	✓ CCP
CCP9	Désinfection finale (Stockage & distribution)	Oui	Dosage de chlore, nettoyage réservoirs, tests microbio	Oui	Prévention de la contamination microbienne	Oui	Risque de Coliformes et biofilm	Non	Plus de traitement après la distribution	✓ CCP

L'identification des CCP via l'arbre de décision, a permis d'avoir une représentation schématique du procédé et de localiser précisément chaque point critique de contrôle. Cette visualisation facilite la compréhension du système de maîtrise des dangers tout au long du processus de dessalement

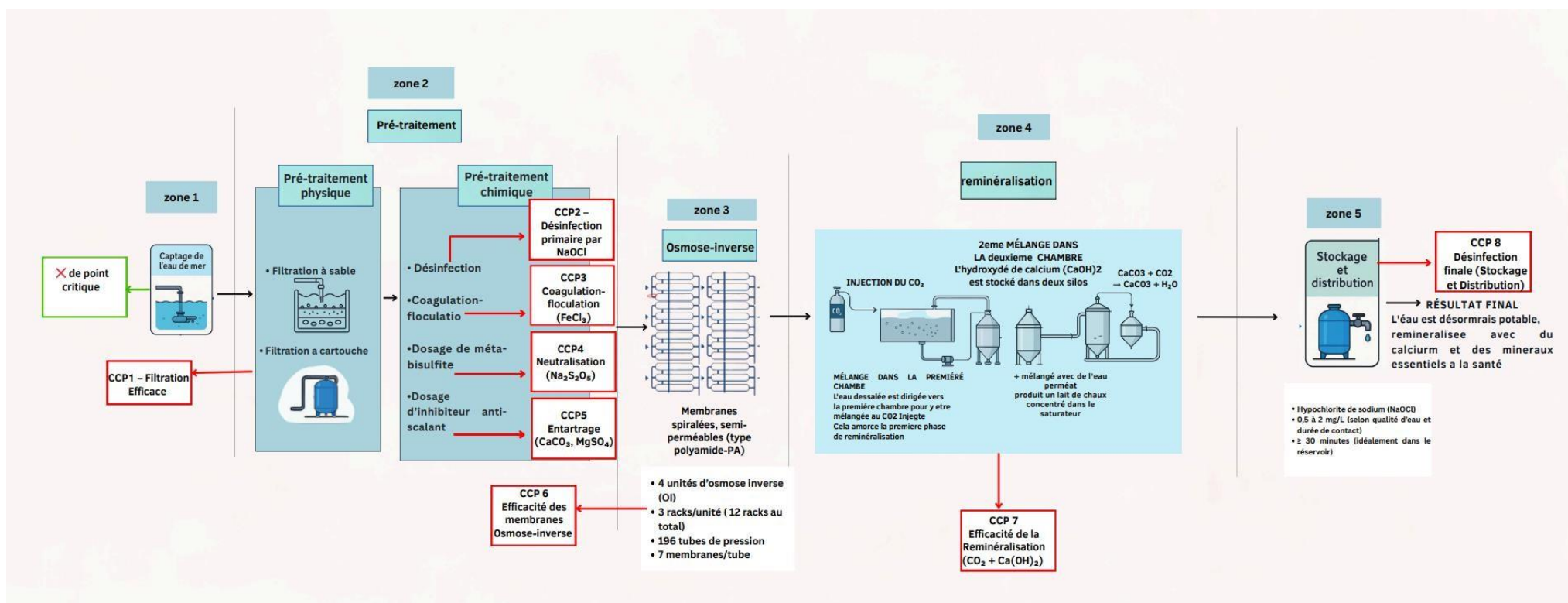


Figure III.22 : Illustration les points critique du processus de dessalement d'eau de mer en eau potable (Auteur)

Consolidation des étapes 8 à 11 de la méthode HACCP : Analyse complète des CCP identifiés

À la suite de l'identification des points critiques de contrôle (CCP) via l'arbre de décision HACCP (étape 7), les phases subséquentes — soit la détermination des limites critiques (étape 8), l'instauration des systèmes de veille (étape 9), la définition des mesures correctives (étape 10) et les procédures de vérification (étape 11) — seront exposées de façon concise et organisée dans un tableau récapitulatif global de l'analyse HACCP:

Tableau III.6 : Etude HACCP global des points critiques du procédé de dessalement

Étape	CCP	Dangers Potentiels	Limites critiques	Surveillance	Mesures correctives
2.1.a Filtration PHYSIQUE (sable)	CCP1 : Filtration à sable bicouche anthracite-silice. Efficace.	Particules suspension - Passage de micro- organismes - Apparition des biofilms	-Vitesse de filtration :5.77 m/h -Turbidité de l'eau filtrée : ≤ 1 NTU	- Utilisation des débitmètres numériques d'une manière continue. - Utilisation des capteurs en ligne de la turbidité toutes les 4 heures .	• Si turbidité > 1 NTU - Arrêt temporaire du système de filtration. - Lancement d'un contre- lavage des filtres • Si $\Delta P > 0,5$ bar - lavage immédiat - la charge filtrante

2.1.b. Filtration PHYSIQUE (Cartouche).	Efficacité de filtration à Cartouche	- Particules en suspension - Passage de micro-organismes - Biofilms	- Taille de pores : ≤ 5 microns - Turbidité en sortie : $\leq 0,5$ NTU -ΔP (pression différentielle) $\leq 1,5$ bar	- Capteur de turbidité en ligne -Pression différentielle contrôlée -Analyses hebdomadaires des biofilms	• Si turbidité > 1 NTU - Effectuer un by-pass temporaire - Relancer le prétraitement amont (filtration sable). • Si ΔP trop élevé - Changer la cartouche, - Vérifier la pompe. - Rétro lavage ou remplacement des filtres - Augmenter la fréquence de nettoyage •Si cartouche endommagée - Retrait immédiat - Contrôle de l'eau passée - Alerte qualité.
2.2.a Filtration	CCP2 – Désinfection primaire par NaOCl	-Désinfection insuffisante -Formation de sous-	- Concentration NaOCl : 0,5 à 1,0 mg/L	- Capteurs en ligne de chlore libre à l'entrée et à la sortie du	• Si concentration de chlore libre < 0,5 mg/L à

CHIMIQUE Désinfection primaire (NaOCl)		produits de désinfection (SPD) : trihalométhane (THM), acides haloacétiques -Chloration excessive	-Temps de contact ≥ 30 minutes - Résidu de chlore libre $\leq$ 0,1 mg/L avant l'osmose inverse -THM totaux : $\leq 80 \mu\text{g/L}$ (selon normes OMS)	Bassin tampon. -Vérification automatique et manuelle du dosage de NaOCl (pompes doseuses calibrées). - Alarmes automatiques en cas de dépassement du seuil de chlore . -Analyses mensuelles des SPD(THM)	L'injection - Augmenter immédiatement la dose de NaOCl - Vérifier la pompe doseuse (calibration, niveau de solution) -Contrôle de la solution mère . • Si chlore libre résiduel $> 0,1$ mg/L en sortie vers l'osmose inverse - Réduire le dosage de NaOCl - Vérifier le temps de contact - Si les THM dépassent 80 $\mu\text{g/L}$ - Réduire la concentration de chlore ou temps de contact. - Lancer un nettoyage du bassin de contact pour retirer les biofilms éventuels.
---	--	--	---	--	--

2.2.b Filtration CHIMIQUE Coagulation-Floculation (FeCl₃)	CCP3 Coagulation-floculation (FeCl₃)	-Mauvaise clarification de l'eau. -Surdosage de coagulant (excès de fer résiduel) -Résidus métalliques (particules non éliminées)	- Turbidité en sortie du déca 2 NTU - pH entre 6,5 et 7,5 - Dosage optimal de FeCl₃ : 5,5 à 8,3 mg/L (à ajuster selon la turbidité et alcalinité)	- Capteurs de Turbidité en ligne avant et après coagulation . - Analyse manuelle de la Turbidité toutes les 4 heures. - Jar-test journalier pour ajuster le dosage optimal de FeCl₃ en fonction des caractéristiques de l'eau brute (pH , turbidité, matière organique) . - Contrôle du pH en ligne dans la zone de mélange . - Suivi du débit de dosage par des débitmètres et balances volumétrique. - Contrôle hebdomadaire des résidus métalliques (Fe totale) dans l'eau traite.	• Si turbidité en sortie > 2 NTU - Augmentation progressive de la dose de FeCl₃. - Vérification du système de mélange . - Vérification de la vitesse de floculation . - Nettoyage des cuves de coagulation/floculation en cas d'accumulation de boues . • Si pH en dehors de la plage 6.5 - 7.5 - Ajouter un ajusteur de pH - Surveiller l'effet du FeCl₃ sur l'acidification de l'eau . - Vérifier les sondes de pH et leur calibration. - Surveiller l'effet du
--	---	--	--	--	---

					FeCl₃ sur l'acidification de l'eau. • S'il y'a un excès de surdosage de fer - Réduire immédiatement le débit de la pompe doseuse. - Relancer un jar-test avec de l'eau brute récente. - Vérifier l'intégrité du Système de dosage
2.2.c Filtration CHIMIQUE Neutralisation chlore (Na₂S₂O₅)	CCP4 Neutralisation (Na₂S₂O₅)	- Présence de chlore libre résiduel en entrée des membranes (colmatage des membranes d'osmose inverse). - neutralisation incomplète (sous	-Chlore résiduel en entrée des membranes : 0,00 mg/L -Ratio stœchiométrique Na₂S₂O₅ : 1,5:1 par rapport au Cl₂ -pH de l'eau en sortie de neutralisation : entre 6,8 et 7,8 - Temps de contact	-Capteurs en ligne de chlore libre immédiatement après le point de neutralisation -Analyse manuelle du chlore résiduel toutes les 2 à 4 heures. -Contrôle pH en continu . -Surveillance du débit de dosage Na₂S₂O₅ via	• Si chlore libre détecter > 0 mg/L en entrée membranes - Arrêt immédiat de l'alimentation de l'unité d'osmose inverse . - Augmentation temporaire de débit de Na₂S₂O₅. - Reprise du test de DPD

		dosage de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) -Abaissement excessif du pH, eau trop acide. - Formation de sulfites résiduels si réaction incomplète ou déséquilibrée - Acidification excessive	minimal : ≥ 1 minute (selon configuration hydraulique)	débitmètre -Inspection hebdomadaire des pompes doseuses (calibration, fuites, état des tuyauteries).	après 5 minutes pour confirmation . - Vérification des sondes et pompes doseuse (buses bouchées, désamorçage, dysfonctionnement de l'électrovanne). • Si pH < 6,8 après dosage - Réduction de débit de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ - L'ajout de correcteur de pH en sortie si besoin (injection du NaOH dilué) - Vérification de la qualité du $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ utilise (fraîcheur, concentration réelle) - Vérification du temps de contact.
2.2.d Filtration		- Précipitation de sels minéraux (CaSO_4 , SiO_2 ...)	-Concentration optimale selon l'analyse de l'eau (généralement 3 à 8 mg/L)	-Dosage automatique surveille par débitmètre en ligne.	• Si indice de saturation (LSI) ≥ 0

CHIMIQUE Anti-scalant	CCP5 Entartrage (CaCO₃, MgSO₄)	-Formation de tartre sur la surface des membranes. -Blocage des canaux d'alimentation ou perte d'intégrité des pompes doseuses. - Obstruction des membranes	-Indice de saturation de Langelier (LSI) à l'entrée membranes < 0 -Absence de précipitation détectable en pré-membrane (visuellement ou via perte de performance) -ΔP des racks membranes : stable et < 3 bars	-contrôle visuel quotidien du niveau de la cuve d'anti-scalant . -Vérification hebdomadaire du fonctionnement de la pompe -Analyse ionique complète (Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, SiO₂...) : hebdomadaire ou après variation qualité de l'eau -Suivi du ΔP membranes (différence de pression entrée/sortie) en continu	- Augmentation immédiate le dosage d'anti-scalant selon les préconisations du fabricant - Effectuer un nouveau calcul de LSI avec la nouvelle concentration. - Contrôler l'efficacité après 24h via conductivité de l'eau produite et ΔP. • Si pompe doseuse défaillante - Remplacement immédiat par pompe de secours - Nettoyage et entretien de la pompe (piston, joints, clapets) - Consignation de l'incident et recalibration après intervention • Si ΔP augmente brutalement - Arrêt partiel ou complet
--	---	--	---	---	---

					du train de membranes - Nettoyage chimique des membranes (CIP acide ou acido-basique) - Inspection du prétraitement amont (coagulation, filtration) - Vérification du système d'injection : calibration de la pompe, nettoyage de la canne d'aspiration, remplacement du clapet anti-retour. • Si concentration trop faible - Réajustement de débit de la pompe doseuse . - Vérification de la densité réelle de la solution en cuve .
--	--	--	--	--	---

3.Osmose inverse	CCP 6 Efficacité des membranes Osmose-inverse	- Passage de contaminants (sels , pathogènes, produits chimiques) vers l'eau produite - Fuites internes dans les membranes ou les interconnexions. -Encrassement biologique(biofilm) ou chimique(calcaire, fer,silice,huiles) -Perforation ou vieillissement prématuré des membranes. -colmatage partiel ou total .	-Pression d'alimentation : 60 – 70 bars - Taux de rejet de sel : $\geq 98\%$ -Conductivité de l'eau produite : $\leq 100\mu\text{S/cm}$ - ΔP entre l'entrée et la sortie du rack ≤ 3 bars -Absence de fuite interne détectée - Température d'entrée : $\leq 45^\circ\text{C}$	- Capteurs de pression et conductivité en ligne relevés toutes les heures. - Analyse de l'eau osmosée pour les paramètres de conductivité , pH , coliformes (hebdomadaire) - Contrôle de ΔP en temps réel -Inspection visuelle mensuelle des boîtiers de pression et connexions	• Si conductivité en sortie $> 100 \mu\text{S/cm}$ - Suspicion de fuite interne ou membrane perforée - Arrêt immédiat du rack concerné - Remplacement de la membrane défaillante • Si $\Delta P > 3$ bars (colmatage progressif) - Lancement d'un CIP (Clean-In Place) avec les solution acide ou alcaline . • Si CIP est inefficace nettoyage approfondi ou remplacement • Si baisse de débit perméat ou pression anormale - Vérification des états des préfiltres , fonctionnement des pompes haute pression . - Contrôle de la température
--------------------------------	---	--	---	---	--

					d'alimentation • Si colonisation bactérienne suspectée (odeur, biofilm en aval) - Réalisation d'une désinfection des membranes. - Implémentation des analyses microbiologiques pour le post désinfection .
4. Reminéralisation (CO₂ + Ca(OH)₂)	CCP 7 Efficacité de la Reminéralisation (CO₂ + Ca(OH)₂)	-pH trop bas/élevé risque de corrosion des canalisations, relargage de métaux lourds (Fe, Cu) - Eau corrosive ou incrustante -formation de dépôts dans les réseaux -Déséquilibre minéral. -mauvaise dissolution de Ca(OH)₂	-pH de l'eau produite : 7,5 – 8,5 -Teneur en calcium (Ca²⁺) : 20 – 40 mg/L -Teneur en bicarbonates (HCO₃⁻) : 50 – 100 mg/L -Concentration de CO₂ dissous : 5 – 20 mg/L	-Mesures en continu du pH en ligne -Analyse quotidienne du calcium total via test colorimétrique ou titrage EDTA -Analyser hebdomadaire de bicarbonate titration acido-basique -Capteur de CO₂ en ligne ou calcul indirect via le dosage et pH mesure. -Contrôle visuel de la station de reminéralisation radiateur injection CO₂	• Si pH < 7,5 (eau trop acide) - Vérification du débit d'injection de Ca(OH)₂. - contrôle de l'injection de CO₂ - Réalisation d'une analyse du Ca²⁺ pour vérifier s'il est aussi bas. - Ajustement de la concentration mère. • Si pH > 8,5 (eau alcaline) - Vérification si le dosage de Ca(OH)₂ est trop élevé, s'il le cas il faut réduire le

				-Surveillance du débit des pompes dose de et de gaz CO₂ Contrôle de l'indice de Langelier (LSI). -Étalonnement hebdomadaire des pH -mètres et capteurs -Rinçage mensuel des injecteurs de Ca(OH)₂. -Vérification de la qualité de la chaux (Ca(OH)₂)	débit de la pompe doseuse . - Augmentation légère de CO₂ injecte pour stabiliser le pH et améliorer la stabilité du Ca²⁺. - Rinçage et nettoyage de dépôts de CaCO₃ dans les cuves ou canalisations. • Si Ca²⁺ < 20 mg/L ou HCO₃⁻ < 50 mg/L - Vérification de la concentration des solutions préparées (Ca(OH)₂) • Si Ca²⁺ bon mais HCO₃⁻ bas : augmenter l'injection de CO₂ • Si Ca²⁺ ou HCO₃⁻ trop élevés - Réduction des dosages respectifs - Vérification si le système de dosage est mal calibré
--	--	--	--	---	---

					(débit réel > débit prévu) - Contrôle de la vanne d'injection CO ₂ .
5. Stockage & distribution	CCP 8 Désinfection finale (Stockage et Distribution)	Recontamination bactérienne dans le réservoir et les canalisation - Développement biofilm à l'intérieur des réservoirs et les canalisation - Dépôts organique / minéraux favorisant la prolifération microbienne	- Chlore résiduel libre à la sortie du réservoir : 0,2 – 0,5 mg/L - Temps de contact minimum : ≥ 30 minutes - Absence de coliformes totaux : 0 CFU/100 mL	- Mesure continue du chlore libre en ligne a la sortie du réservoir - prélèvement hebdomadaire pour analyse microbiologique (coliformes totaux, E. coli, HPC) - vérification manuelle du temps de séjour de l'eau dans le réservoir - inspection visuelle du réservoir (fermé, sans infiltration, sans couleur, sans odeur) - Relevé journalier du niveau de chlore à différents points du réseau de distribution - Contrôle régulier de la température de l'eau (si > 25°C, le chlore se dégrade plus vite)	• Si chlore résiduel < 0,2 mg/L - Augmentation de dosage de chlore en sortie de l'osmose inverse ou juste avant le réservoir . - Vérification que de la pompe doseuse fonctionne correctement (vérification du débit réel, nettoyage de la tête de pompe) - Contrôle du temps de contacte s'il est trop court , rallongé par modification du débit / ajout de baffle dans le réservoir - Vérification de la qualité du chlore utilise (Age, stockage,

					Concentration) • Si coliformes détectés dans l'eau stockée ou distribuée - Arrêt immédiat de la distribution - Chloration de choc du réservoir jusqu'à 5 mg/L pendant 4h minimum - Vidange complète du réservoir puis rinçage avec eau chlorée . - Contrôle du réseau de distribution (vanne, bouclage.) - Réalisation de 3 séries de contrôle microbiologique espace et de 24 heures après nettoyage pour vérifier retour à la normale • Si biofilm ou dépôts visibles dans le réservoir
--	--	--	--	--	--

					- Programmation de nettoyage mécanique manuel ou robotisée - Utilisation d'un produit de nettoyage chloré ou un peracétique compatible - Rinçage abondant avec de l'eau propre et test de chlore résiduel avant remise en service - Augmentation de la fréquence de nettoyage préventif au moins deux fois par an recommandé.
--	--	--	--	--	--

Ce tableau a été élaboré afin de **favoriser une lecture opérationnelle du système HACCP appliqué à une station de dessalement d'eau de mer**, en mettant en évidence les **interactions essentielles entre les activités de surveillance, de correction, de vérification et de traçabilité**.

Etape 12. Constitution d'un système documentaire et enregistrement des données

La douzième étape de la démarche HACCP revêt une importance fondamentale, car elle assure la transition entre les principes théoriques et leur application concrète. Elle repose sur l'établissement d'un système documentaire exhaustif, garantissant à la fois la traçabilité des actions, la conformité aux normes en vigueur et la fiabilité des procédures mises en place. Ce cadre formel permet de consolider la crédibilité du système en offrant une base vérifiable pour les audits internes et externes.[22]

Etape12.1 :Application dans le contexte du dessalement de l'eau de mer OyM :

La station OyM déploie des protocoles rigoureux pour assurer une surveillance continue de la qualité de l'eau. Des prélèvements et analyses sont effectués à intervalles réguliers (généralement toutes **les quatre heures**) sur plusieurs segments stratégiques du processus :

1. Prise d'eau marine : Mesure des paramètres initiaux (salinité, turbidité, température, etc.) pour évaluer la qualité de la ressource brute.
2. Traitements préliminaires : Contrôle de l'efficacité des filtres physico-chimiques dans l'élimination
des particules et contaminants.
3. Osmose inverse : Vérification des performances des membranes, notamment via la conductivité et la teneur en sels résiduels.
4. Reconditionnement de l'eau : Ajustement de la minéralisation et contrôle des propriétés organoleptiques pour garantir une eau agréable et sûre.
5. Stockage et distribution : Dernière évaluation avant livraison pour s'assurer du respect des standards sanitaires.

Les données recueillies sont consignées dans des registres dédiés ou des bases de données sécurisées, puis synthétisées sous forme de rapports périodiques. Ces documents, parfois désignés sous le terme de « copies indices », constituent une mémoire technique indispensable. Leur conservation rigoureuse permet de répondre aux exigences légales et de faciliter les investigations en cas de non-conformité ou d'audit.

III.3 Synthèse du Système Documentaire HACCP en UTE Desaladora OyM

La mise en œuvre d'une démarche HACCP dans une station de dessalement repose sur cinq familles de documents clés, assurant maîtrise des risques, traçabilité et conformité réglementaire :

(i) Documents Pré-HACCP :

- Définition des spécifications de l'eau potable (qualité physico-chimique/microbiologique).
- Fiches techniques détaillées par étape (captage, osmose inverse, reminéralisation...).
- Référentiel normatif (OMS, normes nationales, exigences clients).

(ii) Programmes Prérequis (PRP)

- Procédures d'hygiène (nettoyage, désinfection), gestion des nuisibles/déchets.

- Maintenance préventive et plans de formation du personnel.
- (iii) Noyau HACCP (Étapes 1-11)
 - Analyse des dangers (biologiques, chimiques, physiques).
 - Identification des CCP via l'arbre de décision et tableau synthétique (limites critiques, surveillance, actions correctives).
- (iv) Traçabilité (Étape 12)
 - Enregistrements opérationnels :
 - Surveillance quadri horaire (salinité, pression, turbidité...).
 - Rapports d'anomalies et corrections appliquées.
 - Archivage des preuves (« copies indices ») pour audits.

5. Pilotage & Amélioration

- Manuel HACCP, révisions périodiques, sélection des fournisseurs.
- Intégration ISO 22000 pour une gestion optimisée des risques.

Enjeu : Ce système documentaire formalise la rigueur scientifique tout en offrant une transparence indispensable aux autorités et clients (ex. : ADE).

III.4 Conclusions :

Le travail fait s'inscrit dans une démarche plus globale de management de la sécurité des denrées alimentaires, conformément aux exigences de la norme ISO 22000:2018, qui fera l'objet d'un développement dans le chapitre suivant. Cette norme établit un lien direct entre les programmes prérequis (PRP), l'analyse des dangers et la gestion rigoureuse des points critiques, permettant ainsi d'atteindre les résultats escomptés de manière plus fiable et structurée.

Chapitre IV :

Engagement vers la norme ISO 22000

IV.1 Introduction

Afin de garantir la conformité et la sécurité des produits destinés à la consommation humaine, il est essentiel de s'appuyer sur des normes internationales. Celles-ci encadrent les études sanitaires et les contrôles réguliers, assurant ainsi une traçabilité rigoureuse tout au long du processus de production[24]. La norme ISO 22000 offre un cadre unifié qui intègre à la fois la gestion de la sécurité sanitaire des aliments et les principes du management organisationnel. En associant les exigences du système HACCP aux fondements d'un système de management de la qualité, elle permet une maîtrise efficace des dangers tout en assurant la cohérence des pratiques à chaque étape de la chaîne de production.

Ce chapitre examine la norme ISO 22000 au sein de la station de dessalement DESALADORA OyM ,sur les volets organisationnelle et managériale , tout en soulignant l'incorporation de la méthode HACCP en tant qu'instrument essentiel pour le contrôle de la sécurité sanitaire de l'eau potable produite[25].

IV.2 Présentation de la norme ISO 22000 :

IV.2.1 Définition et champs d'application :

La norme ISO 22000 est une norme internationale publiée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) qui spécifie les exigences relatives à un système de management de la sécurité des denrées alimentaires (SMSDA). Elle permet aux organisations de la chaîne alimentaire, quelle que soit leur taille ou leur position, d'assurer la sécurité de leurs produits alimentaires jusqu'au consommateur final[26].

La norme vise à assurer la sécurité des produits destinés à la consommation humaine, en adoptant une approche systématique basée sur l'évaluation et le contrôle des risques, la communication interactive et la gestion stricte des processus [27].

IV.2.2 Objectifs et bénéfices du SMSDA :

Mettre en place un système de gestion de la sécurité alimentaire (SGSA) est un choix stratégique pour l'entité, car cela peut contribuer à renforcer ses performances dans le domaine de la sécurité des aliments. En établissant un SMSDA sur la base de ce document, l'entité peut jouir de divers atouts :

- a) l'aptitude à fournir constamment des produits alimentaires sûrs, ainsi que des services et produits conformes aux attentes des clients et aux réglementations en

place ;

b) la considération des risques associés aux objectifs de l'entité ;

c) la compétence pour démontrer sa conformité aux exigences du SMSDA[28].

IV23 Principes du SMSDA :

La sécurité des denrées alimentaires concerne la présence de dangers liés aux aliments au moment de leur consommation (ingestion par le consommateur). Des dangers liés à la sécurité des denrées alimentaires peuvent survenir à n'importe quelle étape de la chaîne alimentaire. Il est donc essentiel de maîtriser de façon adéquate l'intégralité de cette chaîne. La sécurité des denrées alimentaires est assurée par les efforts combinés de tous les acteurs de la chaîne alimentaire[26]. Le présent document spécifie les exigences d'un SMSDA comprenant les éléments suivants, généralement reconnus comme essentiels:

- leadership;
- implication du personnel;
- approche processus;
- amélioration;
- prise de décision fondée sur des preuves;
- management des relations avec les parties intéressées[29].

IV3 Principes fondamentaux de la norme ISO 22000

IV31 Structure de la norme (HLS)

La norme ISO 22000 suit la structure HLS (High Level Structure) commune à toutes les normes de management ISO. Elle comprend les chapitres suivants :

1. Domaine d'application
2. Références normatives
3. Termes et définitions
4. Contexte de l'organisme
5. Leadership
6. Planification
7. Support
8. Fonctionnement
9. Évaluation des performances

10. Amélioration continue[29].

IV32 Approche processus et cycle PDCA:

Dans la norme ISO 22000, l'approche processus, qui est primordiale, s'articule autour du cycle PDCA (Planifier, Faire, Vérifier, Agir). Elle cherche à gérer de manière proactive et intégrée toutes les activités qui ont un impact sur la sécurité de l'eau produite. par:

- Cycle PDCA:

On peut décrire le cycle PDCA de manière concise de cette façon :

Planification : définir les buts du système et ses procédures, fournir les ressources indispensables pour obtenir les résultats, puis repérer et gérer les risques et les opportunités.

- Mettre en pratique : appliquer ce qui a été prévu.

-Contrôler : examiner et, si nécessaire, mesurer les processus ainsi que les produits et services qui en découlent. Analyser et évaluer les informations et données provenant des activités de contrôle, de mesure et vérification, puis rapporter les résultats.

-Agir : mettre en œuvre les mesures nécessaires pour optimiser les performances, si nécessaire[30].

IV4 mises en place de la norme iso-22000 au sein de DESALADORA OyM :

IV41. Matrice SWOT de l'engagement d'une station de dessalement vers la norme ISO 22000

Pour mieux comprendre la situation actuelle de la station de dessalement par rapport au norme iso 22000 une analyse stratégique a été réalisée en utilisant la méthode SWOT. Cette méthode permet de souligner les points forts, les faiblesses, les opportunités d'amélioration et les éléments externes qui pourraient influencer la performance globale [31]. Le tableau ci-dessous présente une analyse SWOT réalisée pour la station étudiée qui s'engage dans l'obtention de la certification ISO 22000. Cette étude détermine les atouts et les points faibles internes, en plus des opportunités et des risques externes qui influencent la procédure de conformité :

Tableau IV.1 : matrice SWOT de l'engagement de la station de dessalement ver l'iso 22000

Forces (Strengths)	Faiblesses (Weaknesses)
- Garantie de la qualité et de la sécurité sanitaire de l'eau - Conformité aux exigences réglementaires - Reconnaissance internationale de la certification ISO 22000 - Amélioration continue du système de	- Complexité technique liée au processus de dessalement - Coûts élevés de mise en place (audit, formation, documentation) - Besoin de compétences spécialisées - Résistance possible du personnel
management - Approche proactive de gestion des risques (HACCP) - Meilleure gestion des risques liés à la sécurité sanitaire de l'eau produite. - Structuration rigoureuse des processus de production. - Renforcement de la traçabilité et des contrôles qualité.	- Documentation potentiellement lourde - Temps d'adaptation et de transition parfois long.
Opportunités (Opportunities)	Menaces (Threats)
- Accès à des marchés ou appels d'offres exigeant des certifications - Renforcement de la confiance des usagers et autorités - Valorisation de la réputation de l'entreprise - Intégration avec d'autres systèmes de management (ISO 14001, ISO 9001) - Innovation technologique (surveillance en temps réel)	- Risques environnementaux affectant la source d'eau (pollution, - Changements fréquents dans les réglementations - Pression concurrentielle d'opérateurs non certifiés mais - Risque d'incidents graves si le système échoue - Contraintes budgétaires limitant les investissements

IV42 Plan d'Actions SWOT - Engagement ISO 22000 Station de Dessalement :

Le plan d'action est structuré selon les priorités issues de la SWOT et respecte l'approche PDCA, en visant, la communication de crise, ou la surveillance environnementale [32].

IV42a Principes clés du classement :

1. Sécurité alimentaire et conformité réglementaire (priorité absolue) : Les actions qui impactent directement la sécurité des produits (eau dessalée), la conformité réglementaire et la gestion des risques opérationnels sont prioritaires. Un manquement dans ces domaines peut entraîner des conséquences graves.
2. Fondations du système de management (seconde priorité) : Les actions qui mettent en place les bases du système de management ISO 22000, telles que la formation, la désignation des responsables et l'intégration des processus, sont essentielles pour la réussite du projet.
3. Avantage concurrentiel et opportunités commerciales (priorité importante) : Une fois que les bases sont solides et que la sécurité est assurée, les actions qui permettent de valoriser la certification, d'améliorer la compétitivité et de saisir de nouvelles opportunités sont importantes.
4. Optimisation des coûts (important) : L'optimisation des coûts est importante, mais ne doit pas se faire au détriment de la sécurité, de la conformité ou de la qualité.

Le tableau ci-dessus représente l'action issue de la maîtrise de la matrice SWOT Identifiant. Ainsi ; Les stratégies, les stratégies vécues ainsi que leur action et les objectifs avec l'implémentation des actions concrètes et le personnel responsable Pour cette tâche.

Tableau IV.2 : Plan d'action issu de la matrice SWOT de l'engagement de la station de dessalement vers la norme ISO 22000

Stratégie	N°	Action	Objectif	Actions Concrètes	Responsable	KPI
FORCES- OPPORTUNITÉS (FO)	FO1	Valorisation commerciale de la certification	Exploiter la reconnaissance ISO 22000 pour nouveaux marchés	• Élaboration d'une stratégie marketing axée sur la certification ISO 22000. -Participation à des appels d'offres. -Création de Supports de communication technique.	Direction commerciale + Resp. Qualité	Nb nouveaux contrats
	FO2	Intégration systèmes management	Créer synergies avec autres normes	• Cartographie processus communs - Développement SMI - Formation équipes approche intégrée	Responsable QHSE	Taux intégration processus
FAIBLESSES- OPPORTUNITÉS	WO1	• Formation et sensibilisation du personnel à la	Renforcer compétences et	-Mise en place d'une veille réglementaire	DRH + Resp. Formation	Taux satisfaction

(WO)		norme ISO 22000. • Désignation d'un responsable HACCP.	réduire résistance	automatisée. -Participation à des groupes de travail. - Élaboration d'une procédure de mise à jour des exigences réglementaires. -Formation continue du personnel.		formation
	WO2	Optimisation coûts certification	Réduire coûts mise en œuvre	• Recherche subventions Outils numériques	Direction financière + Resp. Qualité	Économies réalisées
FORCES-MENACES (FT)	FT1	Surveillance Environnementale	Anticiper risques environnementaux	- Identification des risques environnementaux. - Mise en place d'un système de surveillance environnementale. -Définition de plans d'action en cas d'alerte.	Resp. Environnement	Nb alertes détectées
	FT2	Différenciation	Maintenir	• Suivi des	Direction	Part de

		concurrentielle	l'avantage concurrentiel	indicateurs de performance.	générale + Direction commerciale	marché
FAIBLESSES-MENACES (WT)	WT1	Gestion risques opérationnels	Réduire risques incidents	- Audit des processus critiques - Mise en place de systèmes de sauvegarde -Formation aux procédures d'urgence -Élaboration d'un plan de continuité d'activité	Directeur technique + Resp. Sécurité	Nb incidents évités
	WT2	Veille réglementaire	Anticiper changements réglementaires	-Veille automatisée - Participation groupes travail -Procédure mise à jour -Formation continue	Resp. Juridique + Resp. Qualité	Délai adaptation

IV.4.2.b. Conclusion du plan :

Ce plan stratégique SWOT mis en œuvre pour la norme ISO 22000 :

- Démontre une compréhension approfondie du contexte interne et externe.
- Transforme les observations en mesures quantifiables et priorisées.
- La station de dessalement est en parfaite adéquation avec les principes du PDCA.
- Fournit une base solide pour la gestion, le compte rendu et l'amélioration constante.

IV5 Application pratique de la norme ISO 22000 : Approche par check List d'audit :

Une check-list conforme à la norme ISO 22000 a été créée afin d'évaluer de façon organisée le système de gestion mis en place à la station de dessalement. Cet instrument a facilité la détection des divergences, des éléments critiques et l'établissement d'un audit interne pragmatique, basé sur des preuves écrites. Les résultats complets se trouvent en annexe, alors qu'un tableau récapitulatif dans le mémoire met en avant, pour chaque article de la norme, les taux de conformité ainsi qu'une analyse commentée. Cette approche offre une représentation globale du niveau de conformité et permet d'identifier les priorités à améliorer [32].

Tableau IV.3 : Évaluation consolidée de la conformité aux exigences de l'ISO 22000

Article	Total des exigences	 Conforme	 Partiellement conforme	 Non conforme	Commentaires synthétiques
Article 4 : Contexte de l'organisme	14	6 (42,86 %)	4 (21,43 %)	4 (21,43 %)	Points forts : besoins clients et exigences réglementaires bien identifiés. Écarts : absence de formalisation du périmètre et des interactions entre processus. Synthèse : base solide mais documentation à renforcer.
Article 5 : Leadership	13	0 (0 %)	5 (38,46 %)	8 (61,53%)	Points forts : Engagement verbal de la direction observé. Insuffisance: Absence de politique formelle et d'équipe HACCP. Synthèse: Leadership à structurer de manière urgente.

Article 6 : 10 Planification	0 (0%)	6 (60,00 %)	4 (40,00 %)	Points forts: Identification partielle des risques (analyse SWOT). Insuffisance : Objectifs qualité et planification absents. Synthèse: Planification technique incomplète.
Article 7 : 36 Support	12 (33,33 %)	12 (33,33 %)	12 (33,33 %)	Points forts Bonne infrastructure, communication externe fonctionnelle. Insuffisance: Faiblesses dans la formation continue et la documentation qualité. Synthèse: Ressources disponibles, mais pilotage qualité à améliorer.

Article 8 : Fonctionnement	59	23 (38,98 %)	10 (16,94 %)	26 (44,07 %)	Points forts: PRP (prérequis) opérationnels, caractéristiques produits définis. Insuffisance: Étude HACCP et traçabilité non encore formalisées. Synthèse: Opérations maîtrisées, formalisation HACCP prioritaire.
---------------------------------------	-----------	-----------------	-----------------	-----------------	---

À la lumière de l'ensemble des évaluations effectuées, une analyse globale du niveau de conformité aux exigences de la norme ISO 22000 a été réalisée. Cette synthèse vise à dégager les tendances générales observées au sein du système de management en place, au-delà de l'examen détaillé par article. Le **tableau ci-dessus présente l'analyse globale consolidée** du niveau de conformité aux exigences ISO 22000, basé sur les données d'audit (132 exigences) :

Tableau IV.4 : Analyse globale consolidée du niveau de conformité aux exigences ISO 22000

Type de Conformité	Nombre d'Exigences	Pourcentage (%)
✓ Conforme	41	31,06%
⚠ Partiellement conforme	37	28,03%
+ Non conforme	54	40,90%

Afin de fournir une vue d'ensemble claire sur le niveau de conformité des différents paramètres évalués, le graphique ci-dessous illustre la répartition des résultats en trois catégories : conforme, partiellement conforme et non conforme.

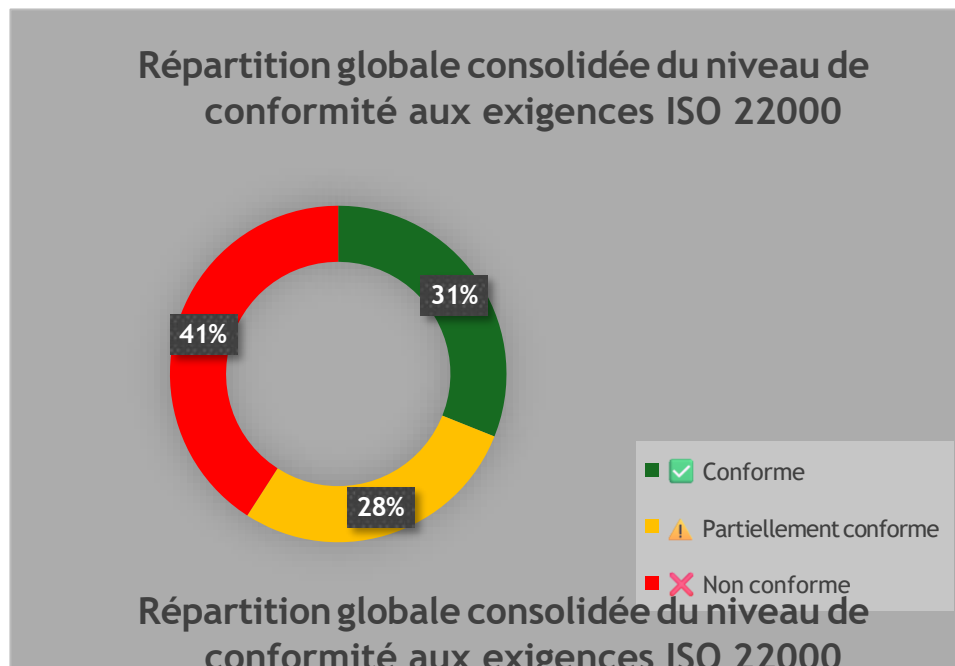


Figure IV.23 : Évaluation des performances analyses de l'iso-22000 : conformité des résultats

Interprétation :

- Le taux conforme de 31,06% indique une base technique robuste, soutenue par des infrastructures solides et des procédures opérationnelles performantes.
- Les 40,90% de non-conformité mettent en évidence des insuffisances importantes en matière de qualité et HACCP, qui requièrent une intervention sans délai (par exemple : analyse HACCP).
- Les 28,03% partiellement conformes présentent une opportunité d'amélioration rapide grâce à la formalisation .

IV51 Synthèse de l'évaluation HACCP et stratégie de mise en conformité ISO 22000

IV51a Diagnostic global de la conformité

L'analyse détaillée de la station de dessalement DESALADORA OyM met en évidence un profil de maturité hétérogène. L'étude HACCP réalisée révèle que la maîtrise technique des processus de dessalement est bien établie, avec une couverture de 65% du chapitre 8 (Fonctionnement) de la norme ISO 22000. Cependant, cette excellence opérationnelle contraste avec des déficits organisationnels significatifs dans les domaines managériaux et documentaires.

IV51b Cartographie des écarts prioritaires identifiés:

L'évaluation par chapitre de la norme ISO 22000 révèle une répartition inégale des acquis et des

écarts :

1. Acquis technique majeure :

Chapitre 8 - Fonctionnement : 65% de maîtrise grâce à l'analyse HACCP exhaustive (45 dangers identifiés, matrice de criticité 5x5, mesures préventives définies)

2. Déficits organisationnels critiques :

L'évaluation de la conformité de la station de dessalement DESALADORA OyM à la norme ISO 22000 met en évidence des écarts critiques dans les chapitres 5 (Leadership, 98 % d'écart), 6 (Planification, 85 % d'écart), 7 (Support, 90 % d'écart), 9 (Évaluation des performances, 93 % d'écart) et 10 (Amélioration, 99 % d'écart), révélant des faiblesses organisationnelles face à une solide maîtrise technique (chapitre 8). Ces lacunes incluent l'absence de politique de sécurité alimentaire formalisée, d'objectifs qualité, de système documentaire structuré, Un plan d'action basé sur le cycle PDCA est proposé : formaliser une politique et une équipe HACCP pour le leadership (1-3 mois), définir des objectifs SMART et planifier les ressources pour la planification (2-4 mois), créer un référentiel documentaire et former le personnel pour le support (2-5 mois), standardiser les protocoles de surveillance et développer des rapports pour l'évaluation (4-7 mois), et instaurer le cycle PDCA avec des revues et une veille réglementaire pour l'amélioration (4-8 mois). Ces mesures, priorisées sur 6 à 12 mois, garantiront la certification, renforçant la sécurité alimentaire et la compétitivité de la station.

Cette analyse démontre que les fondations techniques solides établies par l'étude HACCP constituent un levier stratégique majeur pour accélérer la mise en conformité globale, en concentrant les efforts sur la structuration organisationnelle et managériale.

Tableau IV.5 : Évaluation croisée de la conformité ISO 22000 et de l'impact de l'étude HACCP

Chapitre ISO 22000	Impact étude HACCP	Niveau de maîtrise	Acquis principaux	Écarts critiques identifiés	Actions prioritaires	Délais
Chapitre 8 - Fonctionnement	65%	 Avancé	- Analyse exhaustive des dangers (45 dangers identifiés) - Matrice de criticité 5x5 complète - Mesures préventives	35% restants : validation CCP - Limites critiques à fixer - Procédures de surveillance à formaliser	- Finaliser établissement des CCP - Définir limites critiques - Créer procédures de surveillance	0-2 mois
			définies Base CCP établie			
Chapitre 6 - Planification	15%	 Initié	- Approche processus structurés - Cycle PDCA intégré - Matrice SWOT réalisée - Identification des ressources techniques	- Objectifs qualité non formalisés (85%) - Planification des ressources incomplète - Gestion des risques organisationnels	- Formaliser objectifs qualité - Planifier allocation ressources - Développer gestion des risques	2-4 mois

Chapitre 7 - Support	10%		• Équipe HACCP théoriquement constituée • Compétences techniques identifiées • Profils métiers définis	• Formalisation des rôles (90%) • Formation du personnel • Système documentaire inexistant • Compétences non évaluées	• Formaliser l'équipe HACCP • Créer système documentaire • Planifier formations	2-5 mois
Chapitre 9 - Évaluation des performances	7%	partiel	• Critères de surveillance définis • Indicateurs techniques identifiés • Paramètres de contrôle spécifiés	• Méthodes de mesure non standardisées (93%) • Fréquences de contrôle non fixées • Système de reporting insuffisant	• Standardiser méthodes de mesure • Fixer fréquences de contrôle • Créer un système de reporting.	5-7 mois
Chapitre 5 - Leadership	2%	Critique	• Engagement implicite dans démarche HACCP • Direction d'équipe identifiée	• Politique sécurité alimentaire non formalisés (98%) • Engagement direction non formalisé • Communication organisationnelle insuffisante	• Élaborer politique sécurité alimentaire • Formaliser engagement direction • Structurer communication	1-3 mois

IV.5.2. Conclusion stratégique :

L'étude HACCP réalisée représente un atout majeur couvrant 65% du cœur opérationnel (chapitre 8) de la norme ISO 22000. Cette base technique solide permet une approche ciblée sur les déficits organisationnels et managériaux, réduisant significativement les délais et coûts de certification.

Facteur clé de succès : La transformation organisationnelle des chapitres 5 et 10 (écarts critiques de 98-99%) conditionnera la réussite globale du projet de certification.

IV.6 les pratiques d'analyse du laboratoire dans le contrôle de la qualité de l'eau

(chapitre 9) :

Dans le processus de production d'eau dessalée, le laboratoire de la station est essentiel pour contrôler la qualité d'eau à différentes phases du procédé. Cela s'accomplit par le biais de prélèvements fréquents, d'analyses physico-chimiques méticuleuses et l'emploi d'équipements appropriés.:

1- Échantillonnage et analyses à diverses phases du processus :

-Ingestion d'eau de mer : collecte d'échantillons pour déterminer la salinité à l'aide d'un spectrophotomètre.

-Sur les unités d'osmose inverse (12 racks) : contrôle quotidien du pH et de la conductivité à l'aide de dispositifs d'analyse automatiques et de pH-mètres.

-Distribution finale vers les points de distribution : échantillonnage chaque heure pour assurer la conformité de l'eau potable.

2- Analyses complémentaires réalisées au laboratoire : (chapitre9)

- **Analyse de la dureté** : Titrage complexométrique avec EDTA pour mesurer la teneur en calcium et magnésium.
- **Dosage du calcium et du magnésium** : méthode colorimétrique avec murexide.
- **Analyse de l'alcalinité** : titrage acide avec indicateur coloré.
- **Analyse du chlore** : mesure par chlorométrie pour vérifier la désinfection.
- **Analyse des chlorures** : méthode de Mohr pour les eaux au pH comprise entre 6 et 8.
- **Analyse des sulfates** : détection via spectrophotomètre (HACH DR 3900).

IV.6.1.Gestion et traçabilité des résultats

La station dispose d'une base opérationnelle solide mais doit renforcer la gestion qualité et la documentation pour atteindre la certification ISO 22000. Avec un plan d'action ciblé et un engagement de la direction, la conformité est réalisable dans 6 à 12 mois. Des audits réguliers et des revues de direction seront essentiels pour maintenir les progrès et assurer l'amélioration continue.

IV.7 Comparaison analytique : mise en perspective de la qualité de l'eau dessalée

Tandis que la méthode HACCP a été complètement élaborée et mise en œuvre dans le processus de dessalement, il serait à présent judicieux d'élargir l'analyse via une étude comparative. Cette analyse vise à comparer la qualité de l'eau dessalée à celle des eaux en bouteille disponibles sur le marché, en se basant sur des paramètres physico-chimiques et microbiologiques obtenus lors d'expériences concrètes.

IV.61 Objectif et intérêt de l'analyse comparative :

L'étude comparative a été menée entre l'eau dessalée et des eaux embouteillées commercialisées en Algérie pour évaluer la qualité physico-chimique de l'eau produite. Cette analyse compare ses caractéristiques aux normes de l'OMS, en termes de sûreté sanitaire, d'équilibre minéral et de potabilité. Elle vise à confirmer l'efficacité du système HACCP et de la norme ISO 22000 appliqués dans la station, tout en démontrant la compétitivité de l'eau dessalée face aux eaux embouteillées en matière de qualité et de potentiel commercial.

IV.62 – Méthodologie et codification de l'analyse :

Des échantillons d'eau ont été prélevés et analysés selon une méthode normalisée, en se focalisant sur des paramètres physico-chimiques clés conformes au Décret exécutif n°11-219 (normes algériennes) et aux recommandations de l'OMS.:

Dans le contexte de cette analyse comparative, cinq variétés d'eau ont été examinées tout en maintenant un principe de neutralité et de confidentialité des marques d'eaux comparées .

- E.D. (eau dessalée) : échantillon prélevé juste après la sortie du dernier réservoir de la station de dessalement DESSALADORA OyM , suite à la reminéralisation et avant la distribution, représentant précisément la qualité de l'eau effectivement produite.
- E.S1 et E.S2 (eaux de source) : eaux en bouteille provenant de sources naturelles souterraines, connues pour leur qualité inhérente. Les résultats proviennent aussi des données réglementaires présentes sur les emballages.
- E.T1 et E.T2 (eaux traitées) : eaux mises en bouteille résultant du traitement d'eaux urbaines (filtration, osmose, etc.), vendues sous l'appellation d'eaux de table. Les informations sont tirées des chiffres indiqués sur les étiquettes des bouteilles.

Seules des analyses de terrain en laboratoire ont été menées sur l'eau dessalée (E.D.),

alors que les autres catégories d'eau ont été examinées selon les informations fournies par les producteurs, en accord avec la réglementation actuelle.

-Afin d'illustrer concrètement les différences entre les cinq types d'eau étudiés, le tableau ci-dessous présente une synthèse comparative des principaux paramètres physico-chimiques relevés :

Tableau IV.7 : Comparaison des paramètres physico-chimiques des eaux analysées avec les normes de l'OMS

Paramètre	Norme OMS	E_d	E^1	E^2	E^{21}	E^2
pH	6.5 – 8.5	7.75	7.29	7.42	7.2	7.8
Calcium (mg/L)	100	70.52	54.16	49	99	55
Magnésium (mg/L)	50	9.86	2.64	5	29	17
Sodium (mg/L)	200	120	5	3.1	33	>12
Chlorures (mg/L)	250	60	10	7	88	>15
Potassium (mg/L)	12	1.5	2	0.4	2.1	0.5
Sulfates (mg/L)	250	60	4	3	68	33
Bicarbonates (mg/L)	—	85	164.7	168	265	270
Nitrates (mg/L)	50	6	9	5.94	15	4.6
Nitrites (mg/L)	0.2	0.02	<0.01	0.03	<0.02	0

Fluor (mg/L)	1.5	0.3	—	0.11	—	—
Silice (mg/L)	—	0.5	—	—	—	12
Fer (mg/L)	0.5	0.5	—	—	—	—
Résidus secs (mg/L)	500	335	206	178	550	372

Les cases vides (—) indiquent que les données correspondantes ne sont pas disponibles pour l'échantillon concerné ou pas fixées dans la norme de OMS.

Une représentation graphique a été réalisée à partir des données du tableau, permettant une lecture plus claire des écarts observés entre l'eau produite par osmose inverse et chaque type de marque d'eau par référence aux normes de l'OMS.

Comparaison des paramètres physico-chimiques de différentes eaux analysées par rapport aux recommandations de l'OMS

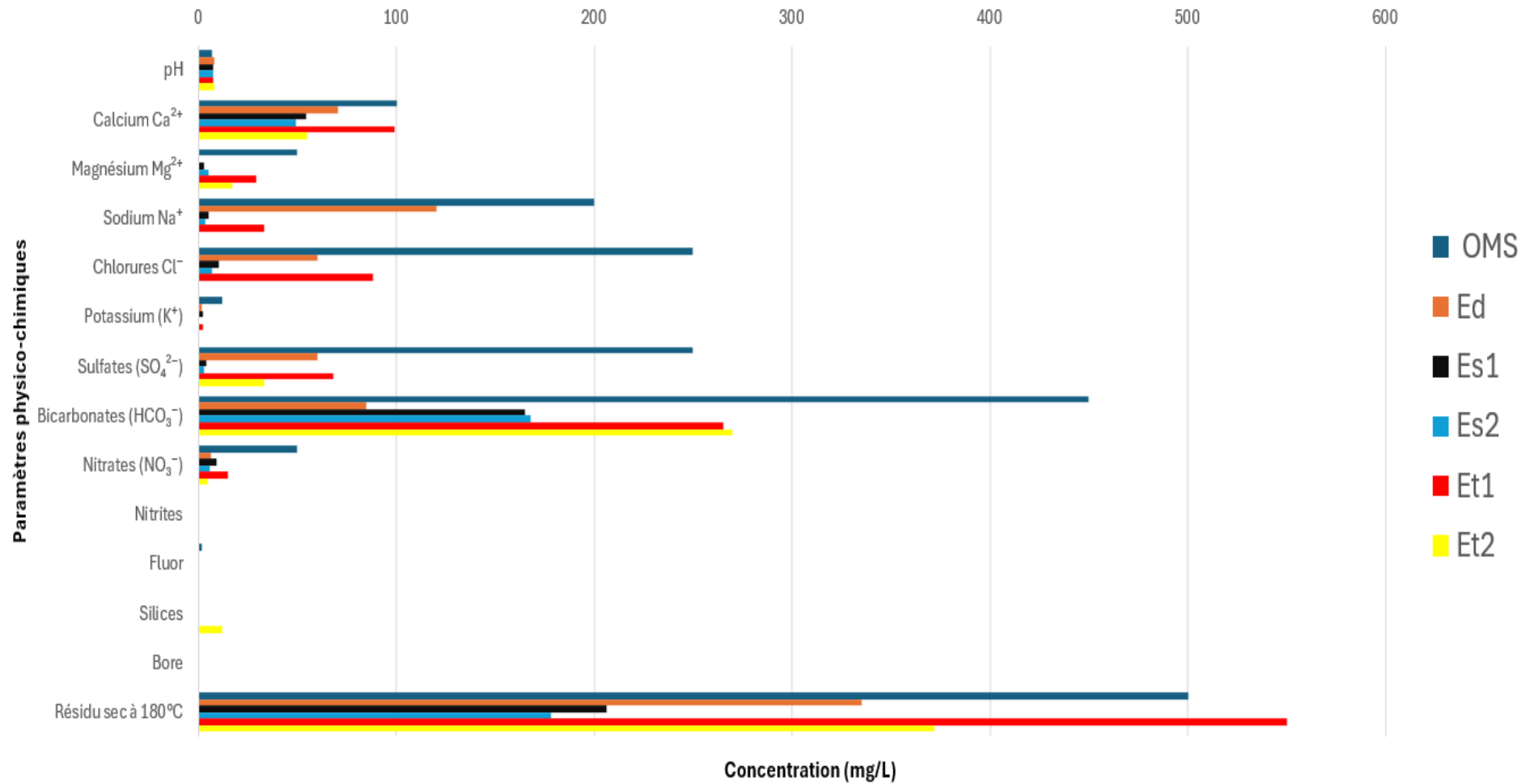


Figure IV.24 : Comparaison des paramètres physico-chimiques de différentes eaux analysées par rapport aux recommandations de l'OMS

Afin de résumer les résultats précédemment analysés, le tableau ci-dessous synthétise les principales caractéristiques et observations pour chaque type d'eau, en se référant aux normes de l'OMS. Ce résumé permet de conclure rapidement sur la conformité globale et les points de vigilance associés. Le tableau ci-après présente les principales conclusions tirées des analyses physico-chimiques, en mettant en parallèle la qualité des différentes eaux examinées avec les normes établies par l'OMS.

Tableau IV.8 : Analyse d'eau pour les marques d'eau étudiées

Type d'eau	Analyse d'eau
<i>E_d</i> (Eau dessalée)	Affiche une qualité globale satisfaisante grâce à une reminéralisation partielle qui lui confère une composition équilibrée notamment en calcium (Ca^{2+}), sodium (Na^+) et sulfates (SO_4^{2-}). L'ensemble des paramètres analysés demeure conforme aux valeurs guides de l'OMS; Sans risque pour la santé, peut être consommée régulièrement.
<i>E_s¹</i> (Eau de source 1)	Eau naturellement pauvre en éléments minéraux, en particulier en calcium et en magnésium. Une consommation exclusive prolongée peut limiter l'apport minéral nécessaire. Malgré cette faible minéralisation, aucun dépassement des limites sanitaires n'a été relevé, ce qui rend cette eau conforme sur le plan réglementaire.
<i>E_s²</i> (Eau de source 2)	Similaire à <i>E_s¹</i> , une faible teneur en minéraux essentiels. Non dangereuse, mais peu bénéfique sur le plan nutritionnel car elle réduit la contribution au maintien de l'équilibre électrolytique du corps humain.
<i>E_t¹</i> (Eau traitée 1)	Qualité globalement correcte, mais résidus secs supérieurs à la norme. Cela peut affecter les propriétés organoleptiques et entraîner une surcharge saline en cas de consommation prolongée, notamment chez les personnes à risque (enfants, personnes âgées, insuffisants rénaux).
<i>E_t²</i> (Eau traitée 2)	Conforme aux critères habituels de qualité, elle présente toutefois une teneur en silice relativement élevée (12 mg/L), pouvant favoriser la formation de dépôts dans les installations de distribution ou de traitement.

IV.6.3 conclusions d'analyse

La comparaison entre les différentes catégories d'eau met en évidence que l'eau dessalée, lorsqu'elle est correctement reminéralisée, affiche une qualité physico-chimique stable et bien contrôlée, souvent meilleure que celle de certaines eaux naturelles ou traitées.

Dans cette optique, elle constitue une alternative sérieuse et durable à l'eau embouteillée, à condition que tout le processus de traitement soit rigoureusement encadré et respecte scrupuleusement les normes sanitaires internationales.

Sa faible teneur en contaminants, sa composition modulable et sa stabilité chimique en font une solution particulièrement polyvalente, adaptée aussi bien aux usages domestiques qu'industriels, voire à des besoins nutritionnels spécifiques.

IV.7 Conclusion

L'analyse approfondie de l'engagement de la station de dessalement DESALADORA OyM vers la certification ISO 22000, réalisée à travers une matrice SWOT, un plan d'action stratégique et une évaluation de la conformité, met en évidence une dualité marquée entre des acquis techniques robustes et des lacunes organisationnelles critiques. La station excelle dans la maîtrise opérationnelle, avec 65 % de conformité au chapitre 8 de la norme, soutenue par une analyse HACCP rigoureuse ayant identifié 45 dangers et établi des mesures préventives. Cependant, des écarts significatifs persistent dans les domaines du leadership (98 % d'écart), de l'amélioration continue (99 % d'écart) et de la planification (85 % d'écart), nécessitant une structuration urgente des processus managériaux et documentaires.

L'étude comparative de l'eau dessalée avec des eaux embouteillées confirme la qualité physico-chimique de l'eau produite, conforme aux normes de l'OMS et souvent supérieure à certaines eaux commerciales en termes de sécurité sanitaire et d'équilibre minéral. Cette performance positionne l'eau dessalée comme une alternative viable et durable pour des usages variés.

En somme, la certification ISO 22000 est atteignable dans un délai de 6 à 12 mois, à condition de renforcer le leadership, de formaliser la documentation et de mettre en œuvre le plan d'action selon le cycle PDCA. Ce processus consolidera la sécurité sanitaire, renforcera la compétitivité de la station et contribuera à une gestion durable des ressources hydriques.

Chapitre V :

Logiciel de surveillance

V1 Introduction

Produire une eau potable à partir de l'eau de mer par dessalement implique bien plus qu'un simple processus technique : il s'agit d'un enchaînement structuré de procédures sanitaires, normatives et opérationnelles, visant à garantir la conformité de l'eau aux exigences de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Dans ce cadre, l'usage d'outils numériques devient essentiel pour assurer un suivi rigoureux, détecter les écarts de qualité et proposer des mesures correctives adaptées.

Ce chapitre présente ainsi la mise en œuvre d'un logiciel intelligent de monitoring, conçu pour regrouper les acquis développés tout au long du projet. Il permet de comparer les résultats journaliers aux normes de référence, d'évaluer automatiquement l'état de conformité, et de générer un rapport interprétatif. Ce développement s'inscrit dans une logique d'intégration et de valorisation des connaissances, en proposant une solution technique, fonctionnelle et adaptée aux exigences d'un système de gestion de la qualité appliqué au dessalement.

V2 Architecture générale de la plateforme de monitoring:

Le prototype développé est structuré en **cinq étapes fonctionnelles**, représentant les composants clés de cette première version. Bien qu'il ne s'agisse pas encore d'un logiciel finalisé, la plateforme met en œuvre une chaîne complète allant de la saisie des données jusqu'à leur interprétation visuelle et documentaire efficace des paramètres critiques de l'eau dessalée.

V2.1. Base de données normative (OMS) :

L'étape initiale se fonde sur une base de données interne qui comprend les standards de qualité de l'eau établis par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Elle englobe les seuils de référence pour les paramètres physico-chimiques les plus essentiels : pH, conductivité, chlorures, sodium, calcium, magnésium, potassium, sulfates, TDS, entre autres.

Elle sert de norme principale pour toutes les comparaisons effectuées automatiquement par le programme.

Afin d'illustrer l'interface du logiciel développé, la figure suivante présente une capture d'écran du prototype :

Surveillance de la qualité de l'eau dessalée

Date de l'analyse

mm/dd/yyyy



pH

Calcium (Ca^{2+}) [mg/L]

Magnésium (Mg^{2+}) [mg/L]

Sodium (Na^+) [mg/L]

Potassium (K^+) [mg/L]

Chlorures (Cl^-) [mg/L]

Sulfates (SO_4^{2-}) [mg/L]

Bicarbonates (HCO_3^-) [mg/L]

Nitrates (NO_3^-) [mg/L]

Nitrites [mg/L]

Fluor [mg/L]

Bore (BOR) [mg/L]

Silice (SILI) [mg/L]

CFU (Unités Formant Colonies)

Turbidité [NTU]

Figure V.25 : Interface principale du logiciel

V22 Saisie manuelle des données :

Lors de cette étape, l'opérateur entre manuellement les valeurs dérivées des tests d'eau, qu'ils soient issus de mesures effectuées en laboratoire ou d'appareils de terrain avec la date du jours qui suit l'analyse. Cette interface de saisie facilite une entrée des données simple et intuitive.

Important : À l'état actuel des choses, le logiciel n'est pas encore connecté à des capteurs ou des systèmes de collecte automatique. Un opérateur doit saisir toutes les données manuellement. Toutefois,

Cette étape est importante, car elle fournit de manière automatique les données à l'étape suivante.

Surveillance de la qualité de l'eau dessalée

Date de l'analyse

07 / 01 / 2025



pH

7

Calcium (Ca^{2+}) [mg/L]

6

Magnésium (Mg^{2+}) [mg/L]

9

Sodium (Na^+) [mg/L]

12

Potassium (K^+) [mg/L]

14

Chlorures (Cl^-) [mg/L]

20



Sulfates (SO_4^{2-}) [mg/L]

26

Bicarbonates (HCO_3^-) [mg/L]

59

Nitrates (NO_3^-) [mg/L]

63

Nitrites [mg/L]

22.28

Fluor [mg/L]

26

Bore (BOR) [mg/L]

0.3

Silice (SILI) [mg/L]

0.47

CFU (Unités Formant Colonies)

100

Turbidité [NTU]

500

Figure V.26 : Interface de saisie manuelle des résultats de la station de dessalement

- L'utilisateur peut interagir avec la plateforme via **trois boutons fonctionnels** :
 - Un bouton « **Analyser** », qui déclenche le traitement automatique des données,
 - Un bouton « **Réinitialiser** », qui permet d'effacer les champs saisis,
 - Un bouton « **Exporter en PDF** », qui génère automatiquement un rapport des résultats.



Figure V.27 : Les trois boutons fonctionnels du prototype

V23 Analyse automatique des données entrées :

En se basant sur les données saisies manuellement, le programme lance une analyse automatique en se focalisant sur trois dimensions principales :

- (i) Conformité réglementaire : évaluation instantanée de chaque valeur saisie par rapport aux seuils définis par l'OMS.
- (ii) Évaluation générale de la qualité de l'eau, répartie en trois catégories :
 - État normal (vert) : la plupart des paramètres sont conformes.
 - Niveau modéré (orange) : quelques déviations mineures.
 - État critique (rouge) : la plupart des paramètres ne sont pas conformes.
- (iii) Suggestion de mesures correctives : en cas de détection de non-conformités, des résolutions techniques ou procédurales sont proposées, telles que le rinçage, la modification du dosage chimique, l'inspection des filtres ou la reprise d'une phase du traitement.

Attention : déviations critiques détectées (6 paramètres). Des actions correctives sont nécessaires.

PH : 7 → Conforme
CALCIUM : 6 → Conforme
MAGNESIUM : 9 → Conforme
SODIUM : 12 → Conforme
POTASSIUM : 14 → Critique
CHLORIDES : 20 → Conforme
SULEATES : 26 → Conforme
BICARBONATES : 59 → Conforme
NITRATES : 63 → Critique
NITRITES : 22.28 → Critique
FLUOR : 26 → Critique
BORE : 0.3 → Conforme
SILICE : 0.47 → Conforme
CFU : 100 → Critique
TURBIDITE : 500 → Critique

Figure V.28 : Affichage du diagnostic automatique avec codage couleur

Recommandations :

- Suspendre temporairement l'utilisation de l'eau
- Réaliser une contre-analyse immédiate
- Identifier l'origine des déviations (filtration, reminéralisation...)
- Corriger les causes techniques ou chimiques

Figure V.29 : Affichage des recommandations de la situation vécue

V23a Génération d'un graphique comparatif :

Pour rendre l'analyse plus claire et visuelle, la plateforme génère automatiquement un graphique à double courbe. Celui-ci met en parallèle :

- Une courbe verte illustrant les valeurs de référence établies par les normes de l'OMS,
- Une courbe bleue correspondant aux mesures relevées par la station de dessalement,
- Des segments rouges soulignant les écarts significatifs entre les deux courbes.

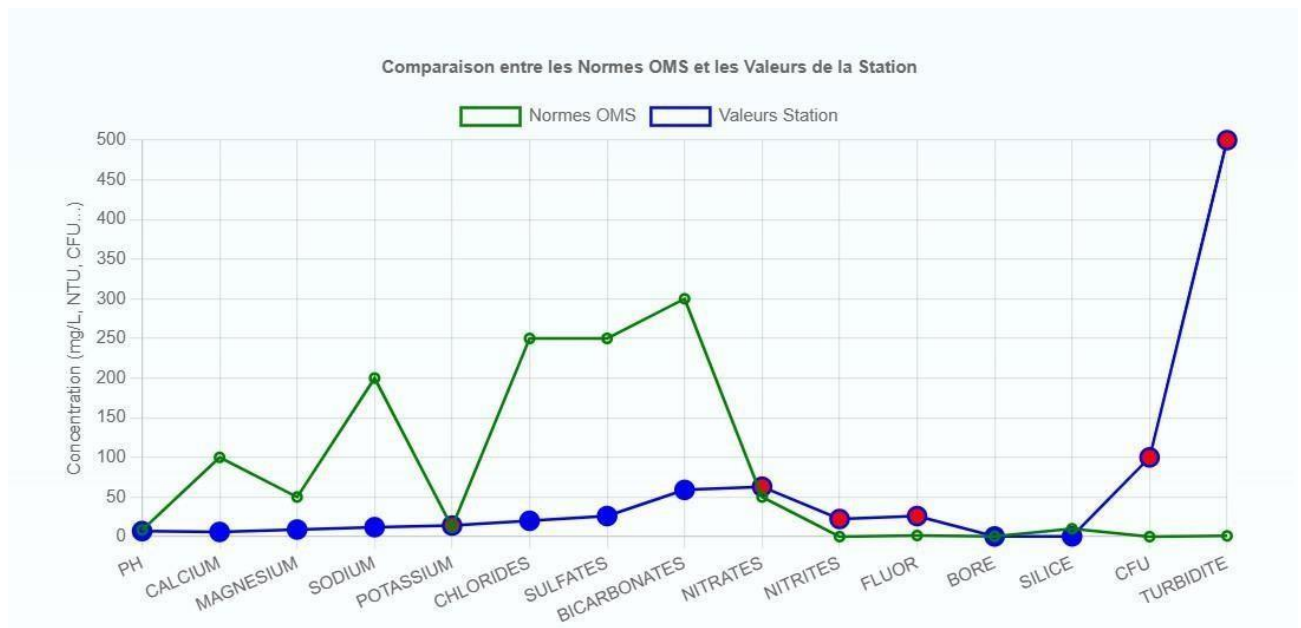


Figure V.30 : Graphique de comparaison entre les normes OMS et les données réelles, avec écarts signalés

Figure V.31 : Graphique de comparaison entre les normes OMS et les données réelles, avec écarts signalés

Ce visuel constitue un outil d'interprétation rapide, permettant de repérer facilement les anomalies, de cibler les paramètres à surveiller, et d'aider les responsables qualité à prendre des décisions éclairées.

V23b Création d'un rapport en format PDF :

Par la suite, le logiciel offre la possibilité d'exporter un rapport automatisé en format PDF. Le rapport inclut :

- Les valeurs entrées,
- L'état de chaque paramètre (conformité ou non),
- L'état général (normal, modéré, critique), ainsi que les recommandations liées.

Ce document est pensé pour être archivé, partagé et utilisé lors des audits ou contrôles réglementaires.

V3. Matrice SWOT :

Afin de prendre du recul sur le développement du prototype et d'envisager son évolution future de manière structurée, il est pertinent de procéder à une **analyse SWOT**.

Cette démarche permet d'identifier, de façon synthétique, les **forces** et **faiblesses** internes du projet, ainsi que les **opportunités** et **menaces** liées à son environnement externe. L'objectif est de **mieux évaluer son potentiel de valorisation**, ses points d'amélioration et les leviers à activer pour favoriser son déploiement dans un cadre professionnel, voire entrepreneurial.

Tableau V.1 : Matrice SWOT du prototype de plateforme de surveillance de la qualité de l'eau dessalée

Forces (Strengths)	Faiblesses (Weaknesses)
- Interface intuitive et facile d'utilisation, même pour les non-spécialistes. - Analyse automatique basée sur les normes OMS. - Visualisation graphique des écarts (double courbe + déviations en rouge). - Génération automatique de rapports PDF pour la traçabilité. - Adaptabilité à plusieurs domaines liés à l'eau (dessalement, STEP, barrages, laboratoires).	- Nécessité d'une saisie manuelle des données (pas de capteurs connectés dans la version actuelle). - Version développée en HTML, peu robuste pour une utilisation industrielle à grande échelle. - Pas encore de base de données dynamique ni d'historique d'analyse. - Projet encore isolé, sans hébergement en ligne ni multi-utilisateurs. - Sécurité des données non assurée dans la version prototype.
Opportunités (Opportunities)	Menaces (Threats)
- Passage futur à Python pour plus de robustesse, d'interopérabilité et d'automatisation. - Intégration future de capteurs et d'un système SCADA pour une surveillance en temps réel. - Déploiement dans les stations, laboratoires ou établissements de traitement d'eau. - Valorisation sous forme de projet de start-up (produit à fort impact	- Concurrence potentielle avec des logiciels professionnels ou commerciaux déjà en place. - Risque de désintérêt si le projet ne passe pas rapidement à un niveau automatisé et maintenu. - Dépendance à l'implication technique de l'auteur sans financement ni équipe dédiée. - Résistance éventuelle des structures traditionnelles face aux innovations numériques.

environnemental). - Possibilité de publication scientifique ou d'intégration dans des formations.	- Manque de financement ou de soutien pour une version avancée hébergée et maintenue.
--	--

V2. Le Business Model Canvas (BMC):

Dans cette perspective, le présent prototype ne se limite pas à un simple travail académique ; il est également pensé comme une **ébauche de solution entrepreneuriale**, susceptible d'évoluer vers un projet de **start-up spécialisée dans la surveillance de la qualité de l'eau**.

Afin d'organiser cette vision de développement et de mettre en évidence les composantes clés de sa structuration future, une **modélisation stratégique** a été réalisée à l'aide du **Business Model Canvas (BMC)**. Cet outil permet de clarifier les axes essentiels du projet, tels que les segments de clientèle visés, les canaux de diffusion, les sources potentielles de revenus, ainsi que les ressources et partenariats nécessaires à sa mise en œuvre.

La représentation synthétique du modèle économique du prototype est ainsi présentée ci-après sous forme de **Business Model Canvas**, servant de base à une réflexion approfondie sur sa valorisation future :

Le Business Model Canvas

Réalisé pour : **BECETTI Yousra**

Réalisé par : **BECETTI Yousra**

Date :
23/06/2025

Version : première V1

Partenaires Clés	Activités Clés	Propositions de Valeur	Relations avec les Clients	Segments de Clientèle
- Université / École d'ingénierie : appui académique, validation technique, terrain d'expérimentation. - Experts en traitement de l'eau : conseils scientifiques, retour d'expérience terrain. - Développeurs web ou informaticiens (futurs) : soutien technique pour la version Python ou connectée. - Fournisseurs de capteurs (dans l'extension automatisée). - Normes OMS / ISO : base de conformité réglementaire. - Laboratoires d'analyse d'eau : pour la validation expérimentale du prototype. OBJECTIFS DU PARTENARIAT - Optimisation et Economie - Réduction de risques et incertitudes - Acquisition des ressources ou activités spécifiques - validations scientifiques	- Développement technique du prototype (interface, analyse, PDF, graphique). - Intégration des normes OMS et codage couleur. - Test et validation du fonctionnement. - Développement du graphique comparatif. - Structuration du système d'export. - Communication et documentation. Catégories : - Production (codage, design, base de données) - Résolution de problèmes (conformité, automatisation, lisibilité) - Plateforme / Réseau (à venir dans la version multi-utilisateur) Ressources Clés - Compétences en HTML/JS/python , Visual Studio Code - Connaissances en analyse d'eau, normes OMS - Ordinateur de développement (local) - Savoir-faire métier dans le traitement d'eau - Interfaces graphiques, système de génération PDF - Base de données OMS (statique) - Retours des utilisateurs	- Analyse automatique et intuitive de la qualité de l'eau. - Comparaison directe avec les normes OMS. - Visualisation des écarts par graphique coloré. - Génération de rapports PDF clairs. - Interface simple, même pour les non-informaticiens. - Gain de temps, réduction des erreurs manuelles. - Base de lancement vers une plateforme automatisée connectée. CARACTERISTIQUES - Nouveauté - Réduction des risques - Confort d'utilisation - Mission à accomplir - Accessibilité - Visualisation utile - Traçabilité renforcée.	- Assistance personnalisée (phase de test) - Libre-service (via documentation dans la version publique) - Co-création (avec les utilisateurs dans les itérations futures) - Réponses aux retours utilisateurs - Relation directe via mail ou plateforme dédiée Coût relation client : faible dans la version actuelle, mais à anticiper en cas de service commercialisé. Canaux de Distribution - Présentation dans un projet académique - Téléchargement local via plateforme dédiée - Démonstration dans les établissements partenaires - Déploiement en version professionnelle (plus tard) Phases couvertes : - Sensibilisation : communication institutionnelle, forums techniques - Évaluation : test gratuit, démonstration - Achat (future version) : accès téléchargeable ou licence - Livraison : fichier exécutable ou interface web - Support : mail, documentation, forum (phase avancée)	- Stations de dessalement (publiques et privées) - Stations d'épuration (STEP) - Laboratoires d'analyse d'eau - Gestionnaires de barrages - Sociétés d'audit/certification QHSE - Collectivités (services eau potable) - Universités et centres de recherche - Ingénieurs/techniciens en qualité de l'eau - Usines de production d'eau potable ou industrielle Type de marché : marché de niche / segmenté (professionnels du traitement et contrôle de l'eau)
Structure des Coûts			Sources de Revenues (la version avancée)	
Temps de développement (ressource humaine principale) Dépenses informatiques (poste de travail, internet) Aucune infrastructure lourde (serveur ou capteurs pour l'instant) Éventuels coûts futurs : hébergement web, achat de capteurs, certification Modèle actuel : Axé sur la valeur (création de valeur gratuite au début, évolutive) Faible coût fixe — pas de sous-traitance — coût humain majoritaire			Le prototype est gratuit actuellement. -les pistes futures : - Licence logicielle (version professionnelle) - Abonnement pour mises à jour, hébergement ou cloud - Formations personnalisées - Support technique / Intégration sur site - Développement sur mesure pour clients industriels Types de revenus : Abonnement — Frais de licence — Service — Formation	

Figure V.33 : Modélisation stratégique du prototype sous forme de Business Model Canvas (BMC)

V3. Estimation budgétaire économique du développement logiciel

Pour mieux situer le coût potentiel de développement de ce prototype dans un cadre entrepreneurial à budget restreint, le tableau ci-dessous présente une estimation budgétaire simplifiée, tenant compte du taux de change en vigueur :

Tableau V.2 : Estimation budgétaire du prototype

Poste de dépense	Détails	Coût (DZD)
Développement web (HTML/CSS/JS)	160h × 10 €/h	100 000
Outils et logiciels	VS Code, bibliothèques open source	0
Hébergement web et domaine (1 an)	Service d'entrée de gamme (type Hostinger)	10 000
Ressources UI (icônes,	Kits UI économiques (une seule fois)	10 000
Rapport PDF automatique	Codage + génération (temps estimé)	20 000
Documentation et tests	Temps de rédaction et correction	50 000
Total estimé		190 000

Cette version économique démontre qu'un logiciel fonctionnel et évolutif peut être développé à moindre coût, tout en respectant les standards de qualité de base nécessaires à une utilisation réelle sur le terrain.

V4 Conclusion

Le développement de ce programme constitue une véritable progression technologique dans le secteur de la vérification de la qualité de l'eau provenant du dessalement. Bien qu'encore en phase semi- manuelle, sa conception technique autorise déjà la mise en œuvre d'analyses automatisées fiables, conformes aux normes internationales.

Le modèle ouvre la voie à de multiples possibilités d'amélioration, y compris l'automatisation totale, la diffusion des informations en temps réel et une gestion plus intelligente des alertes. Sur le long terme, ce genre de solution pourrait

s'imposer comme un outil essentiel pour la surveillance et la gestion des infrastructures hydrauliques sensibles, contribuant de manière significative à la protection de la santé publique et à la sécurisation des ressources en eau.

Conclusion Générale

L'eau, bien commun de l'humanité, est aujourd'hui au cœur de tensions majeures qui redéfinissent les priorités des politiques publiques, particulièrement dans les zones arides comme l'Algérie. Dans un contexte mondial marqué par une raréfaction croissante des ressources hydriques, le recours au dessalement de l'eau de mer s'est imposé non comme une option de confort, mais comme une nécessité stratégique. Toutefois, la réussite de cette transition hydrique ne saurait se limiter à une augmentation quantitative de l'offre : elle suppose un engagement rigoureux en faveur de la qualité, de la sécurité sanitaire et de la transparence des systèmes.

Le présent mémoire s'inscrit dans une dynamique d'engagement technique, sanitaire et méthodologique visant à améliorer durablement la qualité de l'eau produite par dessalement en Algérie. Pour répondre aux exigences croissantes en matière de sécurité hydrique, il propose une approche multidimensionnelle combinant diagnostic du système, identification des risques, application de référentiels internationaux (HACCP, ISO 22000), ainsi que la mise en œuvre d'un système numérique de suivi en temps réel. L'objectif fondamental est d'assurer la continuité du service tout en garantissant une conformité sanitaire rigoureuse et transparente.

Desaladora de Ténès en s'appuyant sur la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Ce travail a permis de dresser une cartographie précise des défaillances susceptibles de compromettre, de manière partielle ou totale, la performance du système, que ce soit de façon continue ou ponctuelle. En reliant ces points faibles aux variations constatées dans les paramètres physico-chimiques de l'eau produite, l'étude a mis en lumière le lien direct entre pannes techniques et altération de la qualité, soulignant ainsi l'importance d'un contrôle anticipatif et rigoureux.

Dans la continuité de cette démarche d'identification des vulnérabilités, le mémoire a déployé une analyse HACCP complète, structurée selon les douze étapes méthodologiques. Cette approche a permis de localiser, à chaque étape du processus de dessalement, les points critiques de contrôle (CCP), en prenant en compte les dangers microbiologiques (tels que les germes pathogènes), chimiques (comme les sous-produits de désinfection), et physiques (notamment les matières

en suspension). À chaque CCP ont été associées des limites critiques strictes, des méthodes de surveillance précises et des actions correctives ciblées, renforçant la capacité du système à gérer les risques de manière préventive et structurée.

L'intégration du référentiel ISO 22000 est venue prolonger et renforcer cette logique de maîtrise globale. Elle a introduit une dimension managériale à la gestion de la sécurité sanitaire, basée sur la traçabilité, la documentation, les audits internes, ainsi que sur un processus d'amélioration continue. En parallèle, elle a permis d'encadrer le traitement des non-conformités selon une logique rationnelle et conforme aux exigences de certification, tout en facilitant la coordination entre les différents acteurs du système qualité.

Cette base méthodologique solide a ensuite été enrichie par une analyse comparative entre l'eau dessalée produite par la station et plusieurs marques d'eaux embouteillées distribuées en Algérie. À la lumière des normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les résultats ont montré que certaines eaux embouteillées présentaient des écarts notables par rapport aux exigences sanitaires. En revanche, l'eau issue de la station a démontré, dans la majorité des cas, une conformité satisfaisante, voire une stabilité supérieure dans des paramètres essentiels tels que la conductivité, les nitrates ou les solides dissous (TDS). Ce constat vient déconstruire certaines perceptions établies autour de la qualité supposée des eaux embouteillées et légitime la valorisation de l'eau dessalée comme alternative crédible, potable et potentiellement commercialisable.

Enfin, pour renforcer l'efficacité du système et anticiper les besoins futurs en matière de gouvernance intelligente de l'eau, un prototype de plateforme numérique a été développé. Cet outil permet une saisie structurée des données de qualité, une comparaison automatique avec les seuils de l'OMS, la détection immédiate des écarts critiques, ainsi que la génération de rapports d'aide à la décision. Il ouvre la voie vers une digitalisation progressive et intelligente du contrôle qualité, intégrable aux technologies de supervision industrielle telles que les capteurs IoT ou les systèmes SCADA, permettant ainsi une gestion plus réactive, fiable et transparente de l'eau dessalée.

Ce travail démontre qu'il est possible de construire un système de dessalement efficace, sûr et fiable, à condition de mobiliser une approche systémique fondée sur la science, la rigueur normative et l'innovation technologique. La station de

Ténès apparaît ainsi comme un modèle de référence en matière de sécurité sanitaire de l'eau dessalée en Algérie, capable non seulement de répondre à une demande croissante, mais aussi d'inspirer une nouvelle génération de projets plus intelligents, plus transparents, et plus durables.

Références

- [1] Nations Unies (2023). *Progress on household drinking water, sanitation, and hygiene 2023 update*. UNICEF & WHO.
- [2] El Watan (2024). *Tiaret : Colère populaire suite aux coupures d'eau prolongées*. Article publié en juin 2024.
- [3] Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique (2025). *Rapport sur les capacités nationales de dessalement en Algérie*.
- [4] Station de dessalement de Ténès, Dossier technique interne : données de conception et de fonctionnement, document interne, 2014.
- [5] ABENGOA, Présentation du partenariat technologique pour la station de Ténès, document interne, 2014.
- [6] République Algérienne Démocratique et Populaire, Décret exécutif n°11-125 du 22 mars 2011 fixant les spécifications des eaux destinées à la consommation humaine*, Journal officiel de la République algérienne, n°20, 2011.
- [7] Organisation mondiale de la santé, *Lignes directrices de la qualité de l'eau de boisson*, 4e éd., Genève, Suisse : OMS, 2017.
- [8] Landy, G. (2011). AMDEC : Guide pratique (2e éd.). AFNOR.
- [9] Commission électrotechnique internationale. (2018). IEC 60812:2018 – Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes – Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE, AMDEC) . <https://webstore.iec.ch/publication/3434>
- [10] Marquis, P. (2015). Maîtriser l'AMDEC : Produit, Processus, Moyens de production . Éditions AFNOR.
- [11] Morin, Y. (2016). Qualité et gestion de la qualité . Dunod.
- [12] Masoumbeigi, H., Rasul, M. S., & Ghanizadeh, G. (2022). Risk identification and assessment in Hashtgerd drinking water facilities by FMEA method. Journal of Marine Médecine, 3 (4), 218–228. <https://doi.org/10.29252/jmm.3.4.218>
- [13] les tableaux de matrice AMDEC d'après le cours (TP.méthode AMDEC) de M.Benmokhtar.
- [14] IEC. (2018). Failure modes and affects analysis (FMEA and FMECA) (IEC 60812:2018). International Electrotechnical Commission.
- [15] Ashbolt, N. J. (2004). Contamination microbienne de l'eau potable et conséquences sanitaires dans les régions en développement. Toxicology, 198(1–3), 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2004.01.030>

- [17] U.S. Environmental Protection Agency. (2009). Règlements nationaux primaires sur la qualité de l'eau potable (EPA 816-F-09-004). Washington, DC : Office of Water.
- [17]10 Organisation mondiale de la Santé. (2017). Lignes directrices pour la qualité de l'eau de boisson (4^e éd., incluant le 1^{er} addendum). Genève : Organisation mondiale de la Santé.
- [18] DOW Water & Process Solutions. (2020). Manuel d'utilisation des systèmes d'osmose inverse : Bonnes pratiques pour le dessalement d'eau de mer. Récupéré de <https://www.dow.com/en-us/water/resources>
- [19] Lee, K. P., Arnot, T. C., & Mattia, D. (2011). A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 370(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.12.036>
- [20] Codex Alimentarius Commission (CAC). *Code d'usages international recommandé – Principes généraux d'hygiène alimentaire* (CAC/RCP 1-1969, Rév. 2020). FAO/OMS.Organisation internationale de normalisation. (2018). *Systèmes de management de la sécurité des aliments — Exigences pour tout organisme de la chaîne alimentaire* (ISO 22000:2018) . <https://www.iso.org/standard/55902.html>
- [21] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Organisation mondiale de la santé. (2020). *Principes généraux d'hygiène alimentaire*, CXC 1-1969, Rév. 5 . Codex Alimentarius. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/standards/list/fr/>
- [22] Mortimore, S., & Wallace, C. (2013). *HACCP: A Practical Approach* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5028-3>
- [23] OFCERTIFICATION. ISO 22000 Version 2018 - Présentation générale. 2019.
- [24] Groupe AFNOR. FAQ - Norme ISO 22000. <https://www.afnor.org>.
- [25] ISO. ISO 22000:2018 – Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain. International Organization for Standardization, 2018.
- [26] ISO. ISO 22000:2018, Introduction et principes directeurs, 2018.
- [27] QA. Guide de mise en œuvre ISO 22000:2018.
- [28] DNV. Comprendre les exigences de la norme ISO 22000. DNV Global, 2020.
- [29] Food and Agriculture Organization (FAO). HACCP system and guidelines for its application, Codex Alimentarius, FAO/WHO, 2020.

[30] ISO 22000:2018, Clause 4.1. Understanding the organization and its context.

[31] AFNOR. Audit ISO 22000 – Guide de bonnes pratiques internes. Édition 2021.

ANNEXES

Annexe 1 : les normes algériennes d'après le Décret exécutif n°11-125

Paramètres	Unité	Caractéristiques	
Normes physiques			
Saveur, odeur		L'eau ne doit présenter aucune saveur désagréable ni dégager aucune odeur.	
Coloration		Inférieure ou égale à 20 unités de l'échelle au platinocobalt.	
Turbidité		Inférieure ou égale à 30 unités tubidimétriques.	
Température		Inférieure à 25°C	
pH		Entre 6,5 et 8,5	
		Souhaitable	Maximale admissible
Radioactivité alpha globale	PCI/ℓ	00	3 (0,1 Bq/ℓ)
Radioactivité beta globale	PCI/ℓ	00	30 (1 Bq/ℓ)
Normes chimiques			
Chlore résiduel libre	mg/ℓ	0,1 au minimum au robinet en période normale.	0,5 au maximum au robinet en période d'épidémie ou de calamité naturelle.
Minéralisation globale (résidus secs) (TDS)	mg/ℓ	500	2 000
Calcium	mg/ℓ	75	200
Magnésium	mg/ℓ	50	150
Calcium + Magnésium		100 (en CaCO ₃)	500
Sodium	mg/ℓ	20	100
Potassium	mg/ℓ	10	12
Fer	mg/ℓ	0,05	0,5
Manganèse	mg/ℓ	0,01	0,2
Sulfates	mg/ℓ	200	400
Ammoniaque	mg/ℓ	0	0,05
Azote total (organique)	mg/ℓ	0,05	0,5
Nitrites	mg/ℓ	0	0,1

Suite Annexe 1 :

Paramètres	Unité	Caractéristiques	
		Souhaitable	Maximale admissible
Nitrates	mg/l	10	45
Chlorures	mg/l	200	600
Phosphates	mg/l	0	1
Oxydabilité permanganique à chaud en milieu alcalin	mg/l	0	2
Fluorures	mg/l	0,7	1,2
Sulfures	mg/l	0	0,02
Zinc	mg/l	0,1	5
Cuivre	mg/l	0,05	1,5
Aluminium	mg/l	0,05	0,2
(Métaux lourds)			
Arsenic	mg/l	0	0,05
Plomb	mg/l	0	0,1
Chrome hexavalent	mg/l	0	0,05
Chrome total	mg/l	0	0,1
Mercure	mg/l	0	0,001
Cadmium	mg/l	0	0,005
Argent	mg/l	0,01	0,05
Sélénium	mg/l	0,01	0,01
Cyanures	mg/l	0	0,05
Hydrocarbures	mg/l	0	0,001
Phénols	mg/l	0,001	0,002
Huiles et graisses	mg/l	0	0,01
Détergents anioniques	mg/l	0,2	1
(Pesticides)			
Lindane	mg/l	0	0,004
D. D. T.	mg/l	0	0,004
Méthoxychlore	mg/l	0	0,01
Parathion	mg/l	0	0,001
Méthylparathion	mg/l	0	0,005

Fin Annexe 1 :

Paramètres	Unité	Caractéristiques	
		Souhaitable	Maximale admissible
Malathion	mg/l	0	0,01
Dieldrine	mg/l	0	0,001
Carbaryl	mg/l	0	0,05
Astrasine	mg/l	0	0,01
2, 4 - D	mg/l	0	0,02
2, 4, 5 - TP	mg/l	0	0,01
2, 4, 5 - T	mg/l	0	0,01
Caractéristiques			
Normes biologiques			
Organismes parasites et pathogènes	Nombre/ 100 ml	Absence	
Coliformes totaux	Nombre/ 100 ml	(a) 3 (b) Aucun coliforme ne doit être décelé dans 2 échantillons successifs de 100 ml à analyser. (c) Au cours d'une année, la proportion des échantillons analysés contenant des coliformes ne doit pas excéder 5%.	
Eschérichia coli	Nombre/ 100 ml	0	
Streptocoques fécaux	Nombre/ 100 ml	0	

Annexe 2 : Directive de la qualité d'eau potable 1982/83

Paramètres	Directives WHO	Normes algériennes provisoire Valeur maximale admissible
Bactéries	Nombre/100 ml	Nombre/100 ml
Coliformes fécaux	0	0
Eschérichia coli	0	0
Organismes	—	—
Protozoaires (pathogènes)	Non précisés	Absence
Parasites (pathogènes)	Non précisés	Absence
Planctons (algues, etc.)	Non précisés	Non précisés
Réglementation des minéraux pour la santé	mg/l	mg/l
Arsenic	0,05	0,05
Cadmium	0,005	0,005
Chrome	0,05	Chrome total 0,1 Chrome hexavalent 0,05
Cyanures	0,1	0,05
Fluorures	1,5	1,2
Plomb	0,05	0,1
Mercuré	0,001	0,001
Azote nitrique	10	45
Azote nitreux	Non précisé	0,1
Sélénium	0,01	0,01
Argent	Non précisé	0,05
Sodium	Non précisé	100

Suite Annexe 2 :

Paramètres	Directives WHO	Normes algériennes provisoires Valeur maximale admissible
Réglementation des matières organiques pour la santé	$\mu\text{g}/\ell$	$\mu\text{g}/\ell$
Benzène	10	—
Tétrachlorure de carbone	3 (*T)	—
1, 2 - dichloroéthane	10	—
1, 1 - dichloroéthylène	0,3	—
Tétrachloroéthylène	10 (*T)	—
Trichloroéthylène	30 (*T)	—
Phénol	Non précisé	2
Pentachlorophénol	10	—
2, 4, 6 - Trichlorophénol	10	—
	(Concentration maximale perceptible 0,1)	—
Benzo(α)pyrène	0,01	—
Chloroforme	30	—
Aldrin/Dieldrine	0,03	1
Chlordane	0,3	—
2, 4 - D	100	20
D. D. T.	1	4
Heptachlore et époxyde de heptachlore	0,1	—
Hexachlorobenzène	0,01	—
Lindane	3	4
Méthoxychlore	30	10
Radioactivité	Bq/ ℓ	PCI/ ℓ
Radioactivité alpha globale	0,1	3 (0,1 Bq/ ℓ)
Radioactivité beta globale	1	30 (1 Bq/ ℓ)

NOTA: (*T) Valeur préliminaire

Fin-Annexe2 :

Paramètres	Directives WHO	Normes algériennes provisoires Valeur maximale admissible
Réglementation des matières organiques pour la santé	$\mu\text{g}/\ell$	$\mu\text{g}/\ell$
Benzène	10	—
Tétrachlorure de carbone	3 (*T)	—
1, 2 - dichloroéthane	10	—
1, 1 - dichloroéthylène	0,3	—
Tétrachloroéthylène	10 (*T)	—
Trichloroéthylène	30 (*T)	—
Phénol	Non précisé	2
Pentachlorophénol	10	—
2, 4, 6 - Trichlorophénol	10	—
	(Concentration maximale perceptible 0,1)	—
Benzo(α)pyrène	0,01	—
Chloroforme	30	—
Aldrin/Dieldrine	0,03	1
Chlordane	0,3	—
2, 4 - D	100	20
D. D. T.	1	4
Heptachlore et époxyde de heptachlore	0,1	—
Hexachlorobenzène	0,01	—
Lindane	3	4
Méthoxychlore	30	10
Radioactivité	Bq/ ℓ	PCI/ ℓ
Radioactivité alpha globale	0,1	3 (0,1 Bq/ ℓ)
Radioactivité beta globale	1	30 (1 Bq/ ℓ)

NOTA: (*T) Valeur préliminaire

Annexe 3 : Synthèse des défaillances critiques selon la méthode AMDEC appliquée au traitement par osmose inverse

L'étude AMDEC -processus de la station de dessalement dessaladora OyM-									
1. Captage de l'eau de mer									
Tuyaux PRFV : Fonction : Transporter 540 000 m³/j d'eau de mer sans fuite.									
Système captage : Fonction : Pré-filtrer particules > 5 mm via grille.									
Grilleurs Beaudry : Fonction : Retenir débris > 10 mm.									
Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Tuyaux PRFV	Transporter 540 000 m³/j sans fuite	Fuite d'eau salée (500 L/h perdu)	Corrosion saline fissure tuyau	Débit < 500 000 m³/j, pollution marine	2	2	3	12	Inspection interne avec caméra robotisée étanche (ex : Riezler T700) Application d'un revêtement époxy anticorrosion résistant aux chlorures (ex. 3M Scotchkote 162HB) Ajout de capteurs d'humidité dans les tranchées pour détection rapide de nouvelles fuites
		Blocage partiel (débit < 450 000 m³/j)	Sable accumulé	Cavitation pompes, débit insuffisant	2	4	2	16	Nettoyage par curage hydrodynamique avec buses rotatives haute pression (250 bars) Installation d'un débitmètre électromagnétique (Siemens MAG5100) pour alerte précoce Système de chasse automatique programmable en amont pour éviter les dépôts
Système de captage	Pré-filtrer particules > 5 mm	Refus d'ouverture grille (grille fixe)	Roulements grippés par sel	Débit nul, arrêt captage	3	4	2	24	Remplacement des roulements par modèles inox AISI 316 étanches (ex. SKF corrosion marine) Graissage programmé avec graisse marine (Shell Gadus S5 V100Q) tous les 15 jours Ajout de capteur de position (ex. IFM Electronic) sur la grille pour détection d'anomalie
		Ouverture intempestive (grille coincée ouverte)	Débris bloquent mécanisme	Particules > 10 mm passent, colmatage aval	3	4	2	24	Grille à nettoyage automatique par racleur intégré (type FSM or StepScreen) Désinfection régulière du mécanisme avec un biocide non oxydant Capteur de position + alarme visuelle dans salle de contrôle
Grilleurs Beaudry	Retenir débris > 10 mm	Mauvaise fermeture (trous > 15 mm)	Abrasion grille par sable	Débris vers filtres, TSS > 20 mg/L	2	4	2	16	Remplacement par grilles inox renforcées, découpées au laser Analyse granulométrique hebdomadaire (tamis 10, 5 et 1 mm) Filtration d'appoint en amont lors de crues ou tempêtes (rideau filtrant)

		Obstruction totale (débit < 300 000 m³/j)	Déchets > 10 cm accumulés	Arrêt captage, pression amont > 2 bars	3	3	3	27	Installation d'un capteur de pression différentielle ΔP (ex. WIKA A2G) pour détection automatique Plan de nettoyage manuel renforcé : 2x/semaine en période estivale Ajout d'un système de raclage ou râteau mécanique à intervalles réguliers
--	--	---	---------------------------	--	---	---	---	----	--

Suite Annexe 3 :

2. Prétraitement									
2.1. Prétraitement physique									
2.1.a. Filtration à sable									
Filtres à sable : Fonction : Réduire TSS <1 mg/L.									
Pompes lavage : Fonction : Fournir 3 800 m³/h pour nettoyage.									
Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Filtres à sable	Réduire TSS < 1 mg/L	Obstruction des buses (TSS > 5 mg/L)	Colmatage lit filtrant	Surcharge cartouches, encrassement OI	3	4	3	36	Lavage automatique déclenché si TSS > 2 mg/L (capteur turbidity Hach) Injection préventive d'agent coagulant pour améliorer la capture des solides Surveillance du colmatage via ΔP entrée/sortie filtre
		Fuite de liquide (eau brute dans filtrée)	Joints usés	TDS > 500 mg/L, contamination OI	2	3	3	18	Remplacement des joints par EPDM certifiés NSF61 Test d'étanchéité à la fluorescéine (colorant UV) à chaque maintenance Plan de remplacement des joints toutes les 1 000 h de fonctionnement
Pompes lavage	Fournir 3 800 m³/h	Refus de démarrage (0 m³/h)	Surcharge électrique	Colmatage persistant, arrêt filtration	3	3	2	18	Ajout d'alimentation de secours sur onduleur Vérification thermique des enroulements moteur (thermographie Fluke)
		Fonctionnement partiel (débit < 2 000 m³/h)	Rotor corrodé	Lavage inefficace, TSS > 10 mg/L	2	4	3	24	Revêtement du rotor avec couche anticorrosion céramique (ex. Belzona 1321) Surveillance en continu avec capteur de débit inductif

Suite Annexe 3 :

2.1. b Filtration à cartouche

Filtres cartouche : **Fonction** : Réduire particules < 0,5 µm, SDI < 3.

Pompes HP : **Fonction** : Fournir eau à 65 bars.

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Filtres cartouche	Réduire particules < 0,5 µm	Endommagement mécanique (SDI > 5)	Membrane percée	Encrassement OI, débit -30 %	3	4	2	24	Effectuer un test SDI (Silt Density Index) chaque 24 heures. Remplacement des filtres si SDI > 4 dans les 6 heures. Nettoyage des logements des cartouches (corps de filtre), vérification des joints toriques. Installer des manomètres à l'entrée et à la sortie du filtre à cartouche. Calibration périodique des instruments de mesure (SDI, manomètres) Séances de sensibilisation trimestrielles pour tous les opérateurs.
		Obstruction des buses (ΔP > 3 bars)	Colmatage pores	- Production réduite - surcharge OI	3	4	3	36	Utilisation un filtre fin (≤ 50 µm) en amont pour éviter particules trop grosses. Remplacement ou nettoyage immédiat des buses si ΔP > 2,5 bars Installation de capteurs de pression différentielle (ΔP) en amont et aval des buses. Rinçage à contre-courant avec air + eau ou produit anti-encrassement en cas de colmatage répété.
Pompes HP	Fournir eau à 65 bars	Refus de démarrage (0 bar)	Moteur grille	- Arrêt OI - production nulle	4	2	1	8	Contrôle thermographique régulier du moteur afin de détecter des échauffements anormaux avant la panne -Vérification des paramètres électriques de l'intensité, tension, cos φ pour anticiper surcharge ou déséquilibre. -maintenance préventive programmée (tous les 3 à 6 mois) Nettoyage du moteur, contrôle des roulements, graissage, alignement arbre. -Mise en place d'une pompe de secours montée en parallèle (by-pass) -Capteurs de vibration et de température moteur (surveillance conditionnelle)
		Fuite de liquide (pression < 60 bars)	Joints usés	Débit -20 %, stress membranes	2	4	2	16	Installation de capteurs de pression en entrée/sortie de la pompe HP Remplacement systématique des joints d'étanchéité tous les 3 à 6 mois (joints en Viton (FKM)) Inspection visuelle hebdomadaire de la pompe (présence de fuites) Choix de pompes avec cartouche de joint facilement remplaçable (type split seal)

Suite Annexe 3 :

2.2. Prétraitement chimique 2.2.a. Désinfection (chloration)

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Dosage hypochlorite	Maintenir Cl ₂ {0,5-1} mg/L	Manque d'alimentation (Cl ₂ < 0,2 mg/L)	Pompe sous-alimentée	CFU > 100/mL, bio-encrassement OI	3	4	2	24	Analyseur de chlore libre automatique (ex. Wallace & Tiernan) Recalibrage mensuel des pompes doseuses avec étalon traceable Alerte SMS/SCADA si Cl ₂ < 0.3 mg/L
		Fuite de liquide (Cl ₂ > 2 mg/L localement)	Joints usés	-Eau corrosif - Corrosion tuyaux, risque sécurité	2	4	3	24	Tuyauterie en PVDF ou PFA, joints PTFE Détecteur de fuite au sol avec arrêt de pompe automatique Formation sécurité Cl ₂ avec douche d'urgence sur site

2.2.b. Coagulation-Floculation

Dosage FeCl₃ : Fonction : Réduire TSS < 10 mg/L via floes.

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Dosage FeCl ₃	Réduire TSS < 10 mg/L	Manque d'alimentation (TSS > 15 mg/L)	FeCl ₃ < 4 mg/L	Colmatage filtres, surcharge OI	3	4	3	36	Turbidimètre en ligne (Hach 1720E) Boucle PID pour ajuster le débit de FeCl ₃ en temps réel Analyse en laboratoire 1x/semaine des floes formés (test jar)
		Fuite de liquide (Fe > 0,5 mg/L dans eau)	Injecteur fissuré	-Eau brunâtre -gout métallique -coût excessif	3	3	2	18	Contrôle visuel et pression de l'injecteur chaque semaine Analyse Fe résiduel dans l'eau (spectromètre Hach DR6000) Remplacement de l'injecteur avec clapet anti-retour intégré

2.2.c. Dosage méta-bisulfite

Pompe doseuse : Fonction : Réduire Cl₂ < 0,05 mg/L.

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Pompe doseuse	Réduire Cl ₂ < 0,05 mg/L	Blocage de la vanne (Cl ₂ > 0,1 mg/L)	Cristaux bouchent injecteur	Oxydation membranes OI	4	2	3	24	Rinçage périodique à l'eau chaude toutes les 24h Injection via pompe péristaltique à tête autonettoyante
		Fonctionnement partiel (Cl ₂ > 0,08 mg/L)	Membrane pompe usée	Dégradation progressive OI	3	3	2	18	Capteur de débit massique sur ligne méta-bisulfite Remplacement préventif de la membrane toutes les 1000 heures Maintenance préventive intégrée dans GMAO

Suite Annexe 3 :

2.2.d. Dosage inhibiteur anti-scalant

Système dosage : Fonction : Empêcher précipitation sels ($\Delta P < 10 \%$).

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Système dosage	Empêcher précipitation ($\Delta P < 10 \%$)	Refus d'ouverture ($\Delta P > 15 \%$)	Pompe bloquée	Encrassement OI - débit - 25 %	4	2	3	24	Analyse hebdomadaire de l'indice de Langelier (précipitation CaCO_3) Entretien préventif des pompes (graissage, test pression)
		Fuite de liquide (résidus visqueux)	Joints usés	Coût +15 %, encrassement tuyaux	3	3	3	27	Détecteur de fuite (niveau électrodes ou balance sous récipient) Joints en PTFE à changer tous les 6 mois Purge automatique des lignes après dosage

3. Osmose inverse

Pompes HP : Fonction : Maintenir 65 bars.

Tubes pression : Fonction : Contenir 65 bars sans fuite.

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Membranes OI	Produire 208 696 m ³ /j	Fonctionnement dégradé (débit < 150 000 m ³ /j)	Biofilm réduit perméabilité	Production insuffisante, SDI > 5 -colmatage des membranes	3	3	2	18	Nettoyage CIP chimique alcalin/oxydant toutes les 400 h (ex : NaOH + NaOCl) Mesure SDI (Silt Density Index) avant OI avec arrêt automatique si SDI > 4 Surveillance croissance bactérienne par ATP-mètre portatif (LuminUltra)
	TDS < 500 mg/L	Endommagement mécanique (TDS > 1000 mg/L)	Chlore > 0,1 mg/L	Eau impropre, rejet sel < 90 %	4	2	3	24	Analyseur de chlore libre juste avant OI (ex : Endress+Hauser) Injection redondante de méta-bisulfite avec vérification par double capteur redox Mise en place d'un by-pass OI si TDS dépasse 800 mg/L pour éviter usage inapproprié
Pompes HP	Maintenir 65 bars	Refus de démarrage (0 bar)	Moteur grille	Arrêt OI, production nulle	4	2	2	16	Thermographie moteur mensuelle Basculement automatique sur pompe de secours Plan de remplacement moteur après 8 000 h d'usage
		Fuite de liquide (pression < 60 bars)	Joints usés	Débit -20 %, stress membranes	3	3	2	18	Joints métalliques Hastelloy résistants à 65 bars et Cl ⁻ Capteur de pression numérique étalonné (WIKA) Surveillance vibrations mécaniques (analyse spectrale)

Tubes pression	Contenir 65 bars	Fuite de la vanne (eau jaillit à 65 bars)	Fissure soudure	Perte 5 % débit, arrêt rack	4	1	3	12	Test par ultrasons périodique des soudures (ex : Olympus Epoch 6LT) Tubes en duplex inox 2205 ou en PRV renforcé Remplacement préventif tous les 5 ans ou 40 000 h
----------------	------------------	---	-----------------	-----------------------------	---	---	---	----	---

Fin Annexe 3 :

4. Reminéralisation

Dosage CO₂ : Fonction : Ajuster pH à 7-8.

Dosage Ca(OH)₂ : Fonction : Fournir Ca > 30 mg/L.

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Dosage CO ₂	Ajuster pH à 7-8	Manque d'alimentation (pH < 6,5)	Soupape bloquée fermée	Eau corrosive, dissolution tuyaux	2	3	2	12	Capteur pH en ligne (Mettler Toledo) Débitmètre CO ₂ en entrée injecteur (Emerson Micro Motion)
		Ouverture intempestive (pH < 6)	Soupape coincée ouverte	Goût acide, CO ₂ libre > 20 mg/L	1	3	2	6	Vanne de sécurité anti-surdosage (ASCO) Alarme pH si < 6.4 avec arrêt dosage immédiat
Dosage Ca(OH) ₂	Fournir Ca > 30 mg/L	Refus d'ouverture (Ca < 20 mg/L)	Saturateur obstrué	Eau agressive, risque santé	2	3	2	12	Nettoyage hebdomadaire du saturateur Analyse CaCO ₃ avec titration EDTA
		Fuite de liquide (Ca > 120 mg/L)	Injecteur fissuré	Eau dure, dépôts	3	3	2	18	Capteur débit spécifique pour lait de chaux (Endress Promag W)
Silos stockage	Stocker Ca(OH) ₂ sans perte	Fuite de poudre (10 kg/h perdu)	Fissure silo	Poussière, stock insuffisant	2	2	1	4	Silo double paroi + détecteur de niveau capacitif Inspection visuelle mensuelle (échafaudage + EPI)

5. Stockage et distribution

Réservoir : Fonction : Stocker eau sans fuite ni contamination.

Dosage hypochlorite : Fonction : Maintenir Cl₂ 0,5-1 mg/L.

Pompes HP : Fonction : Distribuer eau à débit stable.

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause possible	Effet	G	F	D	C	Actions recommandées
Réservoir	Stocker sans fuite	Fuite de liquide (500 L/h perdu)	Fissure béton	Perte 5 % volume, contamination sol	1	3	3	9	Fissuromètre laser Injection de résine époxy (type Sika) Surveillance niveau par radar Vega
	Stocker sans contamination	Fonctionnement dégradé (CFU > 100/mL)	Cl ₂ < 0,2 mg/L	Eau impropre, risque sanitaire	4	4	1	16	UV de désinfection complémentaire Analyse bactériologique journalière (membrane filtrante 0,45 µm) Contrôle chlore libre avec réactif DPD
Dosage hypochlorite	Maintenir Cl ₂ 0,5-1 mg/L	Manque d'alimentation (Cl ₂ < 0,3 mg/L)	Pompe sous-alimentée	CFU > 200/mL, contamination	3	4	2	24	Installer un capteur de chlore résiduel en ligne. Activer un système de dosage adaptatif avec régulation automatique. Prévoir une pompe doseuse de secours en redondance.
		Ouverture intempestive (Cl ₂ > 1,5 mg/L)	Injecteur bloqué ouvert	Goût chloré, plaintes	2	3	2	12	Mettre une alarme de surchloration avec arrêt automatique. Ajouter une vanne de sécurité sur la ligne d'injection. Nettoyer mensuellement l'injecteur pour éviter les blocages.
Pompes HP	Distribuer débit stable	Refus de démarrage (0 m³/h)	Moteur grille	Pénurie eau, arrêt distribution	4	2	1	8	Thermographie Pompe secours automatisée

		Fuite de liquide (débit fluctue ± 50 %)	Joints usés	Pression instable, bruit	2	4	2	16	Capteur de débit à effet vortex ou magnétique Alerte si variation débit > 20 %
--	--	---	-------------	--------------------------	---	---	---	----	---

Annexe 4 : Audit interne de l'engagement de l'organisme vers la norme ISO-22000

Cette annexe présente les résultats de l'audit interne réalisé à la station de dessalement DESALADORA OyM Ténès pour évaluer la conformité à la norme ISO 22000. Elle détaille les

exigences auditées pour les Articles 4 à 8, leur évaluation ( Conforme, .l.

Partielle

ment

conforme, + Non conforme), les preuves ou actions nécessaires, les responsables, et les délais. Une synthèse globale conclut l'annexe, avec des recommandations pour la certification. Le contenu est conçu pour être intégré dans la section annexe du Projet de Fin d'Études (PFE), copié dans Microsoft Word, et converti en PDF.

Introduction

- **Date de l'audit** : 15 mai 2025.
- **Objectifs** : Vérifier la conformité des processus de la station aux exigences ISO 22000, identifier les écarts, et proposer des actions correctives.
- **Périmètre** : Articles 4 (Contexte), 5 (Leadership), 6 (Planification), 7 (Support), 8 (Fonctionnement), incluant les PRP et CCP potentiels.
- **Méthodologie** : Observations sur site, entretiens avec le personnel, analyse des documents existants.
- **Légende** :
 -  Conforme : Exigence satisfaite.
 - .l Partiellement conforme : Actions complémentaires nécessaires.
 - × Non conforme : Exigence non satisfaite.

A. Article 4 : Contexte de l'Organisme

Exigence	Évaluation	Preuve/Action	Responsable	Délai
Identification des enjeux internes et externes	— Partiellement conforme	Analyse SWOT réalisée, formaliser dans un document officiel	Direction générale	1 mois
Cartographie des parties prenantes	✓ Conforme	Créer un registre des parties prenantes	Resp. qualité	2 mois
Veille réglementaire organisée	✓ Conforme	Suivi informel existant, formaliser une procédure de veille	Resp. juridique	1 mois
Analyse de l'environnement concurrentiel	✓ Conforme	Études de marché disponibles	Direction commerciale	-
Identification besoins clients	✓ Conforme	Contrats et cahiers des charges clients (ADE-Chlef)	Direction commerciale	-
Exigences réglementaires identifiées	✓ Conforme	Registre réglementaire (normes potabilité, environnement)	Resp. réglementaire	-
Attentes communauté locale	✗ Non conforme	Enquête satisfaction/acceptabilité locale	Communication	3 mois
Relations avec autorités sanitaires	✓ Conforme	Rapports réguliers avec autorités	Direction technique	-

Périmètre du système défini	Partiellement conforme	Périmètre technique défini, préciser organisationnel	Resp. qualité	2 semaines
Exclusions justifiées	Non conforme	Analyser l'applicabilité de toutes les exigences	Resp. qualité	1 mois
Domaine d'application	Non conforme	Rédiger une déclaration du domaine d'application	Resp. qualité	2 semaines
documenté				
Processus identifiés et documentés	Partiellement conforme	Processus techniques identifiés, manque processus support	Resp. qualité	1 mois
Interactions entre processus définies	Non conforme	Cartographie des processus et interactions	Resp. qualité	1 mois
Ressources allouées	Partiellement conforme	Ressources techniques OK, ressources qualité insuffisantes	Direction	2 mois

- **Commentaire** : Bonne gestion des besoins clients et réglementaires (6 , 42,86%), mais lacunes en formalisation (documentation, cartographie) et engagement communautaire (3 , 21,43%). Priorité : rédiger le domaine d'application et cartographier les processus.

B. Article 5 : Leadership

Exigence	Évaluation	Preuve/Action	Responsable	Délai
----------	------------	---------------	-------------	-------

Engagement de la direction démontré	■ Partiellement conforme	Engagement oral, formaliser par une politique écrite	Direction générale	2 semaines
Ressources mises à disposition	■ Partiellement conforme	Budget formation à confirmer	Direction financière	1 mois
Communication de l'importance du SMSA	✗ Non conforme	Plan de communication interne	Direction/RH	1 mois
Revue de direction	✗ Non conforme	Programmation des revues de direction	Direction	1 mois
planifiée	conforme			
Politique sécurité alimentaire rédigée	✗ Non conforme	Rédiger une politique spécifique à l'eau potable	Direction/Resp. qualité	3 semaines
Adéquation avec le contexte	✗ Non conforme	Adapter la politique au contexte du dessalement	Direction/Resp. qualité	3 semaines
Engagement amélioration continue	✗ Non conforme	Intégrer un engagement d'amélioration continue	Direction	2 semaines
Exigences légales et clients intégrées	✗ Non conforme	Référencer les exigences dans la politique	Resp. Qualité	2 semaines

Politique disponible pour parties intéressées	■Partiellement conforme	Diffusion interne et externe de la politique	Communication/RH	1 mois
Personnel informé et formé	■Partiellement conforme	Session d'information du personnel	RH/Formation	2 mois
Responsabilités définies et communiquées	—Partiellement conforme	Organigramme existant, manque responsabilités qualité	RH	1 mois
Équipe sécurité des denrées alimentaires	× Non conforme	Constituer une équipe HACCP multidisciplinaire	Direction	2 semaines
Responsable équipe HACCP désigné	× Non conforme	Nommer un responsable HACCP qualifié	Direction	2 semaines

- **Commentaire** : Absence de politique formalisée et d'équipe HACCP (8 +, 61,54%) ; engagement oral insuffisant. Priorité : rédiger une politique et constituer l'équipe HACCP dans les 2-3 semaines.

C. Article 6 : Planification

Exigence	Évaluation	Preuve/Action	Responsable	Délai
Risques et opportunités identifiés	■Partiellement conforme	Analyse SWOT, formaliser un registre des risques	Resp. qualité	1 mois

Actions planifiées	■ Partiellement conforme	Plan d'actions risques/opportunités	Resp. qualité	1 mois
Intégration dans processus SMSA	■ Partiellement conforme	Intégrer la gestion des risques dans les procédures	Resp. qualité	2 mois
Objectifs définis et mesurables	■ Partiellement conforme	Objectifs techniques existants, manque objectifs qualité	Direction/Resp. qualité	1 mois
Cohérence avec la politique	× Non conforme	Aligner les objectifs avec la future politique	Resp. qualité	2 semaines
Ressources déterminées	■ Partiellement	Ressources techniques OK, évaluer besoins qualité	Direction	1 mois
	conforme			
Surveillance et communication	× Non conforme	Définir indicateurs et modalités de suivi	Resp. Qualité	1 mois
Plan d'actions défini	■ Partiellement conforme	Plan technique existant, compléter avec plan qualité	Resp. Qualité	1 mois
Échéancier établi	× Non conforme	Planning détaillé pour ISO 22000	Resp. Qualité	2 semaines
Responsabilités assignées	× Non conforme	Matrice de responsabilités	Resp. Qualité	2 semaines

- **Commentaire** : Planification technique partielle (6 l. , 60,00%), mais absence de structure qualité (4 +, 40,00%). Priorité : établir un planning et des objectifs qualité dans les 2-4 semaines.

D. Article 7 : Support

Exigence	Évaluation	Preuve/Action	Responsable	Délai
Ressources nécessaires identifiées	■ Partiellement conforme	Ressources techniques OK, évaluer besoins humains qualité	Direction/RH	1 mois
Ressources allouées	✓ Conforme	Budget équipements confirmé, confirmer budget formation	Direction financière	2 mois
Personnel suffisant et compétent	■ Partiellement conforme	Équipe technique OK, renforcer compétences qualité	RH	3 mois
Disponibilité du personnel	✓ Conforme	Effectifs adéquats pour exploitation	RH	-
Infrastructure adaptée	✓ Conforme	Installation de dessalement opérationnelle	Direction technique	-
Maintenance de l'infrastructure	✓ Conforme	Programme de maintenance préventive	Maintenance	-
Laboratoire de contrôle	✓ Conforme	Laboratoire équipé et accrédité	Resp. laboratoire	-

Conditions de travail appropriées	✓ Confor me	Environnement industriel conforme	HSE	-
Mesures d'hygiène et sécurité	✓ Conforme	Procédures HSE en place	HSE	-
Équipements de mesure identifiés	✓ Conforme	Analyseurs en ligne, sondes, instruments labo	Resp. Technique	-
Étalonnage des équipements	✓ Conforme	Programme d'étalonnage externe	Resp. métrologie	-
Traçabilité métrologique	✓ Conforme	Certificats d'étalonnage archivés	Resp. métrologie	-
Connaissances nécessaires identifiées	■ Partiellement conforme	Expertise technique OK, compléter connaissances HACCP	Formation	2 mois
Acquisition de connaissances externes	✗ Non conforme	Formation ISO 22000/HACCP du personnel	Formation	6 mois
Capitalisation des connaissances	✗ Non conforme	Base de données connaissances/bonnes pratiques	Resp. Qualité	3 mois
Compétences nécessaires déterminées	■ Partiellement conforme	Référentiel technique OK, compléter référentiel qualité	RH	1 mois

Personnel compétent	■ Partiellement conforme	Compétences techniques OK, former aux exigences ISO 22000	RH/Formation	6 mois
Actions de formation	× Non conforme	Plan de formation ISO 22000	Formation	1 mois
Évaluation des compétences	× Non conforme	Procédure d'évaluation des compétences	RH	2 mois
Enregistrements des compétences	■ Partiellement conforme	CV et diplômes existants, compléter par formations qualité	RH	1 mois
Personnel sensibilisé à la politique	× Non conforme	Sessions de sensibilisation	RH/Communication	2 mois
Contribution aux objectifs qualité	× Non conforme	Communication sur le rôle de chacun	Management	1 mois
Conséquences de non-conformité	× Non conforme	Formation sur impacts sécurité sanitaire	Formation	2 mois
Communications internes et externes	■ Partiellement conforme	Communication technique OK, formaliser communication qualité	Communication	1 mois
Processus de communication défini	× Non conforme	Procédure de communication SMSA	Communication	1 mois

Communication avec parties externes	☑ Conforme	Rapports aux autorités, clients	Direction	-
Informations pertinentes communiquées	☑ Conforme	Résultats d'analyses, incidents	Direction technique	-
Communication sur efficacité SMSA	✗ Non conforme	Réunions qualité régulières	Management	1 mois
Remontée d'informations du personnel	■ Partiellement conforme	Réunions techniques OK, formaliser remontées qualité	Management	1 mois
Informations documentées exigées	✗ Non conforme	Inventaire de la documentation requise	Resp. qualité	2 semaines
Documents créés par l'organisme	■ Partiellement conforme	Procédures techniques OK, compléter documentation qualité	Resp. qualité	3 mois
Identification et description	✗ Non conforme	Procédure de gestion documentaire	Resp. qualité	1 mois
	conforme			
Format et support appropriés	■ Partiellement conforme	Docs techniques papier/électronique, standardiser	Resp. qualité	2 mois

Revue et approbation	✗ Non conforme	Circuit de validation des documents	Resp. Qualité	1 mois
Disponibilité et utilisation	■ Partiellement conforme	Procédures affichées, améliorer accessibilité	Resp. Qualité	1 mois
Protection adéquate	■ Partiellement conforme	Sauvegarde partielle, système de sauvegarde complet	IT	2 mois
Activités de maîtrise	+ Non conforme	Procédure de gestion des documents	Resp. Qualité	1 mois

- **Commentaire** : Infrastructure et communication externe robustes (12  , 35,29%), mais lacunes en formation, documentation, et sensibilisation (10 +, 29,41%).
Priorité : plan de formation et système documentaire dans les 1-6 mois.

E. Article 8 : Fonctionnement

Exigence	Évaluation	Preuve/Action	Responsable	Délai
Processus nécessaires planifiés	■ Partiellement conforme	Processus techniques OK, compléter planification qualité	Resp. qualité	1 mois
Critères des processus établis	■ Partiellement	Paramètres techniques OK, définir critères qualité	Resp. qualité	1 mois
	Conforme			
Maîtrise conformément aux critères	 Conforme	Automatismes et contrôles en place	Exploitation	-

PRP établis, mis en œuvre et maintenus	■ Partiellement conforme	Bonnes pratiques existantes, formaliser en PRP	Resp. Qualité	3 mois
PRP appropriés à l'organisme	× Non conforme	Analyse des PRP spécifiques au dessalement	Resp. qualité	2 mois
Efficacité des PRP évaluée	× Non conforme	Système de surveillance des PRP	Resp. qualité	2 mois
Qualité de l'eau de mer (PRP)	× Non conforme	Surveillance et critères d'acceptation	Resp. qualité	1 mois
Maintenance préventive équipements (PRP)	✓ Conforme	Programme existant	Maintenance	-
Nettoyage et désinfection installations (PRP)	✓ Conforme	Procédures partielles, compléter	Maintenance	2 mois
Gestion des produits chimiques (PRP)	✓ Conforme	Stockage sécurisé, formaliser procédures	Maintenance	1 mois
Maîtrise des nuisibles (PRP)	✓ Conforme	Contrat de dératisation	Maintenance	-
Hygiène du personnel (PRP)	✓ Conforme	Règles informelles, formaliser	RH	1 mois
Gestion des déchets (PRP)	✓ Conforme	Évacuation organisée	Maintenance	-

Formation du personnel (PRP)	✓ Conforme	Programme de formation spécifique mensuel	Formation	2 mois
Système de traçabilité établi	■ Partiellement conforme	Traçabilité technique OK, étendre à tous les intrants	Resp. qualité	2 mois
Identification unique des lots	× Non conforme	Système de numérotation des lots d'eau	Exploitation	1 mois
Relation entre intrants et produits	× Non conforme	Registre de traçabilité	Resp. qualité	1 mois
Durée de conservation des enregistrements	× Non conforme	Définir durées de conservation	Resp. qualité	2 semaines
Situations d'urgence identifiées	■ Partiellement conforme	Risques techniques OK, compléter risques qualité	HSE/Qualité	1 mois
Procédures d'urgence établies	■ Partiellement conforme	Procédures techniques OK, ajouter aspects qualité	HSE/Qualité	2 mois
Tests périodiques	× Non conforme	Exercices de simulation	HSE	3 mois
Revue et mise à jour	× Non conforme	Révision annuelle des procédures	HSE	6 mois
Étude HACCP réalisée	× Non conforme	Étude HACCP complète spécifique dessalement	Équipe HACCP	4 mois

Équipe HACCP multidisciplinaire	✗ Non conforme	Constitution équipe (technique, qualité, labo, exploitation)	Direction	2 semaines
Responsable d'équipe désigné	✗ Non conforme	Nomination responsable HACCP	Direction	1 semaine
Connaissances et expérience appropriées	✗ Non conforme	Formation HACCP du responsable	Formation	2 mois
Autorité pour initier les actions	✗ Non conforme	Définition des responsabilités	Direction	2 semaines
Description complète du produit	■ Partiellement conforme	Spécifications techniques OK, compléter aspects sécurité	Équipe HACCP	1 mois
Ingrédients et matières premières	✓ Conforme	Eau de mer, produits chimiques identifiés	Équipe HACCP	-
Caractéristiques physico-chimiques	✓ Conforme	Paramètres de qualité définis	Laboratoire	-
Traitement et transformation	✓ Conforme	Processus de dessalement documenté	Technique	-
Conditionnement	✓ Conforme	Système de distribution défini	Exploitation	-
Conditions de stockage	✓ Conforme	Réservoirs de stockage	Exploitation	-

Méthode de distribution	✓ Conforme	Réseau de distribution	Exploitation	-
Durée de conservation	✓ Conforme	Eau potable pour consommation immédiate	Équipe HACCP	-
Instructions d'utilisation	✓ Conforme	Eau potable pour usage direct	Équipe HACCP	-
Usage prévu identifié	✓ Conforme	Consommation humaine	Équipe HACCP	-
Utilisateurs ciblés	✓ Conforme	Population générale	Équipe HACCP	-
Groupes sensibles identifiés	✓ Conforme	Nourrissons, immunodéprimés identifiés	Équipe HACCP	-
Diagrammes de flux établis	■ Partiellement conforme	Schéma de procédé OK, adapter au format HACCP	Équipe HACCP	1 mois
Toutes les étapes incluses	■ Partiellement conforme	Étapes techniques OK, vérifier exhaustivité	Équipe HACCP	2 semaines
Vérification sur site	✗ Non	Validation des	Équipe	2
	conforme	diagrammes sur le terrain	HACCP	semaines
Description détaillée de chaque étape	■ Partiellement conforme	Description technique OK, adapter approche HACCP	Équipe HACCP	2 mois

Paramètres de procédé	✓ Conforme	Paramètres opératoires documentés	Technique	-
Équipements utilisés	✓ Conforme	Liste des équipements	Technique	-
Dangers identifiés et analysés	✓ Conforme	Analyse complète des dangers (biologiques, chimiques, physiques)	Équipe HACCP	3 mois
Évaluation de la gravité	✗ Non conforme	Évaluation risques spécifiques dessalement	Équipe HACCP	3 mois
Probabilité d'occurrence	✗ Non conforme	Analyse probabiliste des dangers	Équipe HACCP	3 mois
Mesures de maîtrise identifiées	✓ Conforme	Définition des mesures préventives	Équipe HACCP	3 mois
Dangers biologiques	✗ Non Conforme	Analyse microbiologique complète	Équipe HACCP	3 mois
Dangers chimiques	✗ Non conforme	Analyse chimique exhaustive	Équipe HACCP	3 mois
Dangers physiques	✗ Non conforme	Analyse des risques physiques	Équipe HACCP	3 mois
Dangers radiologiques	✗ Non conforme	Évaluation risque radiologique	Équipe HACCP	3 mois
CCP déterminés	✗ Non conforme	Application arbre de décision CCP	Équipe HACCP	2 mois

Justification des CCP	× Non conforme	Documentation des choix de CCP	Équipe HACCP	2 mois
Captage eau de mer (CCP potentiel)	× Non conforme	Monitorer qualité eau brute	Équipe HACCP	2 mois
Prétraitement (CCP potentiel)	× Non conforme	Monitorer dosage chimique	Équipe HACCP	2 mois
Osmose inverse (CCP potentiel)	× Non conforme	Monitorer intégrité membranes	Équipe HACCP	2 mois
Désinfection finale (CCP potentiel)	× Non conforme	Monitorer dosage désinfection	Équipe HACCP	2 mois

- **Commentaire** : Opérations techniques solides (22 , 40,74%), mais lacunes critiques en HACCP, traçabilité, et PRP spécifiques (21 , 38,89%). Priorité : constituer une équipe HACCP et réaliser une étude HACCP dans les 1-4 mois.

Résumé Global

- **Total exigences auditées** : 125 (14 pour Article 4, 13 pour Article 5, 10 pour Article 6, 34 pour Article 7, 54 pour Article 8).
- **Taux de conformité** :
 -  Conforme : 40 (32,00%).
 -  Partiellement conforme : 39 (31,20%).
 -  Non conforme : 46 (36,80%).

- **Forces :**
 - Infrastructure robuste (Article 7 : maintenance, laboratoire, équipements de mesure).
 - Communication externe efficace (rapports aux autorités, résultats d'analyses).
 - Caractéristiques du produit bien définies (Article 8 : paramètres physico-chimiques, distribution).
- **Faiblesses :**
 - Absence de politique de sécurité alimentaire (Article 5).
 - Étude HACCP incomplète et équipe HACCP non constituée (Article 8).
 - Manque de documentation qualité et de formation ISO 22000 (Article 7).
- **Recommandations :**
 - **Priorité 1 : HACCP** : Constituer une équipe HACCP (2 semaines) et réaliser une étude HACCP complète (4 mois).
 - **Priorité 2 : Documentation** : Rédiger une politique (3 semaines), cartographier les processus (1 mois), et établir un système documentaire (1-3 mois).
 - **Priorité 3 : Formation** : Mettre en place des programmes ISO 22000/HACCP (6 mois).
 - **Priorité 4 : Parties prenantes** : Réaliser une enquête communautaire (3 mois).
 - **Priorité 5 : Suivi** : Planifier des revues de direction (1 mois) pour suivre les progrès.
- **Conclusion** : La station a une base technique solide mais manque de structure organisationnelle pour le SMSA. Avec les actions proposées, la certification ISO 22000 est réalisable dans 6 à 12 mois.