



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option: REUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLE

(RENC)

THEME :

**Dimensionnement de la chaine de post-traitement de l'usine de
dessalement de kouddiet eddraouch wilaya d'EL TARF**

Présenté par :

BENSLAMA Chems-eddine

Devant les membres de jurys

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
DJELLAB Mohamed	Professeur	Président
LEULMI MEDJDOUB Sonia	MCB	Examineur
BETATACHE Hayat	MCB	Examineur
KOLIAI Djaffar	MAA	Examineur
HACHEMI Abdelkader	MCA	Promoteur

Session..... 2024

DEDICACE :

À celle qui m'a montré que la patience ouvre les portes du succès et mène à la victoire,

À ma mère, source inépuisable d'amour et de sagesse.

À celui qui m'a éclairé le chemin en m'enseignant que la science et la persévérance forgent les plus grands esprits,

À mon père, mon premier mentor et guide.

À ceux qui ont été mon soutien inébranlable, qui m'ont offert leur encouragement et leur réconfort,

À mes précieuses sœurs : Dounia, Malak et Insaf.

Et à mes amis chers, qui ont été à mes côtés tout au long de ce parcours, tout particulièrement :

Saber.

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à *Dieu*, le Tout-Puissant, pour la force, la sagesse, et la persévérance qu'Il m'a accordées tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier tout particulièrement mon encadreur au sein de l'école, Monsieur **Hachemi Abdelkader**, pour son accompagnement constant, ses conseils avisés, et sa disponibilité. Son expertise et son engagement ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Monsieur **CHEKROUD REDHA**, mon encadreur de stage, pour son soutien inestimable, sa guidance professionnelle et ses précieux retours qui ont enrichi ce travail. Son implication a été une véritable source d'inspiration.

Je remercie chaleureusement **l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique** pour l'éducation de qualité et les ressources mises à ma disposition, qui m'ont permis de me développer académiquement et professionnellement.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet. Leur aide, leurs encouragements, et leur soutien ont été pour moi d'une grande valeur.

ملخص:

تواجه الجزائر تحديات جسيمة لمواجهة أزمة المياه المتزايدة، وتعتمد على تحلية المياه لتلبية الطلب على المياه الصالحة للشرب. يستكشف هذا البحث تحسين مرحلة المعالجة النهائية للمياه المحلاة، مع التركيز على إعادة تمعدن المياه باستخدام الكالسيت والدولوميت و ذلك لتحقيق التوازن الكربوكلسي. تم إجراء تحليل مفصل لمحطة التحلية في الطارف لتقييم طرق المعالجة. يركز الجزء الأساسي من الدراسة على تحديد حجم سرير الكالسيت ومقارنة تقنية اقتصادية مع الدولوميت. الهدف هو تحديد أفضل نهج لضمان جودة المياه مع السيطرة على التكاليف.

الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، المعالجة النهائية للمياه، التوازن الكربوكلسي، الكالسيت، الدولوميت

Résumé :

L'Algérie, confrontée à des défis hydriques croissants, utilise le dessalement pour répondre à la demande en eau potable. Ce mémoire explore l'optimisation du post-traitement de l'eau dessalée, en particulier la reminéralisation avec la calcite et la dolomite. Une analyse détaillée de la station de dessalement d'EL TARG est menée pour évaluer les méthodes de traitement. Le cœur de l'étude se concentre sur le dimensionnement du lit de calcite et une comparaison technico-économique avec la dolomite. L'objectif est de déterminer la meilleure approche pour garantir une eau de qualité tout en maîtrisant les coûts.

Mots clés : dessalement, post traitement, la reminéralisation, équilibre calcocarbonique, lit de calcite, dolomite

Abstract :

Algeria, facing increasing water challenges, relies on desalination to meet the demand for potable water. This thesis explores the optimization of post-treatment for desalinated water, focusing on remineralization using calcite and dolomite. A detailed analysis of the EL TARG desalination plant is conducted to assess the treatment methods. The core of the study is centered on the sizing of the calcite bed and a techno-economic comparison with dolomite. The goal is to identify the best approach to ensure water quality while controlling costs.

Keywords: desalination, post treatment, calco-carbonic equilibrium, calcite bed, calcite contactor's

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction générale : 1

CHAPITRE I : Généralités sur les eaux de dessalement en Algérie

I.1.Introduction : 3

I.2.Problématique : 3

I.3. Répartition de l'eau douce sur la planète : 3

I.4. Disponibilité de l'eau douce : 4

I.5. Situation de l'Algérie : 6

I.5.1. Les ressources en eau : 7

I.6. Historique du dessalement : 7

I.7. L'expérience algérienne dans le dessalement : 9

I.7.1. Liste des stations de dessalement en Algérie : 11

I.8. Dessalement de l'eau de mer : 13

I.8.1 Définition : 13

I.8.2. Sélection du procédé de dessalement : 13

I.8.2.1. Critères économiques : 14

I.8.2.2. Critères techniques : 14

I.9. Le procédé membranaire : 15

I.9.1. Explication de la méthode de l'osmose inverse 15

I.9.2. Schéma général d'une installation d'osmose inverse : 17

I.10. Les avantages et les inconvénients du dessalement : 17

I.10.1. Les avantages : 17

I.10.2. Les inconvénients : 18

I.11. Impacts sur l'environnement : 19

I.12. Effets de la saumure concentrée :	21
Conclusion :	22

CHAPITRE II :Présentation de la zone d'étude

Introduction :.....	25
II.2. Emplacement du site :.....	25
II.3. Données de base du projet :.....	26
II.3.1. Condition de référence :	26
II.3.2. Condition de référence du site :.....	27
II.4. Description du procès :.....	27
II.4.1. Captage d'eau de mer :.....	27
II.4.2. Phase de prétraitement :.....	30
II.4.3. Phase d'osmose inverse :.....	33
II.4.4. Phase post traitement :.....	36
II.4.5. Phase de livraison :.....	37
II.4.6. Service auxiliaire:.....	37
II.4.6.1. Système de traitement des effluents et rejets liquides :.....	37
II.4.6.2. Système anti-incendie :.....	38
II.4.6.2. Système de contrôle à distance :.....	38
Conclusion :.....	39

CHAPITRE III : Les techniques et les options du post traitement

Introduction :.....	41
III.1. Le rôle des minéraux dissous dans l'eau :.....	41
III.2. Les normes de potabilités :.....	42
III.3. Définition de l'équilibre calcocarbonique :.....	43
III.4. Composition des eaux :.....	43
III.4.1 Les éléments constitutifs de l'eau :	44
III.4.2. Les éléments caractéristiques :.....	44

III.5. Equilibre prédominant :	45
III.6. Les eaux agressives et les eaux incrustantes :	45
III.7. pH d'équilibre :	47
III.8. Les paramètres influençant l'équilibre calcocarbonique :	50
III.8.1. Pression partielle du CO ₂	50
III.8.2. La température :	50
III.8.3. pH (Potentiel hydrogène) :	50
III.8.4. La conductivité	51
III.8.5. Alcalinité :	51
a) TA (titre alcalimétrique) :	52
b) TAC (titre alcalimétrique complet) :	52
III.8.6. Dureté de l'eau :	52
- le TH total :	52
III.9. Les indice d'appréciations des eaux :	53
III.9.1. L'indice de Langelier (indice de saturation) :	53
III.9.2 L'indice de Ryznard (indice de stabilité) :	53
III.9.3. L'indice de Stiff et Davis :	54
III.9.4. L'indice de Larson (indice de corrosivité) :	54
III.10. Procédés de mise à l'équilibre dans les stations de dessalement :	55
III.11. Importance de l'équilibre calcocarbonique :	55
III.13. Caractéristiques souhaitables :	57
III.14. Comment mettre l'eau à l'équilibre calcocarbonique :	57
III.15. Définition de la reminéralisation :	58
III.15.1. Techniques de reminéralisation :	58
a) Dosage direct de solutions chimiques	58
b) Méthode de gaz carbonique et chaux (la carbonatation) :	59
c) Méthode de passage sur lit filtrant (dolomite) :	61

d) Ajout de Calcium : Contacteurs de Calcaire (Calcite) [20].....	62
e) Reminéralisation par mélange avec de l'eau de source	64
Conclusion :.....	65

CHAPITRE IV : Dimensionnement du post traitement

Introduction :.....	66
IV.1. L'objectif du post traitement :.....	66
IV.2. Concept du post traitement :	66
IV.3. Principe de fonctionnement d'un lit calcite:	67
IV.4. Dimensionnement de l'ouvrage du lit calcite :	69
IV.4.1. Détermination les paramètres de l'eau à traiter :.....	69
a) La quantité de l'eau à traiter :	69
b) La qualité de l'eau à traiter (permeat):.....	70
c) Calcul de la dureté totale :	71
d) La qualité de l'eau commercialisable souhaitée de l'usine :.....	71
e) Calcul des indices de saturation du permeat :.....	72
IV.4.2. Calcul des besoins de la reminéralisation :	72
a) TH final (après reminéralisation dans le mélange final) :.....	72
b) La dureté à ajouter dans le mélange :.....	73
c) La dureté à ajouter dans le flux traité.....	73
d) Ca^{2+} à ajouter dans le flux traité.....	73
f) HCO_3^- à produire dans le flux secondaire traité.....	73
g) CaCO_3 dissous dans le courant latéral traité	73
IV.4.3. Calcul les besoins en CO_2 :	74
a) Besoins en CO_2 dans le flux secondaire traité.....	74
b) CO_2 à doser (réaction stœchiométrique) dans le flux latéral traité	74
c) CO_2 non réagi dans le flux latéral traité	74
d) CO_2 à ajouter dans le flux latéral traité	75

e) La masse de CO ₂ à doser (pureté 99%)	75
f) CO ₂ dosé par jour.....	75
IV.4.4. Calcul des dimensions de l'ouvrage (lit calcite) :	76
a) Débit de dimensionnement :	76
b) Temps de contact :	76
c) Vitesse de passage :	76
d) Nombre de filtres:	76
e) La surface d'un filtre S _{filtre} :.....	77
f) La longueur et la largeur :.....	77
IV.5. Estimation des Quantités de CaCO ₃ Consommées	78
a) Débit unitaire nominal :.....	78
b) Débit unitaire maximum :.....	79
c) Consommation de CaCO ₃ pur par filtre (kg/h de CaCO ₃) :.....	79
d) Consommation totale de produit commercial par filtre :.....	79
e) Consommation journalière par filtre :	79
f) Consommation journalière des filtres :	79
g) Consommation totale après 14 jours :	79
IV.6. Qualité de l'eau produit finale :	80
a) La concentration de Ca ²⁺ finale dans l'eau produite finale:.....	81
b) La concentration de HCO ³⁻ finale dans l'eau produite finale :	81
c) Détermination de l'alcalinité :.....	81
IV.7. Calcul des indices de saturations	82
a) Calcul du pH :	82
b) Calcul du pH _s :	82
c) Calcul de l'index de saturation de langelier :.....	85
IV.8. Ajustement du pH :	86
a) NaOH nécessaire pour neutraliser tout le CO ₂ libre,.....	86

b) Le pourcentage de CO ₂ libre réagi :	86
c) Calcul HCO ₃ ⁻ produit par l'ajout de Na(OH) :	87
d) Calcul de la quantité de CaCO ₃ produit :	87
e) Calcul de la quantité du CO ₂ libre restante :	87
f) Calcul du TDS finale :	87
g) Calcul de l'alcalinité finale :	87
h) Calcul de l'indice de saturation :	88
IV.9. Consommation de NaOH :	89
Conclusion :	89

CHAPITRE V : Comparaison technico-économique entre les différents matériaux utilisés

Introduction	91
V.1. Comparaison détaillée entre la dolomite et la calcite :	91
V.1.1. Composition Chimique :	91
V.1.2. Réaction avec le CO ₂ :	92
V.1.3. Des Quantités nécessaires et de la qualité de l'eau traitée avec la calcite et la dolomite:	93
IV.1.3.1. Interface Graphique du Logiciel :	93
a) Saisie des Données Initiales de l'Eau	93
b) Analyse de l'Eau (Appréciation) :	94
c) Étape de Traitement	95
V.1.4. Comparaison des Coûts de Consommation	99
Conclusion :	100
Conclusion générale :	102

Référence bibliographique

Annexe

Listes des figures

CHAPITRE I

Fig. I.1 : Répartition de l'eau douce.....	4
Fig. I.2 : Estimation de la disponibilité de l'eau douce en 2025.....	5
Fig. I.3 : Les précipitations en Algérie.....	6
Fig. I.4 : Les bassins hydrographiques de l'Algérie du Nord.....	7
Fig. I.5 : Illustration historique des Grecs condensant la vapeur dans les éponges.....	8
Fig. I.6 : Emplacement des grandes stations de dessalement en Algérie.....	13
Fig. I.7 : Les divers procédés de dessalement.....	14
Fig. I.8 : Schéma générale d'une installation de dessalement.....	15
Fig. I.9 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	16
Fig. I.10 : Membrane d'osmose inverse.....	17
Fig. I.11: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	18
Fig. I.12 : Etat naturel (initial) du milieu (absence de rejet de saumure)	23
Fig. I.13. Etat du milieu après l'installation de la station de dessalement (après rejet de saumure)	23

CHAPITRE II

Fig. II.1 : Photo satellitaire du site de l'usine d'EL TARF.....	25
Fig. II.2 : La situation géographique de l'usine d'EL TARF.....	26
Fig. II.3 : Tour de captage de l'eau de mer.....	28
Fig. II.4 : schéma explicatif simplifié de la chaine du prétraitement.....	30
Fig. II.5 : Système d'osmose inverse avec un échangeur d'énergie et pompe Booster.....	34
Fig. II.6: Echangeur de pression de type ERI.....	35

CHAPITRE III

Fig. III.1 : Présentation des zones d'existences des eaux dures/eaux douces et eaux entartrantes /eaux agressives en fonction du pH et du TAC.....46

Fig. III.2 : Les diverses formes sous lesquelles se trouve le CO₂ dans l'eau.....47

Fig. III.3 : Conséquences des eaux agressives sur les réseaux de distribution.....56

Fig. III.4 : Schéma d'un système de dosage de chaux.....59

Fig. III.5 : Schéma du fonctionnement d'un filtre de dolomite.....62

CHAPITRE IV

Fig. IV.1 : le schéma d'un contacteur à calcite typique.....68

Liste des tableaux :

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Les stations de dessalement et de déminéralisation existantes dans les années 1970 et 1980.....	10
Tableau I.2 : Les Méga stations de dessalement en Algérie.....	12
Tableau I.3 : Grille d'impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement.....	20

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Qualité de l'eau de mer.....	26
Tableau II.2 : Qualité de l'eau de mer (suite).....	27

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Les oligo-éléments et leur action sur la santé humaine.....	41
Tableau III.2 : Les éléments fondamentaux dans l'eau.....	44
Tableau III.3 : Les éléments caractéristiques.....	44
Tableau III.4: Valeurs des pKi pour différentes degrés de température.....	49
Tableau III.5 : Relation entre la conductivité et la minéralisation de l'eau.....	51
Tableau III.6 : Classement des eaux en fonction du TH. (BENAMOUR.M, 2007).....	52
Tableau III.7 : La relation entre l'indice de Ryznard et la tendance incrustante ou corrosive d'une eau.....	53
Tableau III.8 : La relation entre l'indice de Larson et la tendance corrosive de l'eau.....	54

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Les valeurs des différents débits.....	69
Tableau IV.2 : le bilan ionique du l'eau de permeal par projection.....	70
Tableau IV.3 : Calcul de la dureté total et calcique.....	71

Tableau IV.4 : Les normes de paramètres principaux de la qualité de l'eau produit.....	72
Tableau IV.5 : les résultats des indices de saturation.....	72
Tableau IV.6 : Les résultats du calcul des besoins.....	74
Tableau IV.7 : Les résultats des paramètres liés au dosage du CO ₂	75
Tableau IV.8 : Les dimensions et calculs hydrauliques de l'ouvrage.....	78
Tableau IV.9 : Les résultats des paramètres liés au dosage du CO ₂	80
Tableau IV.10 : Bilan ionique du l'eau produit.....	82
Tableau IV.11 : les valeurs de TDSF en fonction de TDS.....	83
Tableau IV.12 : les valeurs de TF en fonction de la température.....	84
Tableau IV.13 : les valeurs de TF en fonction de la température.....	84
Tableau IV.14 : les valeurs d'AF en fonction de l'alcalinité.....	85
Tableau IV.15 : Les Paramètres de l'eau Après Traitement et Ajustement du pH.....	88
Tableau IV.16 : Résultats du LSI pour Différentes Températures.....	88
Tableau IV.17 : Consommation de NaOH pour le Traitement de l'eau.....	89
CHAPITRE V	
Tableau V.1 : La quantité journalière de CaCO ₃ consommées par les filtres.....	96
Tableau V.3 : La quantité journalière de la dolomite consommée par les filtres.....	97
Tableau V.2 : Le cout de consommation de la calcite.....	98
Tableau V.4 : Le cout de consommation de la dolomite.....	98

Liste des abréviations

O.I : Osmose Inverse.

K : Constante d'équilibre

Ks : Constante de solubilité

Ke : Constante d'équilibre de dissociation de l'eau.

IL : Indice de Langelier

IR : Indice de Ryznard

Alc : Alcalinité

pH : Potentiel d'hydrogène

GUI : Interface graphique

pHs : pH d'équilibre calcocarbonique.

μ : La force ionique

TA : Titre Alcalimétrique

TDS : Total des Solides Dissouts.

TAC : Titre Alcalimétrique Complet.

Ppm : Parts Per Million.

TH : Titre hydrotimétrique total

γ : Coefficient d'activité de l'ion considéré

Introduction générale

Introduction générale :

L'Algérie, pays aux ressources hydriques limitées, se trouve confrontée à des défis croissants en matière de gestion de l'eau en raison de l'augmentation de la population, de l'urbanisation rapide et des effets du changement climatique. Dans ce contexte, le dessalement de l'eau de mer est devenu une solution indispensable pour satisfaire la demande croissante en eau potable. Cependant, le processus de dessalement, bien qu'efficace pour éliminer les sels et autres impuretés, laisse l'eau dans un état qui nécessite un traitement complémentaire avant sa distribution.

Le post-traitement, phase importante dans la chaîne de production de l'eau potable, joue un rôle essentiel dans la reminéralisation de l'eau dessalée. Cette étape vise non seulement à réintroduire des minéraux nécessaires pour garantir une eau de qualité conforme aux normes de santé, mais aussi à prévenir la corrosion des infrastructures de distribution. Le choix des matériaux et des méthodes pour cette reminéralisation, tels que l'utilisation de la calcite ou de la dolomite, a des implications significatives non seulement sur la qualité de l'eau produite, mais aussi sur les coûts opérationnels des stations de dessalement.

Le travail de recherche dans ce mémoire se concentre sur l'optimisation du post-traitement de l'eau dessalée, en particulier la reminéralisation à l'aide de calcite et de dolomite. Après avoir exploré le contexte général du dessalement en Algérie, l'étude s'attache à l'analyse détaillée des techniques de post-traitement disponibles.

Une étude approfondie a été ensuite réalisée sur la station de dessalement d'EL TARF, actuellement en phase de construction et prévue pour une capacité de production de 300 000 m³/j. Cette analyse vise non seulement à comprendre les méthodes de dessalement prévues, mais aussi à évaluer les défis spécifiques liés au traitement de l'eau dans cette installation. L'objectif est d'identifier des solutions d'amélioration pour le post-traitement, en particulier pour optimiser l'utilisation de l'espace et répondre efficacement aux exigences de qualité de l'eau.

Le cœur de ce mémoire est axé sur le dimensionnement du lit de calcite, y compris les calculs des quantités nécessaires des produits utilisés pour assurer une reminéralisation efficace. Les résultats obtenus pour la calcite sont comparés à ceux obtenus avec la dolomite, permettant une évaluation technico-économique des deux approches. Cette comparaison

permet d'identifier les meilleures pratiques pour optimiser la qualité de l'eau tout en contrôlant les coûts de production.

En se basant sur ces analyses, ce mémoire vise à déterminer la solution optimale pour le post-traitement de l'eau dessalée en identifiant le meilleur matériau et technique de reminéralisation afin de garantir une qualité d'eau optimale tout en assurant une gestion efficace des coûts, contribuant ainsi à la durabilité des ressources en eau en Algérie.

CHAPITRE I :

**Généralités sur les eaux de
dessalement en Algérie**

I.1.Introduction :

En raison de la croissance démographique et du changement climatique, de nombreux pays se tournent vers le dessalement de l'eau de mer pour répondre à la pénurie d'eau potable. Cette méthode transforme efficacement l'eau salée en eau douce utilisable, offrant une solution vitale pour les besoins humains, agricoles et industriels. Malgré des coûts élevés et des préoccupations environnementales, le dessalement reste une réponse essentielle à la crise mondiale de l'eau, avec un potentiel important pour assurer la sécurité hydrique à long terme.

I.2.Problématique :

La raréfaction des ressources en eau douce sur Terre, exacerbée par la croissance démographique et les changements climatiques, soulève un défi crucial pour l'humanité. Avec seulement 3 % de l'eau disponible en tant qu'eau douce, dont une infime partie est naturellement utilisable après traitement, la nécessité de trouver des solutions durables pour répondre aux besoins en eau potable devient pressante. Dans ce contexte, le recours au dessalement de l'eau de mer émerge comme une réponse incontournable pour exploiter efficacement les vastes ressources océaniques. Cependant, cette approche soulève également des questions sur les coûts, l'empreinte environnementale et la gestion équitable des ressources en eau. Ainsi, comment concilier les besoins croissants en eau douce avec les défis liés au dessalement et garantir un accès équitable à cette ressource vitale pour tous les habitants de la planète ?

I.3. Répartition de l'eau douce sur la planète :

Près de 97 % de l'eau sur Terre est salée et seulement 3 % est de l'eau douce. La majeure partie de cette eau douce (environ 68,7 %) est gelée dans les calottes glaciaires polaires, et la majeure partie des 30,1 % restants réside dans des aquifères souterrains situés dans des endroits éloignés. Seule une petite partie de cette eau douce, représentant moins de 1 % de toute l'eau douce et 0,4 % de l'eau de la Terre, est disponible dans les rivières, les lacs et les réservoirs et est facilement accessible pour une utilisation humaine directe [W2]. (Comme figuré dans la Fig. I.1)

De plus, la répartition géographique et temporelle de ces réserves d'eau douce et des débits d'eau douce est très hétérogène.

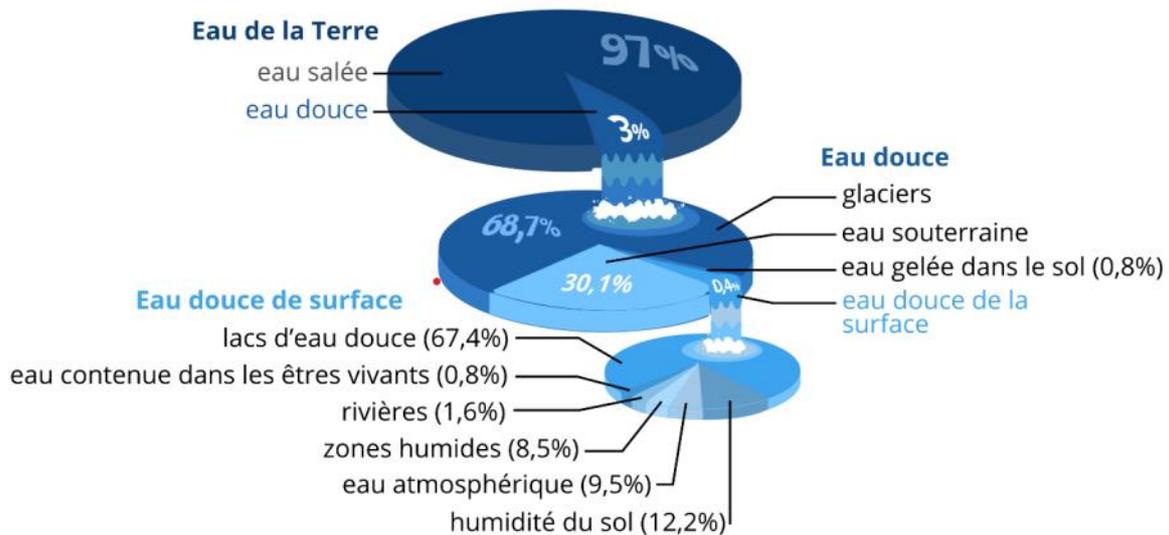


Fig. I.1. Répartition de l'eau douce. [W1]

I.4. Disponibilité de l'eau douce :

Il est étonnant de penser que la population mondiale, comme toutes les formes de vie, dépend de cette petite quantité d'eau sur Terre. Combien de temps cette situation va-t-elle durer ?

Du point de vue humain, l'eau est souvent localisée dans des endroits inappropriés, sous des formes inadéquates, et disponible au mauvais moment. C'est pourquoi la disponibilité de l'eau dépend de plusieurs facteurs :

- La quantité d'eau disponible dans une région ou un pays, incluant les précipitations, la présence de cours d'eau ou de lacs, ainsi que les ressources souterraines.
- Le nombre d'habitants et leur utilisation individuelle de l'eau, comprenant leurs besoins et leur consommation spécifiques.

Bien que les réserves totales d'eau douce sur Terre demeurent relativement constantes, la répartition inégale de cette ressource, combinée à l'augmentation de la population mondiale, pose des défis croissants en termes de disponibilité et d'accessibilité de l'eau douce. Cette incertitude quant à la disponibilité des ressources hydriques constitue un défi majeur pour de nombreux pays, et peut impacter leur croissance économique.

En cas de pénurie d'eau, lorsque les demandes humaines et les besoins des écosystèmes dépassent la capacité des réserves hydriques, une concurrence émerge entre les utilisateurs d'eau

et d'autres parties prenantes. D'ailleurs, plus que la moitié de la population mondiale habite dans des régions confrontées à des difficultés d'approvisionnement en eau. Ce pourcentage devrait augmenter d'ici 2025 [W3] (voir Fig. I.2).

Villes utilisant au moins 40% de l'eau disponible dans les bassins hydrographiques

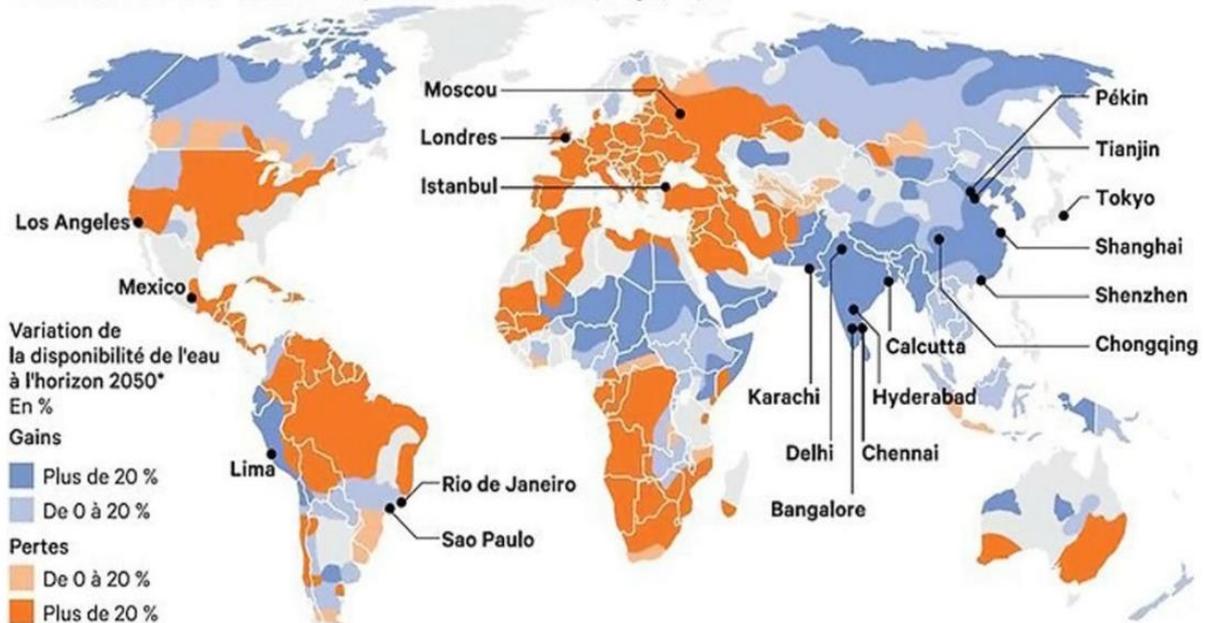


Fig. I.2. Estimation de la disponibilité de l'eau douce en 2025 [W2].

Même si nous envisageons la disponibilité de l'eau principalement en termes de besoins humains, il est important de reconnaître que l'eau est tout aussi importante pour toutes les formes de vie et les écosystèmes qui les soutiennent. Cependant, répondre à ces besoins écologiques risque d'accroître la pénurie d'eau pour les humains. Cette situation nous place devant un dilemme. Compte tenu de tous nos besoins, devrions-nous donner la priorité aux besoins en eau des populations ? Si nous le faisons, quels sont les coûts environnementaux à long terme ? Nous disposons de moins de 1 % de l'eau douce mondiale disponible pour répondre à nos besoins, mais cette ressource est inégalement répartie [W4].

En conclusion, la demande actuelle et future en eau ne peut être satisfaite que grâce à l'utilisation de ressources non conventionnelles telles que le recyclage et le dessalement de l'eau.

I.5. Situation de l'Algérie :

L'Algérie, avec ses 2,4 millions de km², est caractérisée par trois régions distinctes, chacune avec son propre relief et climat. Au nord, la chaîne du Tell et le littoral bénéficient d'un climat méditerranéen et de ressources en eau renouvelables, tandis que la région des Hautes Plaines au sud est arrosée par la chaîne de l'Atlas. En revanche, le vaste désert saharien au sud ne reçoit que peu de précipitations, mais abrite d'importantes réserves d'eaux souterraines. Cette disparité climatique se traduit par une grande diversité de précipitations, allant de 350 mm en moyenne dans l'ouest à plus de 1000 mm à l'est, avec des pics pouvant atteindre 2000 mm dans les reliefs. Les précipitations sont concentrées de décembre à avril, représentant les 5 mois les plus pluvieux, et décroissent rapidement vers le sud, où la moyenne annuelle peut être inférieure à 100 mm. L'Algérie se situe, à l'instar des 17 pays Africains touchés par le stress hydrique, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an

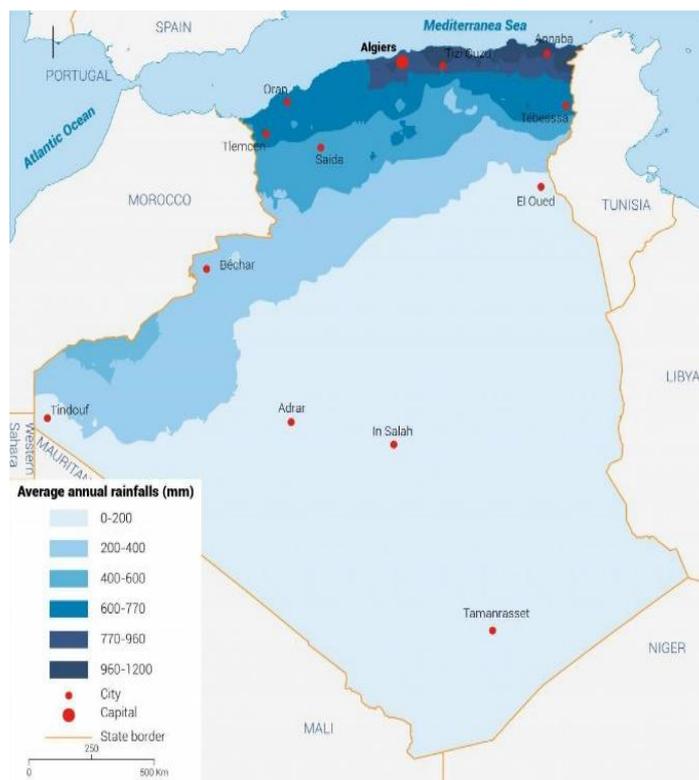


Fig. I.3. Les précipitations en Algérie

I.5.1. Les ressources en eau :

L'Algérie est subdivisée en cinq bassins hydrographiques qui comprennent au total dix-sept bassins versants. Cependant, les ressources en eau ne sont pas uniformément distribuées à travers le pays, que ce soit en termes de géographie, de volume ou de type, nature (eaux de surface ou souterraines).

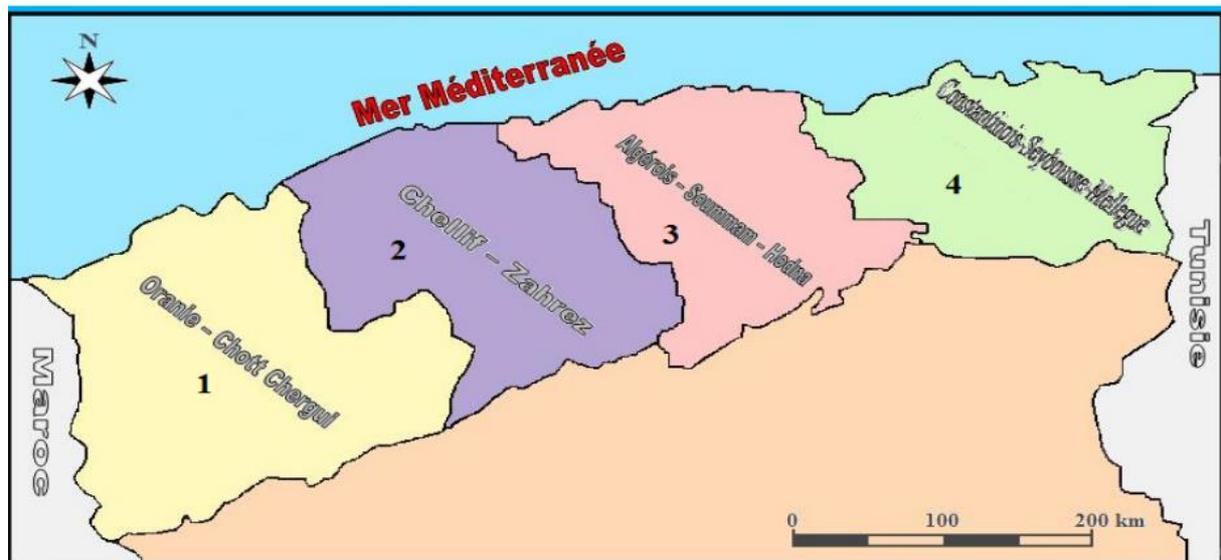


Fig. I.4 : Les bassins hydrographiques de l'Algérie du Nord. [3]

I.6. Historique du dessalement :

Le dessalement de l'eau est en pleine expansion à l'échelle mondiale, en réponse à la demande croissante en eau potable de haute qualité. Cette demande est amplifiée par les risques persistants de pollution tout au long du cycle de l'eau, pouvant entraîner des maladies et des problèmes de santé publique. De plus, la répartition inégale des ressources en eau douce à travers le monde souligne la nécessité de s'appuyer sur le dessalement de l'eau de mer pour rééquilibrer l'accès à cette ressource vitale.

La distillation représente la plus ancienne méthode de dessalement de l'eau de mer au monde ! Remontant à Aristote au 4^{ème} siècle avant J-C, cette technique a été évoquée par le philosophe grec dans ses écrits sur les Météorologiques : « L'expérience nous a appris que l'eau de mer est réduite en vapeur devient potable et le produit vaporisé, une fois condensé, ne reproduit pas l'eau de mer ». Onze siècles plus tard, Adélarde de Bath, un philosophe et naturaliste a décrit deux de ses expériences dans les Questions naturelles : « Au soleil, après l'évaporation sur un rocher, l'eau de mer se transforme en sel ; lorsque le soleil fait défaut, on chauffe de l'eau de

mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformer en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales » [W5]

Ce chimiste explique que la vaporisation se produit naturellement sur les roches près des mers grâce à l'activité solaire, augmentant ainsi la salinité de l'eau de mer. Les marins grecs ont utilisé ce processus pour dessaler l'eau de mer lors de leurs voyages, en faisant bouillir l'eau dans des casseroles pour laisser le sel se déposer au fond. Cette méthode simple était utilisée en parallèle avec la vaporisation et la condensation pour obtenir de l'eau douce (voir Fig. I.5). [W5]

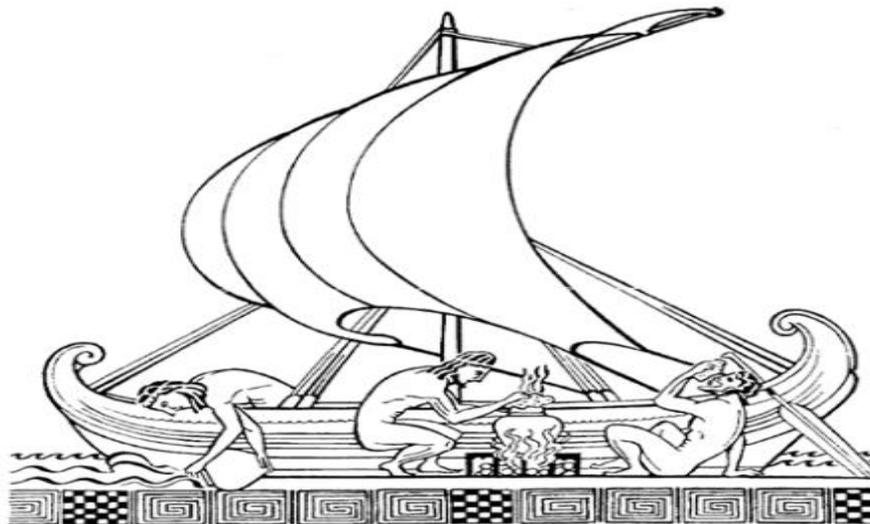


Fig. I.5. Illustration historique des Grecs condensant la vapeur dans les éponges. [W5]

Alors, l'histoire du dessalement parte déjà de l'époque grecque. Durant le XVI^e siècle, on constate aussi des essais rudimentaires. C'est à partir du XIX^e siècle qu'apparaît au Chili la première usine par distillation solaire dont la production de 20m³ permet de fournir de l'eau à un village minier dans une zone aride.

Plus tard, dans la première moitié du XX^e siècle, des techniques d'évaporation ont été utilisées pour les processus de dessalement. La dépendance et la forte consommation énergétique favoriseront l'exploration d'autres méthodes comme les membranes. La recherche sur les membranes a connu son premier succès dans les années 1960 aux États-Unis. Les matériaux ont évolué des membranes plates en acétate de cellulose aux polyamides aromatiques

qui sont jusqu'à 99 % plus imperméables au sel. Un autre objectif était de réduire la pression nécessaire au dessalement.

Dans les années 1970, la capacité de production mondiale n'était que de 1,7 hm³/jour .Les usines de dessalement utilisant des techniques d'évaporation étaient courantes, principalement en raison de leur coût de construction relativement bas mais de leur consommation énergétique élevée. Après la crise pétrolière de 1973, les pays exportateurs de pétrole et les pays souffrant de graves pénuries d'eau ont commencé à installer des usines d'évaporation à grande échelle, souvent associées à la production d'électricité.[09]

Dans les années 1980, les usines d'osmose inverse ont commencé à émerger comme une alternative aux techniques traditionnelles d'évaporation, notamment dans la région du Golfe Persique.

Dans les années 1990, bien que l'évaporation ait continué à être utilisée dans certaines régions du Moyen-Orient, l'osmose inverse est devenue de plus en plus répandue et préférée. Les avantages économiques et environnementaux de l'osmose inverse, notamment sa consommation d'énergie réduite et sa meilleure efficacité, ont conduit à son adoption plus large dans cette région, marquant ainsi un tournant dans l'industrie du dessalement de l'eau.

Actuellement, et d'après l'inventaire mondial de l'Association Internationale de Dessalement (IDA), Il existe plus de 22 000 unités de dessalement dans le monde produisent environ 110 millions de m³/j, dans 177 pays.

Si les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, d'une grande aridité, ont été parmi les premiers à recourir au dessalement de l'eau de mer, en Europe, c'est l'Espagne qui est le premier producteur d'eau dessalée avec 405 millions de m³ produits par an.

Ainsi, la plus importante usine de dessalement d'eau de mer en Europe a été aménagée dans la banlieue sud de Barcelone ; 200 000 m³ d'eau douce y sont produits tous les jours.

Actuellement, les plus importants producteurs d'eau douce par dessalement sont Israël (645 millions de m³), l'Algérie (631 millions de m³), l'Espagne (405 millions de m³) et l'Égypte (200 millions de m³)[09]

I.7. L'expérience algérienne dans le dessalement :

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement en vue d'un

usage exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable était quasi inexistant. Néanmoins une seule expérience a été tentée dans une situation où il n'existait aucune autre solution. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'Ouled Djellal dans la wilaya de Biskra (sud-est algérien). [01]

Dans l'industrie, la déminéralisation et le dessalement sont utilisés pour assurer la fourniture de l'eau de chaudière, de refroidissement, de traitement. En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est « à tubes submergés » travaillant à basse pression. Et en 1969, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j. Le procédé utilisé est MSF. Dès lors de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire à l'activité des complexes de production d'électricité (Cap Djanet à l'est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda). Egalement quelques installations sont destinées, principalement dans le Sud, à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières.[01]

Tableau I.1 : Les stations de dessalement et de déminéralisation existantes dans les années 70 et 80 [01].

Site	Nombre d'unités	Débit (m ³ /j)	Procédé	Mise en service
Skikda	1	1440	Flash	1971
Skikda	2	720	Flash	1971
Skikda	/	1440	Echangeurs d'ions	1971
Annaba	2	960	Echangeurs d'ions	1971
Annaba	2	3600	Echangeurs d'ions	1973
Ghazaouat	1	840	Echangeurs d'ions	1974
Arzew	6	3880	Electrodialyse	1975
Arzew	/	960	Echangeurs d'ions	1975
Hassi Messaoud	6	1000	Electrodialyse	1975
Hassi Messaoud	2	110	Electrodialyse	1976

HassiTouil	1	55	Electrodialyse	1977
Arzew	1	350	Thermo compression	1978
Annaba	3	14180	Multi flash	1978
Hassi Messaoud	2	350	Electrodialyse	1978
Bel Abbas	/	1500	Echangeurs d'ions	1978
HaoudBercaoui	1	55	Electrodialyse	1979
Hassi Messaoud	2	300	Electrodialyse	1979
Rhoud El Baguel	1	25	Electrodialyse	1979
Arzew	1	960	Multi flash (5 étages)	1979
Annaba	2	144	Echangeurs d'ions	1979
Annaba	2	576	Echangeurs d'ions	1979
HassiRmel	3	792	Osmose inverse	1979
Annaba	2	6240	Echangeurs d'ions	1980
Ghardaïa	/	960	Osmose inverse	1980
Arzew	1	960	Multi flash (6 étages)	1980
Mostaganem	/	57600	Osmose inverse (6 lignes)	1980
Rhourd El Baguel	2	300	Electrodialyse	1981
Biskra	/	864	Osmose inverse	1981
Annaba	1	1800	Echangeurs d'ions	1981
Reghaia	/	160	Echangeurs d'ions	1982

I.7.1. Liste des stations de dessalement en Algérie :

Le long du littoral algérien, il existe 23 stations de dessalement d'eau de mer, réparties sur les 14 wilayas côtières sous la supervision du Ministère des Ressources en Eau (MRE). Ces installations représentent 18 % de l'approvisionnement en eau du pays et fournissent de l'eau à 6 millions de personnes, avec une capacité totale de production de 2,6 millions de mètres cubes par jour. Par exemple, la wilaya de Chlef dispose de deux stations de dessalement, dont celle de Ténès avec une capacité de 200 000 m³/jour. De même, la wilaya de Béjaïa compte une station de dessalement à Tighremt, actuellement en construction avec une capacité prévue de 300 000 m³/jour. La wilaya d'Alger présente plusieurs stations opérationnelles telles que celles

du Hamma, de Staoueli, de Aïn Benian, de Zeralda, de Bordj El Kiffan, et d'El-Marsa, chacune produisant différentes quantités d'eau potable par jour. D'autres wilayas comme Jijel, Skikda, Mostaganem, Oran, Boumerdès, El Tarf, Tipaza, et Aïn Témouchent possèdent également leurs propres stations de dessalement.[02]

Parmi ces stations, on cite les 11 méga stations avec une capacité qui dépassent 2110000 m³/jour dans le tableau suivant :

Tableau I.2 : Les Méga stations de dessalement en Algérie [02].

Usine/ localisation	Capacité de production (m ³ /jour)	Année
Kahrama – Oran	86,880	2006
Hamma – Algiers	200,000	2008
Skikda	100,000	2009
Benisaf	200,000	2010
Mostaganem	200,000	2011
Souk Tleta – Tlemcen	200,000	2011
Fouka – Algiers	120,000	2011
Cap Djenet – Boumerdes	100,000	2012
Honaine- Tlemcen	200,000	2012
Tenes – Chlef	200,000	2015
Magtaa – Oran	500,000	2016



- 📍 : Station de dessalement en phase d'exploitation
- 📍 : Station de dessalement en phase de construction

Fig. I.6 : Emplacement géographique des grandes stations de dessalement en Algérie[03]

I.8. Dessalement de l’eau de mer :

I.8.1 Définition :

Le dessalement de l'eau, également connu sous le nom de dessalage, est un processus visant à rendre potable l'eau salée ou saumâtre en éliminant le sel par traitement. La déminéralisation implique la séparation des sels dissous dans l'eau et l'élimination des ions en excès responsables de la minéralisation excessive. Ce processus d'élimination peut être réalisé à l'aide de diverses méthodes de traitement. Le choix d'utilisation de chacun d'eux dépend de la disponibilité de la source d'énergie alimentant l'appareil de dessalement [03]. Parmi les principales techniques de dessalement largement reconnues à l'échelle mondiale figurent (voir Figure I.7) :

- **Les méthodes thermiques** reposent sur le principe de l'évaporation suivie de la condensation successive.
- **Les techniques membranaires** exploitent les propriétés de certaines membranes pour retenir les particules dissoutes dans l'eau. [03]

Ces dernières sont de plus en plus mises en œuvre, que ce soit pour des petites, moyennes ou très grandes capacités de production

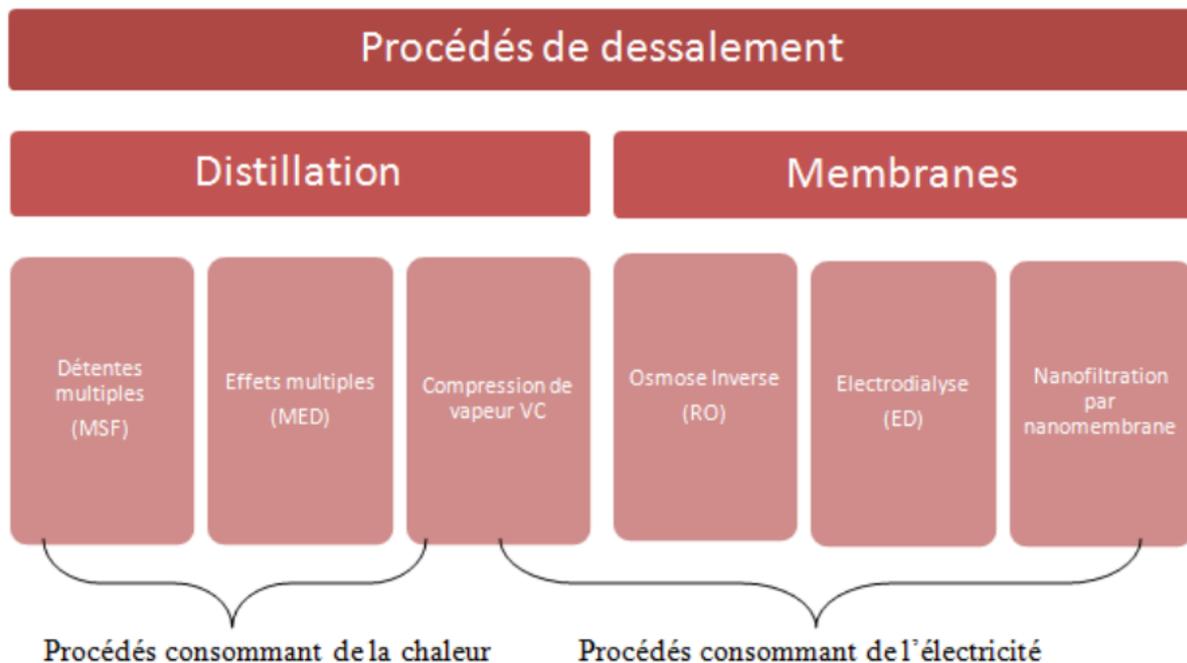


Fig. I.7 : Les divers procédés de dessalement. [03]

I.8.2. Sélection du procédé de dessalement :

Les critères de choix d'un procédé de dessalement peuvent être divisés en deux catégories :

- Facteurs techniques.
- Facteurs économiques.

I.8.2.1. Critères économiques :

- ✓ Coût de l'énergie : dépend de sa source (renouvelable, gaz, fioul) et de sa disponibilité locale.
- ✓ Coût des produits chimiques : varie selon la disponibilité locale et l'importation.
- ✓ Fluctuation des devises : influence les coûts des procédés d'osmose inverse, principalement importés des États-Unis.

I.8.2.2. Critères techniques :

- ✓ Salinité de l'eau à traiter : varie selon les sources, ce qui influence le choix entre distillation et procédés membranaires.
- ✓ Composition chimique de l'eau : importante, notamment pour les eaux saumâtres.
- ✓ Caractéristiques physiques de l'eau : impactent le choix des prétraitements, surtout pour les procédés membranaires.
- ✓ Salinité de l'eau produite : dépend de l'usage final.
- ✓ Capacité requise : varie de petites à grandes installations.
- ✓ Source d'énergie disponible : détermine le choix entre différentes sources énergétiques.
- ✓ Automatisation et contrôle : l'intégration de mesures de contrôle peut affecter les coûts d'investissement des unités.

Peu importe le procédé choisi pour séparer le sel de l'eau, toutes les installations de dessalement suivent généralement quatre étapes principales.

- La captation de l'eau de mer peut se faire soit directement depuis l'océan, soit par le biais de puits côtiers. Ce dernier système permet d'obtenir une eau moins turbide, réduisant ainsi la nécessité de prétraitements supplémentaires.
- Le prétraitement comprend plusieurs étapes :
 - La chloration, qui inhibe la croissance des organismes vivants et prévient l'obstruction des conduites.
 - La filtration, qui protège les pompes et garantit le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
 - L'application d'antitartre, qui prévient la précipitation du carbonate de calcium et son dépôt sur les parois des échangeurs, réduisant ainsi les pertes de chaleur.

- Le processus de dessalement lui-même qui peut suivre deux principes généraux de la chimie : les procédés thermiques (comme la congélation et la distillation) ou les procédés membranaires (comme l'osmose inverse et l'électrodialyse).
- Un post-traitement permet de reminéraliser l'eau en deux étapes pour la rendre potable :
 - Correction de la corrosivité, en ajoutant du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou du CaCO_3 .
 - Désinfection finale, bien que certains procédés retiennent tous les microorganismes, une désinfection supplémentaire est souvent nécessaire à la sortie de l'usine. [03]

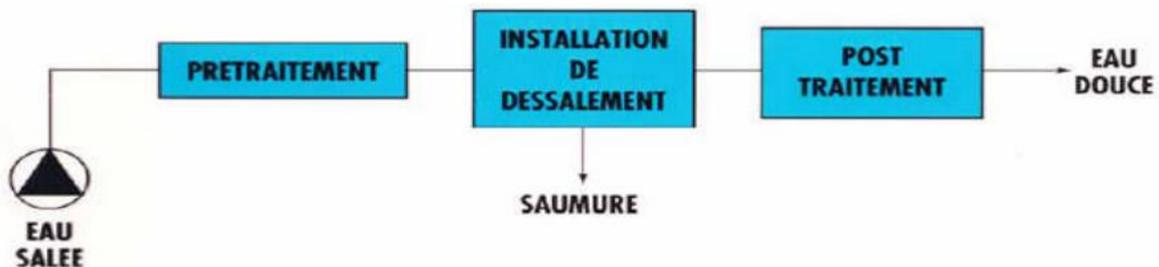


Fig. I.8 : Schéma générale d'une installation de dessalement [03]

I.9. Le procédé membranaire :

Au lieu d'extraire l'eau douce de l'eau de mer par évaporation, les procédés membranaires utilisent des membranes sélectives pour séparer les sels dissous. Cette méthode repose sur l'utilisation de ces membranes qui laissent passer l'eau tout en retenant les sels. L'avantage de ces procédés est qu'ils peuvent être réalisés à température ambiante et ne nécessitent pas de changements de phase, ce qui les rend particulièrement attractifs. Deux technologies utilisant ces membranes, l'électrodialyse et l'osmose inverse, sont actuellement disponibles sur le marché (Maurel, 2006).

I.9.1. Explication de la méthode de l'osmose inverse

L'**osmose** est un phénomène naturel où, si deux solutions aqueuses de concentrations salines différentes sont séparées par une membrane, l'eau se déplace spontanément de la solution moins concentrée vers la plus concentrée.

L'**osmose inverse**, en revanche, fonctionne selon le principe inverse. Elle implique l'application d'une pression élevée sur l'eau salée, supérieure à la pression osmotique, ce qui demande une importante dépense énergétique, afin de forcer l'eau à travers une membrane.

A la fin du processus, seules les molécules d'eau passent à travers la membrane, produisant ainsi de l'eau douce (voir figure I.9).

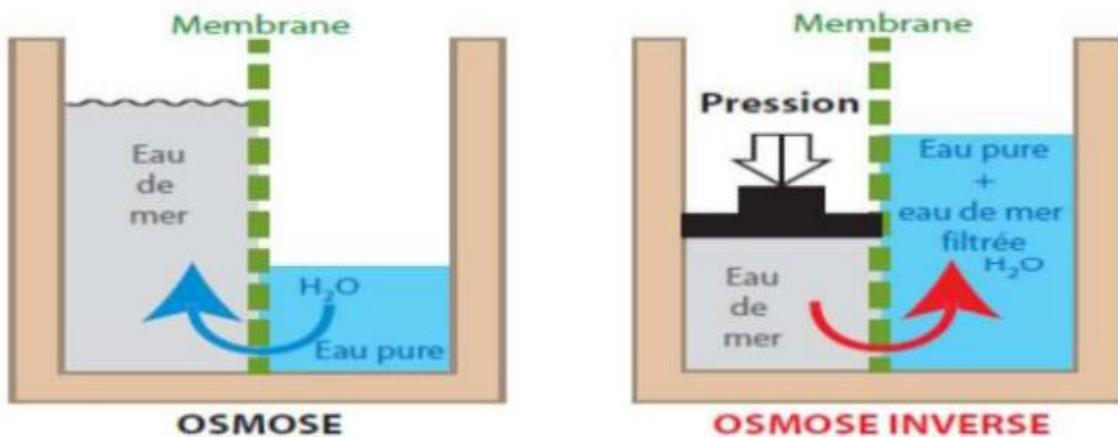


Fig. I.9 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse. [04]

Le flux se déplace de manière continue tangentielle à la membrane, où une partie de la solution à traiter se divise en deux flux de concentrations différentes :

- Le perméat qui traverse la membrane
- Le concentré qui ne la traverse pas, contenant les molécules retenues. (voir Fig. I.10)

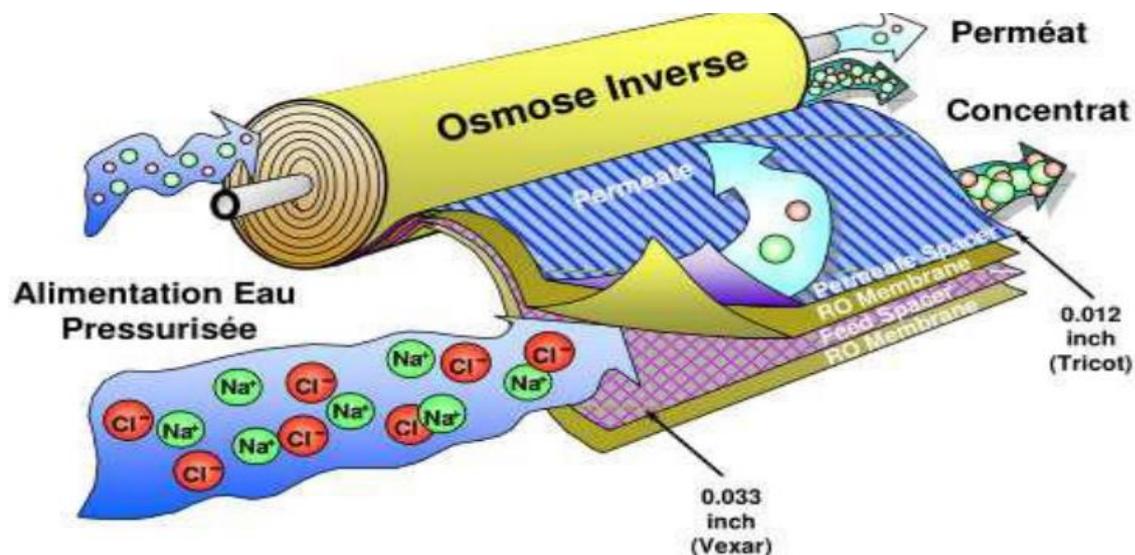


Fig. I.10 : Membrane d'osmose inverse. [04]

L'adoption croissante de l'osmose inverse dans le secteur du dessalement s'explique par :

- L'amélioration des performances des membranes.
- Des technologies de récupération d'énergie.
- Une mise en œuvre simplifiée.
- Une meilleure adaptation aux différentes tailles de projets.
- Une réduction des coûts des équipements et des membranes.

- Sa fiabilité et sa flexibilité en fonction de la demande en eau. [03]

I.9.2. Schéma général d'une installation d'osmose inverse :

Les éléments essentiels d'une installation d'osmose inverse comprennent les composants suivants (voir figure I.11) :

- Le système de prétraitement.
- Le module contenant les membranes.
- La pompe à haute pression.
- Un dispositif de récupération d'énergie.

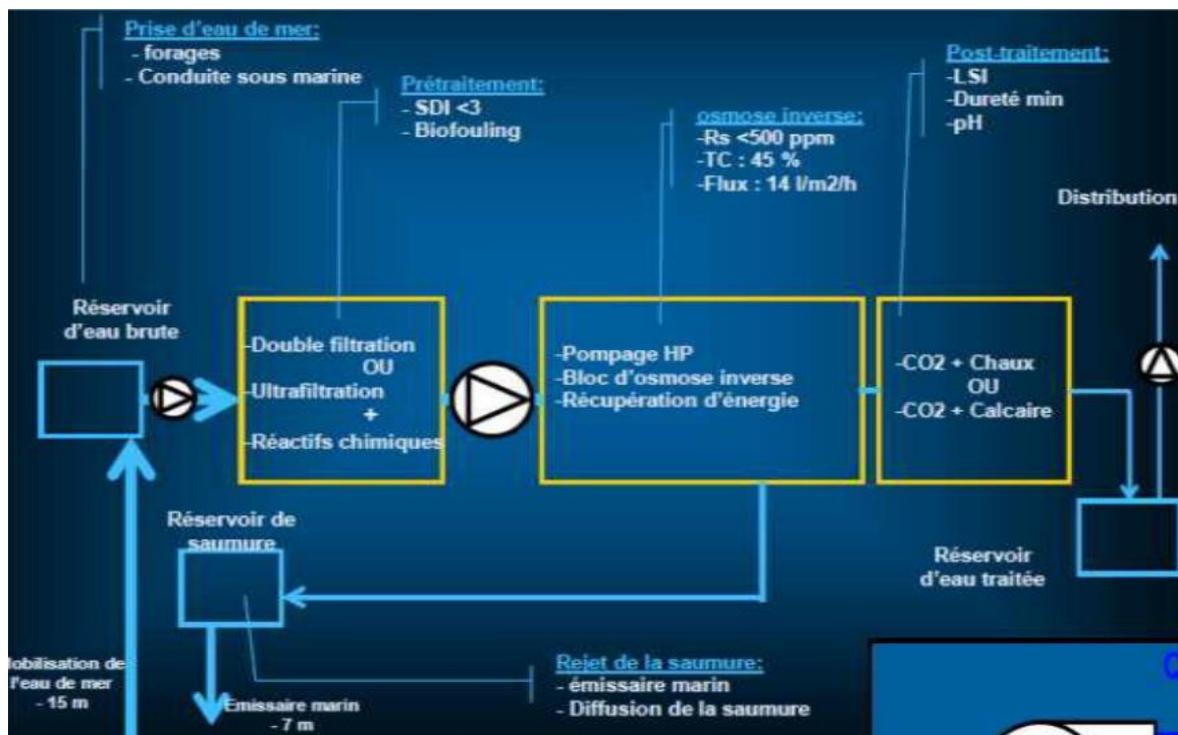


Fig. I.11: Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. [05]

I.10. Les avantages et les inconvénients du dessalement :

I.10.1. Les avantages :

- Fourniture d'une source d'eau potable fiable et continue.
- diminution de la dépendance aux précipitations et aux sources d'eau douce limitées.
- Contribution à la sécurité alimentaire et à la santé publique en assurant un approvisionnement en eau de qualité.

- Promouvoir le développement économique en permettant le développement des zones arides et sous-développées.
- Exploitation d'une source abondante et renouvelable, l'eau de mer, offrant ainsi un approvisionnement quasi illimité en eau douce.
- Le dessalement, par rapport à d'autres installations industrielles comme les centrales nucléaires ou les barrages hydrauliques, a un impact environnemental moindre, préservant les écosystèmes.
- Les procédés de dessalement génèrent des rejets limités, réduisant ainsi leur impact sur les écosystèmes marins et côtiers.

I.10.2. Les inconvénients :

Les raisons pour lesquelles les systèmes de dessalement ne sont pas largement utilisés partout incluent :

- Les coûts élevés des usines de dessalement, qui posent des défis aux pays pauvres ou émergents ;
- Les problèmes environnementaux causés par les rejets de gaz, d'eau chaude (dans le cas de la distillation), de saumures concentrées injectées dans le sol, et la salinité ;
- L'usage de chlore pour le nettoyage des membranes dans les systèmes d'osmose inverse, ce qui peut rendre l'eau légèrement chimique ;
- L'absence de législation spécifique concernant la potabilité de l'eau ;
- Les risques de traces de métaux lourds échappés des installations ;
- Le bruit généré par les pompes hautes pression et certains systèmes de récupération d'énergie comme les turbines ;
- Les perturbations potentielles sur le fond marin et les routes maritimes dues aux prises d'eau.
- Les exigences énergétiques élevées associées au dessalement, ce qui peut être prohibitif dans les régions où l'énergie est coûteuse ou peu disponible ;
- Les défis liés à la gestion des saumures produites par les processus de dessalement, qui peuvent avoir un impact sur les écosystèmes marins ;
- Les préoccupations concernant la durabilité à long terme des opérations de dessalement, notamment en ce qui concerne l'utilisation des ressources en eau et en énergie ;

- Les préoccupations liées à l'acceptabilité sociale et à la perception publique du dessalement, y compris les craintes concernant les effets sur la santé humaine et environnementale

I.11. Impacts sur l’environnement :

Un tableau détaillant les impacts environnementaux négatifs des processus de dessalement est fourni dans le tableau I.3.

Selon ce tableau, les impacts les plus significatifs sont attribuables aux produits chimiques favorisant l'eutrophisation des eaux réceptrices, ainsi qu'aux désinfectants.

Tableau I. 3 : Grille d’impacts néfastes sur l’environnement associés aux procédés de dessalement. [06]

Impact	Degré d’impact	Origine de l’impact	Technique d’atténuation
La pollution thermique entraîne une diminution de l'oxygène dissous dans les eaux réceptrices, avec des effets néfastes sur les espèces thermorésistantes.	M	-Saumure chaude.	- mélanger la saumure avec de l'eau froide avant son rejet, ou à utiliser des bassins de retenue.
Une augmentation de la salinité peut entraîner des conséquences néfastes sur les espèces adaptées aux faibles teneurs en sel.	M	-Saumure concentrée.	- la dilution de la saumure avant le rejet et la récupération des sels. - choisir judicieusement l'emplacement de l'émissaire pour favoriser un maximum de brassage et de dispersion.
la formation de sous-produits chimiques toxiques, la pollution de l'eau et un risque pour la	E	-Chlore et ses Composés. -Réaction du chlore avec des composés	-Utilisation d’autres désinfectants. - Mesures de protection contre les polluants au

biodiversité des écosystèmes aquatiques.		organiques – hydrocarbures principalement.'	prélèvement de l'usine.
La présence de métaux lourds peut poser des risques de toxicité pour l'environnement.	M	- Corrosion du matériel de l'usine.	-Conception et choix judicieux du matériel de l'usine en recourant à des matériaux résistants à la corrosion.
Les produits chimiques peuvent contribuer à : - l'eutrophisation des eaux réceptrices, - à leur toxicité et - à une augmentation du pH.	E F F	- Adjonction d'agents Anticorrosion et Antitartre.	-Réduction au minimum de l'utilisation de produits chimiques. -Utilisation d'additifs sans danger pour l'environnement.
La pollution atmosphérique peut entraîner : - Une acidification accrue, - Renforcer l'effet de serre - Augmenter la concentration de poussières.	F M M	-Utilisation de combustibles et activités d'élimination.	-Utilisation d'énergies propres et renouvelables autant que possible. -Application de systèmes mixtes et de production couplée. -Purification des gaz avant émission dans l'atmosphère.
La présence de sédiments peut entraîner une augmentation de la turbidité de l'eau, limitant ainsi la photosynthèse, et causer des difficultés respiratoires chez les animaux aquatiques.	M	-Perturbation des sables par des activités d'excavation et de dragage.	-Réduction au minimum et contrôle des activités d'excavation et remblayage. -Bonne maîtrise du ruissellement dans la zone du site.
La production de bruit		-Activités de	-Limitation des activités

dans les installations de dessalement	F	Construction. -Pompes et autres appareils au cours de l'exploitation de l'usine.	de construction aux seuls horaires de travail. -Choix du matériel le moins bruyant.
E : Elevé / M : Moyen / F : Faible			

I.12. Effets de la saumure concentrée :

Il est connu que la saumure a un impact majeur sur le milieu marin. L'ampleur des dommages qu'elle peut causer dépend en grande partie du volume total de saumure libéré. Un rejet de saumure concentrée en grandes quantités nécessite une attention particulière quant aux impacts potentiels sur l'environnement, par opposition à un rejet en plus petites quantités. Les organismes marins, lorsqu'ils sont exposés à une variation de la salinité, peuvent subir un choc osmotique, dont la gravité dépend de leur tolérance à la salinité.

Le concentrât renferme également des résidus des produits chimiques utilisés lors des prétraitements. Ces résidus entraînent une acidification de l'eau, avec un pH se situant entre 6 et 6,5, ce qui peut avoir des effets négatifs sur la matière biologique, notamment les coraux. De plus, l'emploi de méta bisulfite de sodium pour la déchloration de l'eau d'alimentation ou comme agent biocide a un impact notable sur le phytoplancton

La température de l'effluent joue aussi un rôle important, car elle influence les propriétés physiques de l'eau de mer et peut en altérer la qualité. L'augmentation de la salinité perturbe les organismes marins par osmose, un processus où l'eau pure traverse une membrane perméable à l'eau mais non aux ions.

Les rejets de saumure ont donc de nombreux effets sur le milieu marin :

- **Anoxie des fonds marins :**

Dans certaines conditions, la colonne d'eau se divise en deux couches distinctes : une couche supérieure d'eau de mer et une couche inférieure de saumure. Lorsque le milieu récepteur est calme et que le renouvellement des algues est faible, la présence d'espèces benthiques consommatrices d'oxygène peut provoquer des périodes d'anoxie (absence d'oxygène) au niveau des fonds marins. [07]

- **Réduction de la lumière :**

Un fluide hyper salin modifie le coefficient de réflexion de la lumière, créant un brouillard qui limite la pénétration lumineuse. Cette diminution de la lumière affecte la photosynthèse des espèces végétales marines, compromettant ainsi leur survie.

- **Impact sur les espèces marines :**

Des réductions significatives ont été observées dans les populations d'échinodermes, des bio-indicateurs sensibles, près des zones de rejet. Cela montre que ces espèces sont particulièrement affectées par les changements environnementaux causés par l'hyper salinité. [07]

- **Effets sur les phanérogames marines :**

La mer Méditerranée est une région où de nombreuses études ont été menées sur ce sujet. Les résultats montrent des effets négatifs sur les phanérogames marines, en particulier sur la Posidonie de méditerranée "Posidonia oceanica". On a constaté une augmentation de la mortalité, l'apparition de nécrose sur les tissus, et une chute accrue des feuilles chez ces plantes marines essentielles. [08]

Fig. I.12 : Etat naturel (initial) du milieu (absence de rejet de saumure). [09]

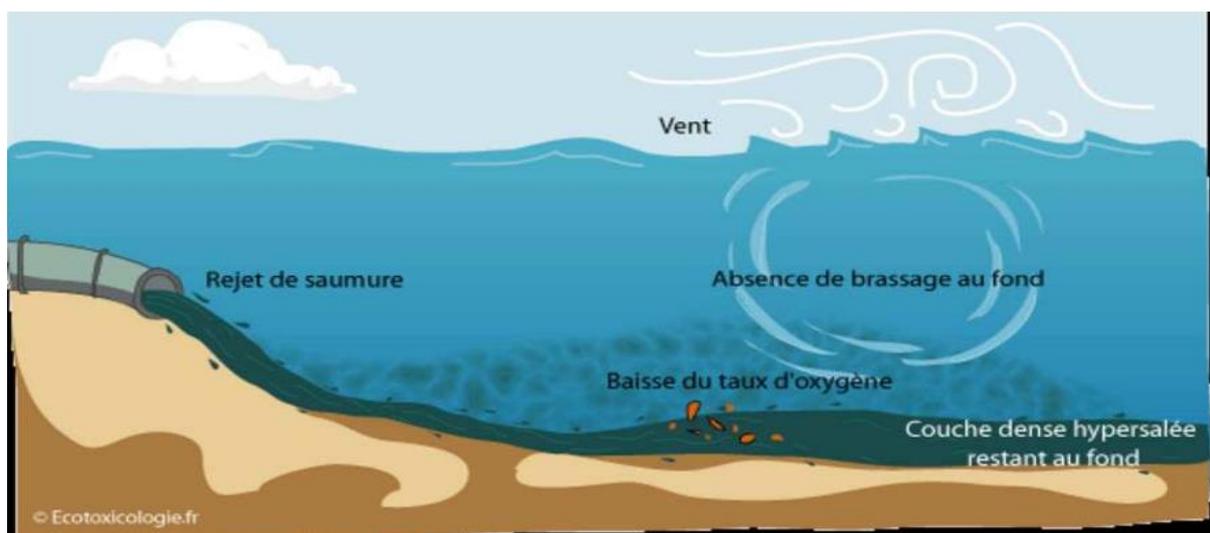
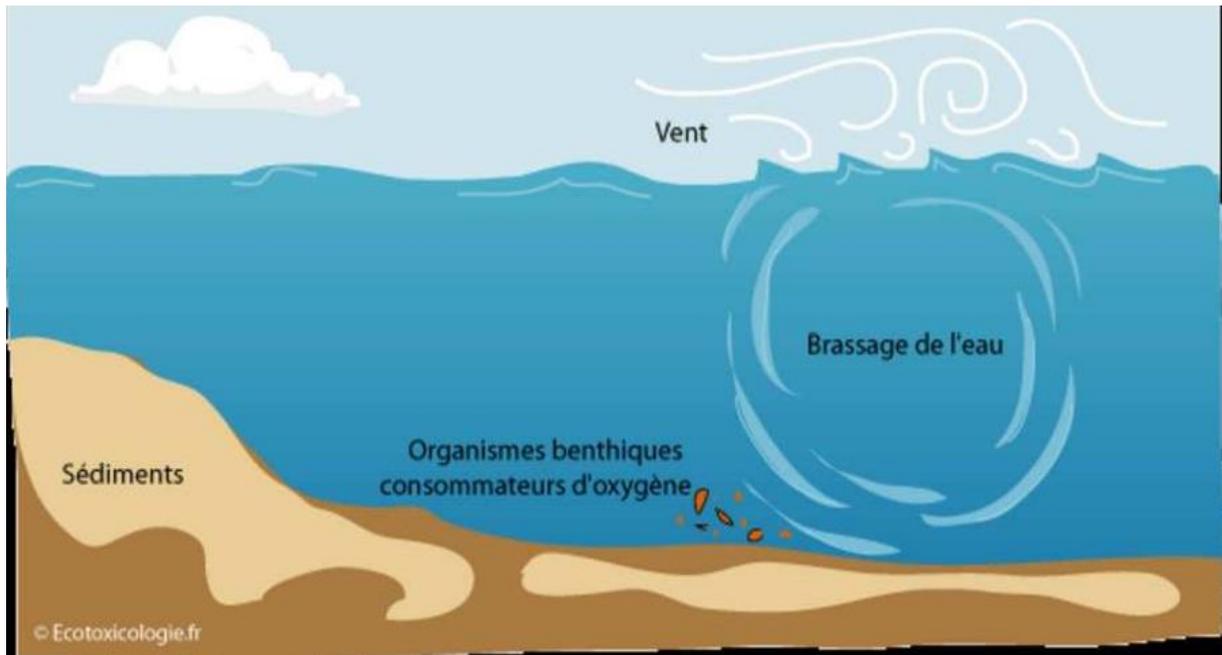


Fig. I.13 : Etat du milieu après l'installation de la station de dessalement (après rejet de saumure) [09]



Conclusion :

Face à la demande croissante en eau, stimulée par l'expansion démographique et les besoins croissants de la nature en eau douce, les ressources en eau sur terre sont devenues limitées. Pour répondre à ce défi, le dessalement de l'eau de mer émerge comme une solution essentielle. Cette technologie, utilisée depuis longtemps, est déployée à grande échelle à travers le monde, notamment dans les régions méditerranéennes et au Moyen-Orient.

Dans les prochains chapitres, nous explorerons la station de dessalement d'el TARF, où mon stage a été effectué, ainsi que les différentes technologies utilisées dans ce domaine.

CHAPITRE II :

Présentation de la zone d'étude

Introduction :

Le processus de dessalement de l'eau de mer vise à produire de l'eau potable à partir d'une source abondante et renouvelable, à savoir la mer. Ce projet implique la conception et l'exploitation d'une usine de dessalement par osmose inverse d'une capacité 300 000 m³ de d'eau par jour qui répond à plusieurs objectifs généraux :

- Durabilité technique de 25 ans.
- Fiabilité des installations.
- Sécurité du personnel et des équipements.
- Equipement, matériaux et procédés surs et testés.
- Facilité de l'exploitation et de la maintenance des installations.
- Protection de l'environnement

II.2. Emplacement du site :

Le projet de cette station de dessalement, d'une capacité de 300 000 m³ par jour, est situé à Koudiet Eddraouech, dans la commune de Berrihane, wilaya d'El Tarf. Le terrain s'étend sur 11 hectares et il est bordé :

- Au nord : la mer
- Au sud : la route nationale RN24
- À l'est : le domaine marin
- À l'ouest : la centrale électrique de Koudiet Eddraouech

L'accès au site se fait par la route nationale RN84A.

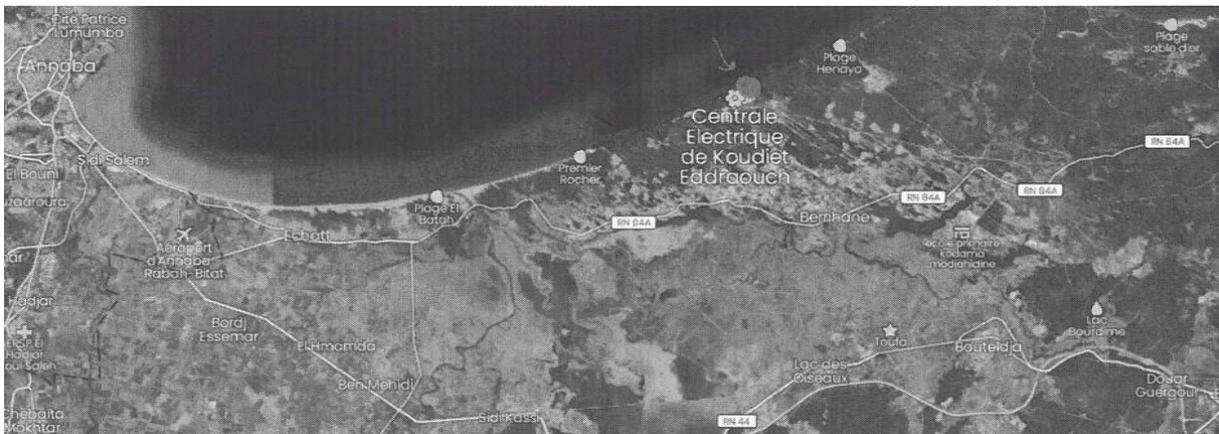


Figure II.1 : Photo satellitaire du site de l'usine d'EL TARF

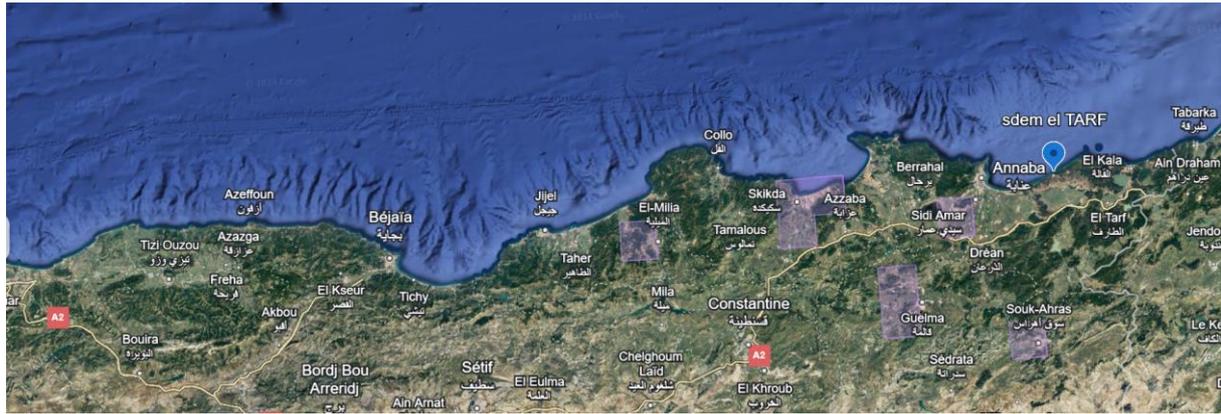


Figure II.2 : La situation géographique de l'usine d'EL TARG

II.3. Données de base du projet :

Cette usine est conçue pour fonctionner sur l'eau de mer avec un TDS d'Alimentation d'environ 37 g/l avec une capacité du permeat de 300 000 m³/ j avec 10% de production en réserve.

II.3.1. Condition de référence :

La qualité de l'eau de mer à considérer dans le dimensionnement du procédé de dessalement par l'osmose inverse se présente comme suit :

Tableau II.1 : Qualité de l'eau de mer [19]

Paramètre	Unités	Min	Moyenne	Max design
pH	-	7,9	8,2	8,3
Température	°C	12	20	28
Turbidité	NTU	1	2	5
TSS	mg/l	1	3	15
Huile et graisse	mg/l	-	-	0,1
TDS	mg/l	36000	37000	40000
COT	mg/l	1,05	1,9	3
Bore	mg/l	4,80	5,48	6,67
Chlorure	mg/l	20200	20360	21500
Sulfate	mg/l	2820	2840	2950
Calcium	mg/l	410	430	450
Magnésium	mg/l	1130	1370	1500
Sodium	mg/l	11230	11330	11800

Potassium	mg/l	400	410	430
baryum	mg/l	0,004	0,006	0,007
strontium	mg/l	1,15	1,24	1,4
Bicarbonates	mg/l	104	130	140
Carbonates	mg/l	10	13	15
Silice	mg/l	0,06	0,08	0,11
Nitrates	mg/l	0,001	0,002	0,004
Fluor	mg/l	0,5	1,00	1,3

II.3.2. Condition de référence du site :

Le design devra tenir compte des conditions minimales et maximales définies dans le tableau ci-dessous.

Tableau.II.2 : qualité de l'eau de mer (suite). [19]

Paramètre des conditions de références	unités	min	max	Condition de référence
Température	°C	12	28	20
Salinité	Mg/l	36000	40000	37000
Matière en suspension	Mg/l	1	15	3
Bore	Mg/l	4,8	6,67	5,48
Hydrocarbure	Mg/l	-	0,1	-

II.4. Description du procès :

Cette station de dessalement d'EL Tarf est conçue pour produire une eau commercialisable conformément aux normes et exigences en vigueur. A cet effet, la station comporte les étapes principales suivantes :

II.4.1. Captage d'eau de mer :

Le captage doit satisfaire cinq objectifs essentiels :

- Assurer la quantité nécessaire d'eau de mer.
- Maintenir une qualité optimale de l'eau.
- Minimiser les variations de la qualité physico-chimique et biologique.
- Réduire les coûts au maximum.
- Limiter au mieux les impacts physiques et environnementaux.

Ces objectifs sont déterminants pour le bon fonctionnement à long terme de l'usine.

Le système de captage de l'eau de mer sera composé de :

✓ **Tours de captage :**

Les tours de captage de l'eau de mer sont conçues d'une manière adéquate pour assurer une alimentation en eau continue avec une redondance de 100%, localisée sur une profondeur permettant d'assurer une bonne qualité de l'eau de mer à traiter en réduisant le passage des sédiments ou des biotes marins et un rendement optimum de l'usine .

Ainsi, le point de captage a été sélectionné après une série d'études visant à garantir une qualité d'eau optimale tout au long de l'année, évitant ainsi les problèmes associés au prélèvement d'eau douce et trouble des estuaires ainsi qu'aux périodes de crues.

Le captage comporte généralement deux tours, construites en béton armé.

Elle est généralement conçue de la manière illustrée ci-dessous (voir figure II.3)

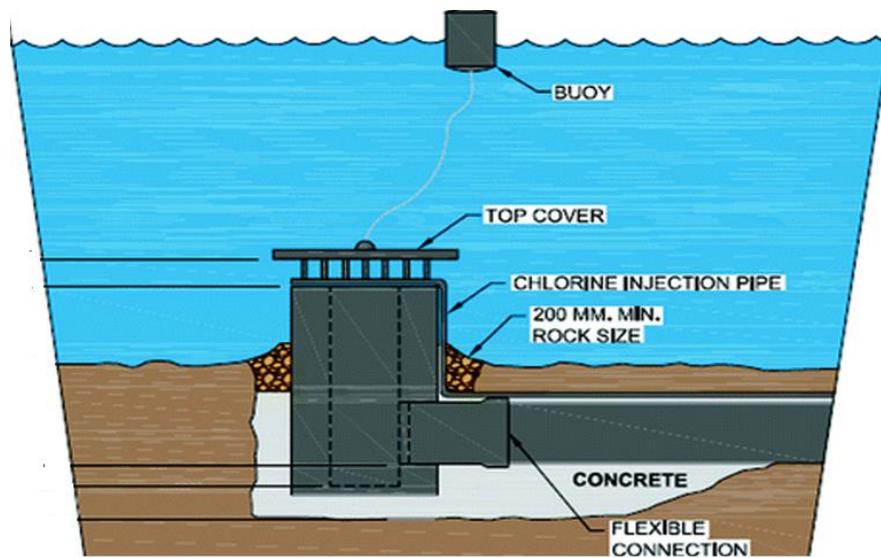


Fig.II.3 :
captage de

mer.

Tour de
l'eau de

✓ **Conduite d'amenées :**

L'eau de mer sera acheminée vers l'ouvrage de réception à travers deux conduites d'amenée (une conduite pour chaque tour de captage) qui garantira une redondance de 100% pour chacun pour assurer un débit et une réduction d'énergie approprié, la vitesse dans chaque conduite sera

comprise entre 1 et 2 m/s pour limiter la formation des dépôts et réduire l'incrustation des moules.

Ces conduites d'amenées sont fabriquées en PEHD (polyéthylène haute densité) et peuvent être équipées d'un système d'extraction d'air si nécessaire.

✓ **Système de nettoyage « pigging system » :**

Le nettoyage de la conduite d'amenée sera assuré par un système mécanique (pigging system), donc l'usine doit être équipée par ce système avec toutes ses auxiliaires.

Le principe de fonctionnement de ce système de nettoyage des pipelines, ou "pigging system", repose sur l'utilisation d'un dispositif appelé « pig » pour nettoyer, inspecter et entretenir les pipelines.

Voici les étapes principales de ce processus :

- 1. Insertion du Pig :** Un pig est inséré dans le pipeline via un dispositif appelé « lanceur de pig » (pig launcher). Ce lanceur est un compartiment spécialement conçu qui permet d'introduire le pig sans interrompre le flux de fluide dans le pipeline.
- 2. Propulsion du Pig :** Une fois inséré, le pig est propulsé à travers le pipeline par la pression du fluide transporté (que ce soit un liquide ou un gaz). La force du flux de fluide pousse le pig le long du pipeline.
- 3. Nettoyage et Inspection :** Pendant son trajet, le pig nettoie l'intérieur du pipeline en enlevant les débris, les sédiments et autres accumulations des parois. Certains pigs sont également équipés de capteurs et d'instruments pour inspecter l'intégrité du pipeline, détectant ainsi les anomalies telles que la corrosion, les fissures ou les obstructions.
- 4. Récupération du Pig :** À la fin de son parcours, le pig est récupéré dans un dispositif appelé « récepteur de pig » (pig receiver). Ce récepteur est conçu pour capturer et retirer le pig en toute sécurité du pipeline sans interrompre le flux de fluide.
- 5. Analyse et Maintenance :** Les données recueillies par les pigs inspecteurs sont analysées pour évaluer l'état du pipeline et planifier les interventions de maintenance nécessaires. Le nettoyage régulier par pigging permet de maintenir un débit optimal et de prolonger la durée de vie du pipeline en réduisant les risques de corrosion et d'obstructions.

✓ **Ouvrage de réception (Bassin de captage):**

L'ouvrage de réception est constitué d'un bassin de captage d'eau de mer équipé d'un système de filtration grossière (dégrilleurs) et un système de filtration fine (Tamis rotatifs) pour protéger les installations en aval et ils servent aussi également à prévenir l'aspiration et la détérioration des poissons ainsi que d'autres organismes marins à l'entrée du système de pompage, donc ils jouent un rôle crucial en protégeant les pompes à eau de mer contre ces grosses particules. Par la suite ; elle sera pompée grâce à une station de pompage vers la phase de prétraitement constitués de cinq pompes et une en standby.

Généralement, la grille grossière en acier inoxydable super duplex SDSS a un diamètre de 50 mm et fonctionne automatiquement, accompagnée d'un tamis rotatif en acier SDSS de 3 mm de diamètre, également à fonctionnement automatique, et chacun de ces dispositifs sera équipé d'un système de nettoyage approprié

II.4.2. Phase de prétraitement :

C'est la seconde phase du processus de dessalement, dont l'objectif est de retirer les solides en suspension, les matières organiques et les micro-organismes. Elle est également essentielle pour prévenir l'usure des pompes, l'incrustation, l'encrassement, ainsi que la détérioration des membranes d'osmose inverse causée par les micro-organismes.

Le prétraitement sera composé généralement de :

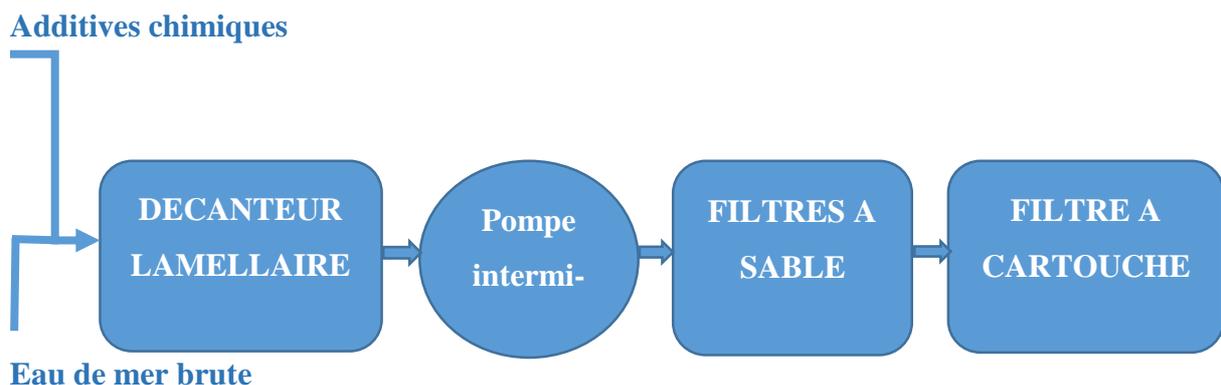


Fig.II.4. schéma explicatif simplifié de la chaîne du prétraitement.

✓ **Coagulation :**

L'eau brute (après filtrage fin et dosage de l'hypochlorite de sodium NaClO) sera dosé avec de l'acide sulfurique H_2SO_4 (si nécessaire) ; et de coagulant (chlorure ferrique FeCl_3) dans un

mélangeur statique. Ensuite, l'eau sera distribuée aux réservoirs de floculation en amont (avant) des décanteurs lamellaires ou passera aux filtres à sable en cas de by pass des décanteurs.

Pour le dosage du coagulant, on l'introduit généralement dans des réservoirs verticaux en PRFV (plastique renforcé de fibres de verre). Ils seront également équipés de deux pompes doseuses à débit variable (de type pompes à membrane qui sont les plus utilisés), fonctionnant de manière automatique (une en service et une en standby), ainsi que de deux pompes de transvasement automatiques (une en service et une en veille) pour transférer les liquides entre les réservoirs de manière sécurisée, efficace et contrôlée, réduisant ainsi les efforts manuels et minimisant les risques de déversements ou de contamination..

- **Floculation :**

Après le dosage et le mélange de coagulant, l'eau entre dans les chambres de floculation à travers un compartiment dédié dans lequel le polymère sera dosé.

L'objectif du mélangeur dynamique est d'assurer un mélange lent du polymère dans le réservoir de floculation.

Ce floculant est généralement dosé en l'introduisant dans des réservoirs verticaux en PRFV, équipés de leurs accessoires, notamment une colonne d'étalonnage, un système de mesure, un dispositif d'ajout de poudre sèche, et deux pompes doseuses automatiques.

- **Décanteur lamellaire :**

Le système de décantation lamellaire est conçu pour éliminer une grande partie des matières en suspension afin de transférer l'eau vers les filtres à sable. En raison de sa faible consommation d'énergie, ce système peut être maintenu en fonctionnement continu, bien qu'il soit contourné en cas de faible concentration de matière en suspension à l'entrée. Ce système de décantation sera équipé d'un batardeau approprié connectée au canal de dérivation.

L'eau de mer brute sera déversée dans un canal de distribution que se connectera aux différents décanteurs.

Ces derniers sont fabriqués à base de béton armée et sont équipés par des pompes d'extractions de boues.

- **Filtres à sable :**

La filtration sur sable représente une méthode simple et économique pour éliminer la majeure partie des matières en suspension (MES) dont la taille excède 186 microns dans l'eau de mer brute.

Les matériaux les plus couramment utilisés ont une certaine taille moyenne. L'antracite est de 0,8 à 1,2 mm, le sable de 0,5 à 0,8 mm. Dans ces filtres, le flux d'eau est toujours vertical, avec une entrée par la partie supérieure du filtre et une sortie par la partie inférieure après avoir traversé les couches filtrantes qui retiennent les solides et les algues en suspension. Au bas du filtre, un collecteur muni de buses laisse passer l'eau filtrée, qui est ensuite acheminée vers un réservoir situé à un niveau inférieur et cela nécessite un équipement de pompage supplémentaire tel qu'une pompe de transfert ou un système de surpression pour dépressuriser l'eau et l'acheminer vers les filtres à cartouche.

Les filtres conçus pour filtrer l'eau de mer afin d'annuler les membranes d'osmose inverse avec une eau de mer de bonne qualité et de composition conforme aux conditions requises. Sans interruption pendant les opérations de lavage à contre-courant.

Un système de filtre à sable pressurisé contient généralement deux lignes, chaque ligne contient plusieurs filtres à sable.

Ces filtres se colmatent en fonction de divers paramètres :

- ✓ La concentration de particules dans l'eau.
- ✓ La vitesse de filtration, c'est-à-dire le débit d'eau par mètre carré de surface filtrante.
- ✓ La taille des grains de sable dans le filtre.
- ✓ La qualité de l'eau entrante.

Lors du processus de nettoyage des filtres, l'air et l'eau sont fournis par le bas, à mesure que l'eau monte, les substances obstruant le filtre sont évacuées par le haut. Ce processus est effectué en utilisant la saumure issue du processus pour les raisons suivantes :

- ✓ La saumure, étant un sous-produit, est réutilisée de manière efficace.
- ✓ Ce type de lavage réduit les besoins en eau filtrée, ce qui entraîne une économie d'énergie en diminuant le pompage d'eau de mer.
- ✓ De plus, le lavage à la saumure provoque un choc osmotique, ce qui aide à contrôler la croissance bactérienne.

Pour effectuer cette tâche, un équipement spécialisé est requis, comprenant des pompes et des compresseurs d'air d'une capacité adaptée à la taille du filtre.

- **Station de pompage intermédiaire :**

Le système de pompage est constitué des équipements adéquats au pompage et une en standby.

- **Filtres à cartouches :**

Les filtres à cartouche sont des éléments de sécurité obligatoire placés devant le module RO, ils protègent les pompes HP (haute pression) ainsi, que les membranes contre le colmatage ou l'obstruction des canaux hydrauliques. Ce type de filtre se compose d'une coque sous pression en position verticale contenant plusieurs cartouches filtrantes en polypropylène conçues pour retenir les contaminants. Il existe une large gamme de filtres à cartouche avec différentes tailles, matériaux et seuils de filtre.

Des points de prélèvement d'échantillons d'eau sont placés avant et après les filtres à cartouche pour mesurer le SDI (Silt Density Index). Ces prélèvements permettent d'évaluer l'efficacité de la filtration et de vérifier la qualité de l'eau avant qu'elle ne passe à travers les membranes.

L'eau filtrée est collectée dans un réservoir fermé. À partir de ce réservoir, une partie de l'eau est utilisée pour alimenter les unités d'osmose inverse, tandis qu'une autre portion sert au rinçage et au nettoyage des filtres à sable.

II.4.3. Phase d'osmose inverse :

Le dessalement de l'eau de mer est réalisé en la faisant passer à travers un système d'osmose inverse, une étape essentielle qui permet de séparer les sels de l'eau.

La figure II.5 illustre un schéma simplifié du processus d'osmose inverse et offre une vue d'ensemble de cette zone.

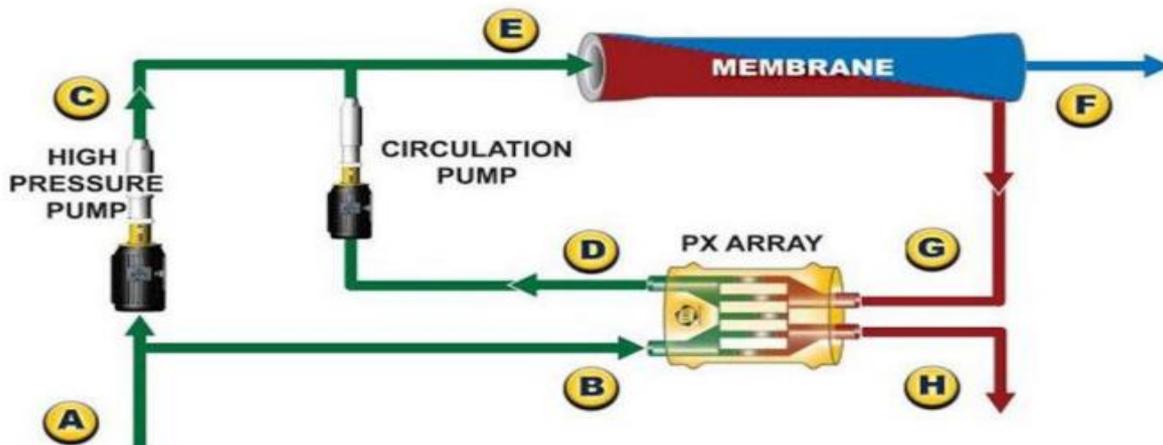


Fig.II.5 : Système d'osmose inverse avec un échangeur d'énergie et pompe Booster.

Le système d'osmose inverse a une capacité de 300000 m³ /j avec un surplus de 10% pour chaque unité.

Cette unité se comporte de :

- **Pompes à hautes pressions :**

La pompe haute pression, qui alimente les membranes, est au cœur du système d'osmose inverse. Elle joue un rôle important car son rendement a un impact direct sur la consommation d'énergie. Il est donc essentiel de choisir avec soin cette pompe, en ayant une connaissance approfondie des équipements disponibles sur le marché, de leur principe de fonctionnement, de leur conception, des gammes de débit et de pression, des rendements, ainsi que des matériaux et des dimensions.

Les pompes HP sont dimensionnées de façon à pouvoir fournir une pression environ 67 bars requises par les membranes à 15 °C et pour une salinité de 37 000mg/l. [09]

- **Pompe booster :**

La pompe booster est utilisée pour compenser les pertes de pression survenant au niveau de l'échangeur de pression.

- **Tube à pression comportant les membranes :**

La membrane divise le débit d'eau en deux parties. L'eau de perméat sans sel est utilisée pour l'approvisionnement en eau potable, tandis que la saumure hyper saline sera dirigée vers le récupérateur d'énergie (ERI) avant d'être rejetée dans la mer.

- **Dispositifs de récupération d'énergie :**

Les échangeurs d'énergie (ERI) sont des dispositifs qui transmettent la haute pression directement de la saumure résiduaire à l'eau de mer sans la convertir au préalable en énergie mécanique rotative. Par conséquent, pratiquement toute l'énergie du flux de saumure peut être utilisée, réduisant ainsi la consommation d'énergie du processus.

Le dispositif ERI utilise le principe du déplacement positif et des chambres isobares pour obtenir un transfert d'énergie extrêmement efficace.

Un schéma des composants en céramique du dispositif de récupération d'énergie PX est présenté à la (Fig. II.6). L'eau de mer, fournie par la pompe d'alimentation, circule à basse pression dans un conduit de retour sur le côté gauche, où elle expulse la saumure présente sur le côté droit. Lorsque le rotor tourne après une zone scellée, la saumure à haute pression passe dans le conduit droit, comprimant ainsi l'eau de mer. Cette dernière, désormais sous haute pression, est ensuite dirigée vers la pompe de surpression.[11]

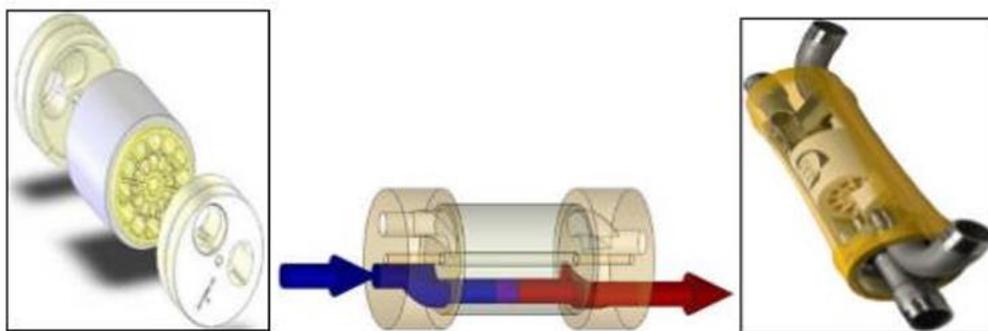


Fig.

II.6. Echangeur de pression de type ERI. [W5]

- **Système de dosage antitartre.**
- **Système de dé-chloration :**

Il s'agit un réservoir de dosage et de préparation du mélange en position vertical avec ses accessoires qui sont :

- ✓ Une colonne d'étalonnage.

- ✓ Un système de mesure du potentiel redox.
- ✓ Un système de calibrage de la pompe doseuse.
- ✓ Un compteur de niveau.
- ✓ Deux (02) doseuses à membrane avec fonctionnement automatique à un débit variable (une en service et une en standby)
- **Un système de nettoyage CIP et de rinçage des membranes en cas de colmatage :**

L'eau de mer circule le long de la membrane, générant un gradient de concentration horizontal sur sa longueur. Le nettoyage des membranes devient nécessaire lorsque l'une des conditions suivantes est observée :

- Le débit normalisé du perméat a diminué de 10 %.
- Les sels dissous totaux normalisés du perméat ont augmenté de 10 %.
- La perte de charge entre le circuit d'alimentation et le concentrât a augmenté de 15 % par rapport à la perte de charge initiale.[10]

II.4.4. Phase post traitement :

L'eau produite par les unités d'osmose inverse (permeat), appauvrie en minéraux et donc non consommable, sera dirigée vers l'étape de reminéralisation, composée de :

- ✓ **Système de dosage de carbonate de calcium CaCO_3 :**

Après la sortie des racks d'osmose inverse, le flux est divisé. La première partie est introduite dans les cellules de la calcite CaCO_3 , tandis que l'autre partie du flux est introduite dans le réservoir de mélange pour être mélangé ultérieurement avec l'eau reminéralisé.

- ✓ **Réservoir de mélange :**

Le réservoir est conçu pour assurer le mélange des deux flux avec un débit total de 300000 m^3/j

- ✓ **Système de stockage et dosage de CO_2 :**

Les citernes mères de CO_2 seront équipées de tous les équipements et instruments nécessaires au contrôle du dosage du dioxyde de carbone. Les réservoirs seront dimensionnés en fonction de la qualité nécessaire de CO_2 et le matériau sera adapté au stockage du dioxyde de carbone et résistant au milieu marin.

Les pompes doseuses seront en matériau résistant au gaz carbonique et au milieu marin. L'opération sera automatique avec un débit variable et il sera installé un système de surveillance

et de contrôle permanent du dosage. Toute la tuyauterie sera faite d'un matériau approprié résistant au gaz et à l'environnement marin.

II.4.5. Phase de livraison :**✓ Réservoir de l'eau potable :**

L'eau potable produite sera stockée dans un réservoir en béton armé de forme rectangulaire. Le réservoir prévu est divisé en deux compartiments qui peuvent être isolés l'un de l'autre dont le but est de réaliser des éventuels travaux de maintenance du réservoir tout en assurant la production garantie de l'usine.

✓ Pompe de livraison :

Un système de pompage d'eau produite commercialisable est fourni pour pomper l'eau vers le réseau de distribution.

✓ Système de chloration :

La désinfection est la dernière étape du traitement de l'eau, dont un système de dosage d'hypochlorite sera prévu permettant d'atteindre les valeurs de la norme et les exigences en vigueur.

Ce système est composé de plusieurs pompes doseuses de type à membrane.

✓ Débitmètre commercial :

Un débitmètre fiscal homologué par l'ONML sera installé en aval de la station pour quantifier l'eau produite pompée vers le réseau de distribution.

II.4.6. Service auxiliaire:

Les services auxiliaires nécessaires pour soutenir correctement l'usine de dessalement sont :

II.4.6.1. Système de traitement des effluents et rejets liquides :

Un système de traitement des effluents et rejets liquides sera prévu afin de diminuer la charge polluante au niveau de ces derniers. Il est composé essentiellement de :

- Un procédé de clarification
- Un procédé de centrifugation
- Un système de pompage vers le bassin de neutralisation.
- Toute l'instrumentation, les équipements, la tuyauterie et la robinetterie nécessaire.

Ce système sera dimensionné en fonction du volume et nature des rejets liquides et solides générés par l'usine notamment :

- Les boues générées par le système de prétraitement.
- Les boues de lavage chimique des membranes.
- Les eaux de lavages contre-courant des filtres à sable.

II.4.6.2. Système anti-incendie :

En vue de minimiser le risque de propagation de feux au niveau des endroits sensibles, un réseau anti-incendie en boucle fermée et maillé sera prévu avec des vannes de sectionnement installées de façon à pouvoir isoler toute section affectée par une rupture ou travaux de maintenance.

Le réseau anti-incendie sera aérien posé sur un massifs en béton, et sera enterré aux endroits de passages de véhicules ou à tous points où il risque d'être endommagé. La répartition de l'eau à savoir les hydrants et les robinets d'incendie armés, est en fonction du degré du risque ainsi que la surface à couvrir.

Outre, des dispositifs extincteurs de type et volume adéquat seront prévus pour renforcer le système de lutte anti-incendie.

En raison de la taille relative de l'usine, tous les réseaux de distribution de l'eau auraient des diamètres qui peuvent desservir correctement l'ensemble du système anti-incendie.

Le système sera comprendre au minimum les installations suivantes :

- Détection incendie (chaleur et fumée).
- Sonorisation d'alarme et de sécurité.
- Système fixe et automatique de détection et protection des installations et équipements spécifiques (CO₂, mousse, poudre, sprinklers, etc.) notamment pour les locaux électriques.

II.4.6.2. Système de contrôle à distance :

- Un système de contrôle à distance sera prévu ; dont chaque automate permettre une gestion optimale de chaque zone de la station de dessalement.
- Automate permettre la signalisation des états des E/S.
- L'automate assure l'acquisition des données suivantes :
 - Les différents débits mesurés au niveau de chaque unité d'osmose inverse et les stations de l'eau de mer et de l'eau produite.

- L'état des groupes électropompes, des pompes doseuses et des vannes.
- Les valeurs de pressions aux différents points de processus.
- Toutes les informations qui concernent le matériel d'injection des produits chimiques.
- Caractéristiques chimiques de l'eau (pH, conductivité, etc.) ;
- Les alarmes.

Conclusion :

En conclusion, la station est idéalement située dans une zone qui répond parfaitement aux exigences nécessaires pour un captage efficace de l'eau de mer. Grâce à des infrastructures avancées et à un emplacement stratégique, elle assure une alimentation continue en eau de qualité supérieure, tout en minimisant les impacts environnementaux. Ces éléments combinés garantissent non seulement un rendement optimal de l'usine, mais également une solution durable et fiable pour le traitement de l'eau de mer.

CHAPITRE III :

**Les techniques et les options du
post traitement**

Introduction :

L'eau, issue du processus de dessalement, est généralement chargée d'agressivité. Cette caractéristique menace la durabilité des infrastructures hydriques et la qualité de l'eau distribuée. Face à ce défi, une solution émerge : le post-traitement, visant à rétablir l'équilibre calcocarbonique. Ce chapitre se penche sur la lutte contre le pouvoir corrosif des eaux osmosées, explorant la manière de rendre une eau agressive à l'équilibre dans les stations de dessalement. En d'autres termes, nous examinerons les techniques de reminéralisation comme réponse à ce défi majeur, cherchant ainsi à préserver la qualité et la durabilité de nos ressources hydriques.

III.1. Le rôle des minéraux dissous dans l'eau :

L'eau, qu'elle provienne de la mer, des rivières ou du robinet, n'est jamais chimiquement pure. Elle dissout divers sels minéraux essentiels au cours de son cycle naturel. Ces minéraux, tels que le calcium, le magnésium, le sodium, et d'autres, sont cruciaux pour la santé des organismes vivants. L'eau contient également des oligo-éléments en très petites quantités, chacun jouant un rôle essentiel pour la santé et le bon fonctionnement des organismes vivants. Ces éléments, tels que le fer, le fluor, le zinc et bien d'autres, contribuent à des fonctions spécifiques que nous détaillerons dans le tableau III.1 ci-dessous.

Tableau III.1. Les oligo-éléments et leur action sur la santé humaine [12].

Les éléments	Les actions
Chrome (Cr)	impliqué dans le métabolisme des glucides et des lipides, aidant ainsi à réguler la glycémie.
Cuivre (Cu)	participe au fonctionnement de diverses enzymes, à la synthèse des protéines et à la formation des globules rouges.
Iode (I)	Indispensable à la production des hormones thyroïdiennes, qui régulent le métabolisme.
Manganèse (Mn)	Indispensable pour l'action de certaines enzymes, améliore la régulation de la glycémie et participe au métabolisme des glucides et des lipides.

Zinc (Zn)	Présent dans de nombreuses enzymes, il intervient dans la synthèse des protéines, la cicatrisation des plaies, et le fonctionnement du système immunitaire.
Fer (Fe)	Un élément fondamental de l'hémoglobine, nécessaire au transport de l'oxygène dans le sang
Fluor (F)	Essentiel pour la prévention des caries dentaires en renforçant les dents.
Cobalt (Co)	Composant de la vitamine B12, nécessaire pour la production de globules rouges et le fonctionnement du système nerveux.
Bore (B)	Contribue à la santé osseuse en influençant la structure des os.
Silicium (Si)	Contribue à la santé des os, des articulations, des cheveux et des ongles.
Lithium (Li)	Joue un rôle dans l'équilibre du système nerveux, souvent utilisé dans le traitement des troubles de l'humeur.
Sélénium (Se)	Un puissant antioxydant, protège les cellules contre les dommages causés par les radicaux libres et soutient le système immunitaire.
Vanadium (V)	Impliqué dans la croissance et le développement cellulaire, et peut influencer le métabolisme des glucides.
Molybdène (Mo)	Composant de certaines enzymes impliquées dans le métabolisme des acides aminés et la détoxification des composés nocifs.
Strontium (Sr)	Joue un rôle dans la formation et la fortification des os.

III.2. Les normes de potabilités :

Elles ont été établies pour définir les concentrations maximales de diverses substances potentiellement nocives présentes dans l'eau. Conformité à ces normes signifie que les polluants, bien que présents, sont à des niveaux suffisamment bas pour ne pas constituer de risque pour la santé des consommateurs. Les valeurs des paramètres de qualité de l'eau sont

exprimées sous forme de recommandations ou de niveaux guides, qui représentent les concentrations au-delà desquelles l'eau pourrait devenir nuisible à la santé ou perdre ses qualités organoleptiques.

Bien que ces recommandations ne soient pas légalement contraignantes, elles servent de base pour l'élaboration des législations nationales, comme c'est le cas en Algérie, où les normes sont détaillées dans l'Annexe I.

Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini des directives internationales qui garantissent qu'une eau est saine et potable, ces directives étant une référence mondiale.

III.3. Définition de l'équilibre calcocarbonique :

L'équilibre calcocarbonique de l'eau dessalée est un concept complexe qui concerne l'équilibre des ions calcium (Ca^{2+}), carbonate (CO_3^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau. Lorsque l'eau est dessalée, elle peut être dépourvue de ces ions essentiels, ce qui la rend agressive et potentiellement corrosive.[23]

Pour maintenir un équilibre chimique stable et prévenir la corrosion des canalisations et des équipements, il est obligatoire de réintroduire ces ions dans l'eau, notamment le calcium, qui joue un rôle important dans la formation de dépôts calcaires protecteurs sur les surfaces métalliques. De plus, les ions carbonate et bicarbonate contribuent à stabiliser le pH de l'eau, ce qui est essentiel pour prévenir la corrosion et assurer la compatibilité avec les systèmes de distribution.

Ainsi, l'équilibre calcocarbonique de l'eau dessalée consiste à rétablir les concentrations appropriées de ces ions pour garantir une eau chimiquement équilibrée, non seulement pure, mais également moins agressive et corrosive. Cela implique généralement l'utilisation de techniques de reminéralisation, telles que l'ajout de la chaux et CO_2 , pour ajuster les niveaux d'ions dans l'eau traitée. En maintenant cet équilibre, on assure la durabilité des infrastructures hydriques et la qualité de l'eau distribuée.

III.4. Composition des eaux :

Elle regroupe généralement deux types des éléments qui influencent directement la qualité et les propriétés de l'eau

III.4.1 Les éléments constitutifs de l'eau :

Ce sont les éléments que l'on trouve dans toutes les eaux naturelles :

Tableau III.2 : Les éléments fondamentaux dans l'eau.[13]

Cations		Anions		Molécules	
Hydronium	H_3O^+	Hydroxyle	OH^-	eau	H_2O
Calcium	Ca^{2+}	Carbonate	CO_3^{2-}	acide carbonique	H_2CO_3
		Hydrogénocarbonate	HCO_3^-		

III.4.2. Les éléments caractéristiques :

Ce sont des ions est différent de ceux mentionnés précédemment et peut être présent ou absent dans l'eau, influençant ainsi ses propriétés. Ces ions incluent, par exemple :

Tableau III.3 : Les éléments caractéristiques. [13]

Cations		Anions	
Magnésium	Mg^{2+}	Sulfate	SO_4^{2-}
Sodium	Na^+	Chlorure	Cl^-
Potassium	K^+	Nitrate	NO_3^-

Les eaux contiennent aussi une diversité de composants essentiels, parmi lesquels :

➤ **Gaz carbonique (CO₂) :**

Le gaz carbonique est présent dans l'air et se trouve également dans la plupart des eaux de distribution. Il se dissout partiellement dans l'eau pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), principal agent d'agressivité de l'eau. La quantité de CO₂ dissoute dépend de la température et de la pression du gaz dans l'atmosphère, variant généralement de 0,70 mg/l à 10 °C à 0,53 mg/l à 20 °C.

➤ **Oxygène et Azote :**

Ces gaz se dissolvent dans l'eau sans se dissocier.

➤ **Hydrogène sulfuré (H₂S) :**

Bien que légèrement dissocié, le sulfure d'hydrogène peut être présent dans l'eau.

➤ **Sels de bases fortes et d'acides forts :**

Ces sels se dissocient totalement en ions. Les sulfates et les chlorures sont parmi les plus importants.

➤ **Sels de bases fortes et d'acides faibles :**

Ces sels se dissocient presque totalement en ions. Les sels de calcium, tels que le bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) et le carbonate de calcium (CaCO_3), sont des exemples significatifs. Bien que peu soluble, le carbonate de calcium peut être présent à des concentrations d'environ 15 mg/l à 25 °C et 25 mg/l à 100 °C. Les carbonates de sodium et de magnésium sont bien plus solubles que le carbonate de calcium. [22]

➤ **Acides humiques :**

Les sels d'acides humiques, tout comme les carbonates, se dissocient et leurs anions se lient aux ions H^+ présents dans l'eau. Cependant, leur concentration est généralement très faible. Ainsi, les sels d'acides humiques sont souvent négligés, tout comme la présence d'hydrogène sulfuré.

III.5. Equilibre prédominant :

La présence de différents cations, en particulier le calcium, un ion soluble, altère l'équilibre calcocarbonique de l'eau. Cela se produit surtout lorsque l'eau, saturée en CO_2 , subit une minéralisation calcique plus ou moins prononcée. En conséquence, ces nouveaux équilibres peuvent entraîner la dissolution ou la précipitation du CaCO_3 dans l'eau. Cette réaction chimique de base définit l'équilibre calcocarbonique de l'eau.



Carbonate de calcium + dioxyde de carbone + eau \rightleftharpoons calcium + hydrogénocarbonate

III.6. Les eaux agressives et les eaux incrustantes :

À une minéralisation donnée (TH et TAC définies), Tillmans a démontré qu'il existe un pH, appelé pH de saturation (pHs) ou pH d'équilibre, au-delà duquel une précipitation des ions calcium et bicarbonate se produit sous forme de carbonate de calcium (calcaire). Ce précipité, également connu sous le nom de couche de Tillmans, joue un rôle protecteur en préservant les parties métalliques de la corrosion par l'eau (BOURAS, 2017).

Les eaux peuvent donc être classées en fonction de la valeur de leur pH par rapport à leur pHs :

- Si le pH est supérieur au pH d'équilibre, l'eau tend à déposer du CaCO_3 et est dite

"entartrante".

- Si le pH est inférieur au pH d'équilibre, l'eau tend à dissoudre du carbonate de calcium et est dite "agressive".

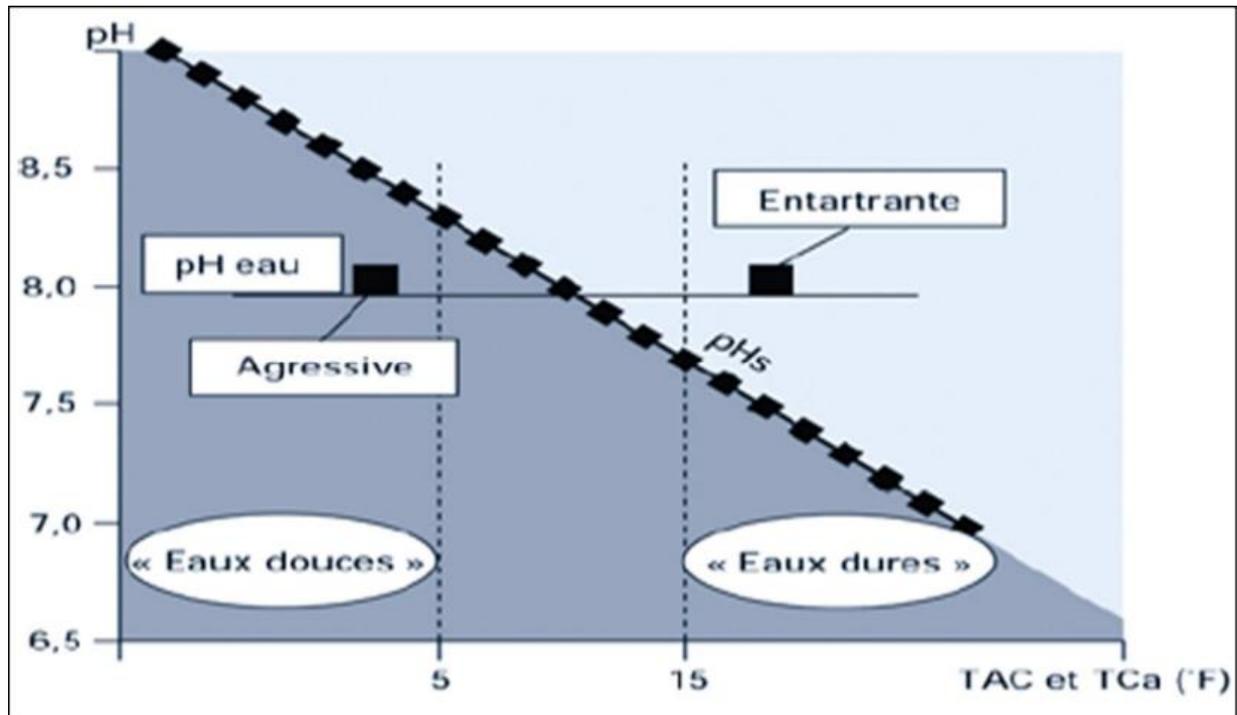


Figure III.1 : Présentation des zones d’existences des eaux dures/eaux douces et eaux entartrantes /eaux agressives en fonction du pH et du TAC. [13]

Remarque :

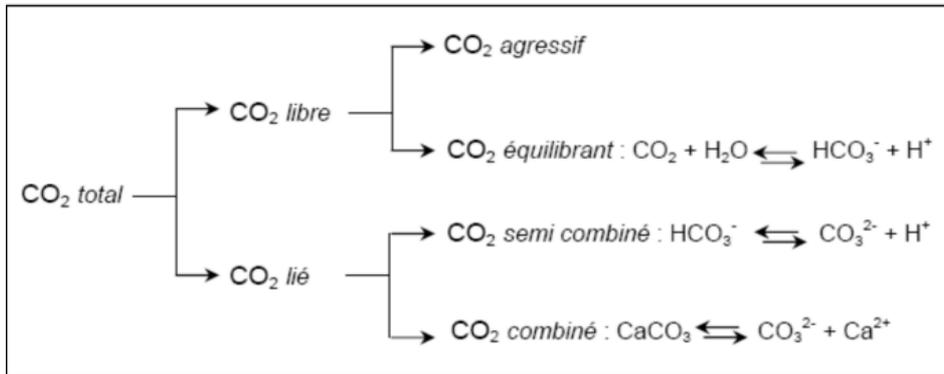
Si la concentration en CO₂ libre dépasse celle du CO₂ équilibrant, le sens 1 prévaut conformément à la loi de l'action de masse. L'excès de CO₂ attaque alors la couche calcaire présente dans les canalisations, rendant l'eau agressive ou corrosive.



Dans le cas inverse, une insuffisance de dioxyde de carbone favorise le sens 2. Une partie des ions bicarbonate (Ca(HCO₃)₂) se dépose sous forme de calcaire, augmentant ainsi la concentration en CO₂ libre. L'eau devient alors entartrante ou incrustante. [22]



La figure III.2 montre les diverses formes sous lesquelles on rencontre le dioxyde de carbone dans l'eau.



La figure III.2 : Les diverses formes sous lesquelles se trouve le CO₂ dans l'eau. [13]

III.7. pH d'équilibre :

Pour une eau en équilibre, son pH correspond au pH d'équilibre, également appelé pH de saturation (pHs). Afin de stabiliser une eau à l'équilibre, il est nécessaire d'ajuster son pH à la valeur de son pHs.

- Equations du pH d'équilibre : [14]

- Dissociation du carbonate de calcium



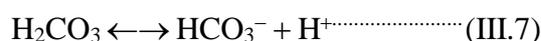
- La constante de solubilité est défini par

$$K'_s = [\text{CO}_3^{2-}] \cdot [\text{Ca}^{2+}] \dots\dots\dots (\text{III.5})$$

- Dissolution du CO₂ gazeux dans l'eau



- A son tour le H₂CO₃ donne :



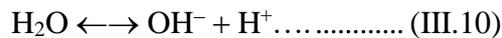
- La constante d'équilibre est donnée K'₁ par :

$$K_1' = \frac{[HCO_3^-].[H^+]}{[H_2CO_3]} \dots\dots\dots(III.8)$$

- La constante d'équilibre K'2 est donnée par :

$$K_2' = \frac{[CO_3^{2-}].[H^+]}{[HCO_3^-]} \dots\dots\dots (III.9)$$

- L'équilibre de dissociation de l'eau



- La constante d'équilibre de l'eau est donnée par :

$$K_e' = [H^+].[OH^-] \dots\dots\dots(III.11)$$

- L'alcalinité :

$$2[alc] = 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] + [OH^-] - [H^+] \dots\dots\dots(III.12)$$

N.B : On exprime les constantes d'équilibre Ki en fonction des activités des ions () et non pas par les concentrations [].

$$(I) = (I) = \gamma [I] \dots\dots\dots (III.13)$$

$$\text{Log } \gamma = -A \left[\frac{\sqrt{\mu}}{1+\sqrt{\mu}} - 0.3 \mu \right] \dots\dots\dots(III.14)$$

Avec :

γ : Le coefficient d'activité ;

μ : La force ionique ;

$A = 1.82 \times 10^6 (\epsilon \theta)^{-1.5}$;

ϵ : Constante diélectrique de l'eau (égal à 78.3) ;

θ : Température (°K).

La relation entre les pKi et les pK'i est comme suit :

$$pK'e = pKe + \log \gamma_1 \dots\dots\dots (III.15)$$

$$pK_1' = pK_1 + \log \gamma_1 \dots\dots\dots (III.16)$$

$$pK'_2 = pK_2 + \log \gamma_2 \dots\dots\dots (III.17)$$

$$pKs' = pKs + \log \gamma_2 \dots\dots\dots (III.18)$$

La résolution simultanée des équations (II), (II.7), (II.9) et (II.10) permet de trouver l'expression du pHs entre 6.5 et 9.5 :

$$pHs = pK'_2 + pCa^{2+} - pKs' - \log [alc] - \log \gamma_1 \dots\dots\dots (III.19)$$

Avec

- les concentrations sont en mol/l
- Alc : en mol/l CaCO₃

L'équation (II.17) permet de calculer le pH d'équilibre d'une eau.

Voici les valeurs des constantes d'équilibres de pk1 d'après LEGRAND [14]:

$$pK_1 = - 646.10^{-9} t^3 + 163,5.10^{-6} t^2 - 12,3.10^{-3} t + 6,583 \dots\dots\dots(III.20)$$

$$pK_2 = -328.10^{-9} t^3 + 135,3.10^{-6} t^2 - 15,04.10^{-3} t + 10,627 \dots\dots\dots(III.21)$$

$$pKe = -1,49.10^{-6} t^3 + 270.10^{-6} t^2 - 43,44.10^{-3} t + 14,940 \dots\dots\dots(III.22)$$

$$pKs = 444.10^{-9} t^3 + 61 .10^{-6} t^2 - 14.10^{-3} t + 8,022 \dots\dots\dots(III.23)$$

Tableau III.4 : Valeurs des pKi pour différentes degrés de température [W8]

Température	Pke	Pk1	Pk2	Pks	pK2 – pKs
0	14.94	6.58	10.63	8.02	2.61
10	14.53	6.48	10.49	8.15	2.34
18	14.24	6.41	10.40	8.26	2.14
20	14.17	6.39	10.38	8.28	2.10
25	14.00	6.37	10.33	8.34	1.99
30	13.84	6.34	10.29	8.39	1.90
40	13.54	6.31	10.22	8.51	1.71
50	13.26	6.30	10.17	8.62	1.55
60	13.02	6.30	10.14	8.74	1.40
70	12.70	6.30	10.12	8.86	1.26
80	12.30	6.31	10.12	8.97	1.15

III.8. Les paramètres influençant l'équilibre calcocarbonique :**III.8.1. Pression partielle du CO₂**

L'échange de CO₂ entre la phase liquide et la phase gazeuse est le principal facteur de la précipitation du carbonate de calcium, conformément à la loi de Henry. Tout déséquilibre entre le CO₂ libre et les ions calcium modifie l'équilibre calcocarbonique. Une augmentation de la concentration de CO₂ dissous entraîne une baisse du pH, affectant les concentrations des ions CO₃²⁻, HCO₃⁻, OH⁻ et H⁺, et rendant la solution plus corrosive pour les matériaux. À l'inverse, une diminution du CO₂ peut rendre l'eau dure et incrustante, provoquant des dépôts de tartre. [15]

III.8.2. La température :

La température de l'eau exerce une influence significative sur ses caractéristiques physiques et chimiques. Ainsi, toute fluctuation de température entraîne des modifications dans son comportement. La solubilité d'un minéral dans l'eau est particulièrement affectée par les variations de température. Par exemple, l'élévation de la température favorise grandement la réaction chimique conduisant à la précipitation du carbonate de calcium, accélérant ainsi la formation de tartre en libérant du gaz carbonique [37,38].

III.8.3. pH (Potentiel hydrogène) :

Le pH d'une solution permet la détermination de l'acidité et la basicité d'un milieu, définie par la relation suivante (RODIER.J, COLL, 2005) :

$$\text{pH} = - \log (\text{H}^+) \dots\dots (\text{III.24})$$

Où (H⁺) est l'activité des protons présents dans la solution.

Dans un milieu naturel, les protons peuvent provenir de diverses sources, telles que l'eau, les acides, ou la dissociation du CO₂ atmosphérique. Par conséquent, le pH d'un tel système dépend principalement de la présence ou de l'absence d'échanges avec l'air, qui agit comme un réservoir infini de CO₂ atmosphérique [16].

L'équilibre relatif au carbonate de calcium est déterminé par le produit de la concentration des ions calcium et des ions carbonate. Ainsi, une eau initialement sous-saturée par rapport au carbonate de calcium peut devenir sur-saturée si son pH augmente, en raison de l'augmentation de la fraction de carbonate. En revanche, lorsque la précipitation du carbonate de calcium se produit, la concentration en carbonate est approvisionnée par la dissociation de l'acide carbonique et du bicarbonate en carbonate. Par conséquent, la précipitation du CaCO₃ réduit

non seulement la concentration de l'espèce carbonate mais également celle de l'ensemble du système carbonate.

De plus, lors de la précipitation, la dissociation de l'acide carbonique entraîne une baisse du pH de la solution. Par conséquent, les conditions d'équilibre sont atteintes non seulement par la réduction des concentrations de calcium et de carbonate, mais aussi par la diminution du pH.

III.8.4. La conductivité

La conductivité de l'eau, indicatrice de la concentration d'ions dissous, permet d'évaluer rapidement la minéralisation globale. Une conductivité élevée reflète une forte présence de minéraux, tandis qu'une faible conductivité indique une eau moins minéralisée, ce qui est important pour évaluer la qualité de l'eau pour la consommation ou l'usage domestique.

Rejsek (2002) souligne que la conductivité est un indicateur essentiel pour évaluer la minéralisation globale d'une eau. Le tableau ci-dessous (Tableau N°1) présente la corrélation entre la conductivité et la minéralisation de l'eau."

Tableau III.5 : Relation entre la conductivité et la minéralisation de l'eau. [17]

Conductivité	Minéralisation
Conductivité < 100	Minéralisation très faible
100 < conductivité < 200	Minéralisation faible
200 < conductivité < 333	Minéralisation moyenne accentuée
333 < conductivité < 666	Minéralisation moyenne
666 < conductivité < 1000	Minéralisation importante
conductivité > 1000	Minéralisation excessive

III.8.5. Alcalinité :

L'alcalinité indique la capacité d'une eau à neutraliser les acides, également appelée pouvoir tampon ou résistance au changement de pH lors de l'ajout d'acide. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte principalement de la présence des trois principaux ions alcalins qui sont les suivants [23] :

- Hydrogénocarbonates ou bicarbonate HCO_3^-
- Carbonates CO_3^{2-}
- Hydroxydes (OH^-)

Elle est exprimée, par deux titres qui expriment la dureté carbonatée de l'eau [17]:

a) TA (titre alcalimétrique) :

Est une mesure de la capacité d'une solution aqueuse à neutraliser les acides. Elle représente la concentration des alcalins dans l'eau, comprenant les hydroxydes ainsi que la moitié de la concentration des carbonates alcalins et alcalino-terreux.

$$\text{TA} = [\text{OH}^-] + \frac{1}{2} [\text{CO}_3^{2-}] \dots\dots \text{(III.25)}$$

b) TAC (titre alcalimétrique complet) :

C'est la concentration des alcalins, y compris les hydroxydes, les carbonates, et les bicarbonates (ou hydrogénocarbonates), qui sont alcalins et alcalino-terreux.

$$\text{TA} = [\text{OH}^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] \dots\dots \text{(III.26)}$$

III.8.6. Dureté de l'eau :

C'est un indicateur de la minéralisation de l'eau, qui comprend la somme des concentrations des ions Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} et Sr^{2+} . Comme la plupart des eaux ne contiennent pas d'ions Sr et Ba, donc en pratique, la dureté totale est définie par la somme de calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} , présents dans l'eau. Cet indicateur est exprimé par un titre hydrotimétrique (TH), qui est un nombre qui s'exprime en degrés français ($^\circ\text{F}$), et on distingue [23]:

- le **TH total** : c'est la teneur en Ca^{2+} et Mg^{2+} .

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \dots\dots \text{(III.27)}$$

- le **TH calcique** : c'est la teneur en Ca^{2+} .

Tableau III.6 : Classement des eaux en fonction du TH. (BENAMOUR.M, 2007)

Eau douce	Eau moyenne	Eau dure	Eau très dure
TH < 10 $^\circ\text{F}$	10 $^\circ\text{F}$ < TH < 25 $^\circ\text{F}$	25 $^\circ\text{F}$ < TH < 35 $^\circ\text{F}$	TH > 35 $^\circ\text{F}$

III.9. Les indices d’appréciations des eaux :

Ils sont utilisés pour évaluer le potentiel de l’eau à être incrustante ou corrosive.

III.9.1. L’indice de Langelier (indice de saturation) :

C'est l'un des paramètres les plus fréquemment utilisés pour évaluer si une eau a tendance à être corrosive ou incrustante.

Il est abrégé en IL ou LSI (Indice de saturation de Langelier) et est calculé selon la formule suivante :

$$IL = pH - pH_s \dots\dots\dots (III.28) [19]$$

- Si $IL = 0$, l'eau est à l'équilibre, saturée en $CaCO_3$, ce qui implique que des dépôts de $CaCO_3$ ne sont ni déposés ni dissous.
- Si $IL > 0$, c'est une eau incrustante ou entartrante.
- Si $IL < 0$: c'est une eau agressive ou corrosive.

III.9.2 L’indice de Ryznard (indice de stabilité) :

Appelé également, indice de stabilité (en anglais, Ryznar Stability Index), calculé par la formule simple :

$$I_R = 2 pH_s - pH \dots\dots\dots(III.29) [19]$$

- $I_R > 7$ eau agressive
- $I_R < 7$ eau incrustante.

Le tableau ci-dessous montre plus précisément la relation entre l'indice de stabilité et la tendance de l'eau à former des dépôts ou à corroder.

Tableau III.7 : La relation entre l’indice de Ryznard et la tendance incrustante ou corrosive d’une eau. [19]

indice de stabilité I_R	Tendance
4 à 5	Entartrage important
5 à 6	Entartrage faible
6 à 7	Equilibre

7 à 7,5	Légère corrosivité
7,5 à 8,5	Corrosivité notable
> 8,5	Corrosivité importante

III.9.3. L'indice de Stiff et Davis :

Lorsque la salinité de l'eau dépasse 10 000 mg/l, ce qui est courant dans les eaux saumâtres et les eaux de mer, l'indice de Langelier ne peut pas être utilisé pour évaluer la tendance à la corrosion ou à l'entartrage de l'eau. [23]

À la place, l'indice de Stiff et Davis, également appelé Silt Density Index (SDI), est employé.

Cet indice, défini par l'équation $SDI = pH - pCa - pAlc - K \dots\dots (III.30)$

Avec :

- $pCa = \log (1/ [Ca])$
- $pAlc = \log (1/ [Alc])$
- k : constante dépendant de la force ionique de l'eau et sa température.

Une valeur négative de l'indice SDI indique que l'eau n'a pas tendance à former des dépôts. Cette approche offre une alternative précieuse pour évaluer la qualité de l'eau dans des conditions où l'indice de Langelier n'est pas applicable.

III.9.4. L'indice de Larson (indice de corrosivité) :

Il est également connu sous le nom d'indice de corrosivité, est une mesure utilisée pour évaluer le potentiel corrosif de l'eau. Il est défini par une formule empirique basée sur des expérimentations menées par les chercheurs américains Larson et Skold.

$$I_c = ([Cl^-] + 2 \times [SO_4^{2-}]) / [HCO_3^-] \dots\dots (III.31)$$

Selon cette formule, les concentrations des différents composants sont exprimées en mol/l.

Il est généralement recommandé que cet indice ne dépasse pas 0,2 ou 0,3 pour garantir une eau ayant une faible tendance à la corrosion. Cependant, certains experts estiment que des valeurs allant jusqu'à l'unité peuvent être acceptables dans certaines circonstances.

Tableau III.8 : La relation entre l'indice de Larson et la tendance corrosive de l'eau. [19]

I_c	TENDANCE
< 0,2	Pas de tendance à la corrosion
0,2 à 0,4	Faible tendance
0,4 à 0,5	Légère tendance
0,5 à 1	Tendance moyenne
>1	Nette tendance à la corrosion

III.10. Procédés de mise à l'équilibre dans les stations de dessalement :

Il existe diverses méthodes pour ajuster la qualité de l'eau produite par les stations de dessalement en fonction de son caractère plus ou moins agressif ou corrosif. Parmi ces méthodes figurent la reminéralisation et la neutralisation.

On parle de **neutralisation** si le CO₂ utilisé pour produire des bicarbonates est celui de l'eau brute. On parle de **reminéralisation** si l'on ajoute du CO₂ (ou éventuellement des ions HCO₃⁻).

III.11. Importance de l'équilibre calcocarbonique :

L'équilibre calcocarbonique revêt une importance capitale lors de la distribution de l'eau. Il est essentiel que l'eau distribuée soit à l'équilibre calcocarbonique pour garantir la qualité de l'eau potable produite par le dessalement et pour éviter les dommages aux matériaux, tels que les canalisations. Une eau déséquilibrée peut avoir des conséquences néfastes : une eau agressive peut corroder les matériaux, tandis qu'une eau entartrante peut favoriser la formation de dépôts de calcaire [19]. Un contrôle précis de cet équilibre permet d'éviter :

1. Corrosion des infrastructures :

Un déséquilibre dans l'équilibre calcocarbonique peut entraîner une corrosion des infrastructures de distribution d'eau, telles que les canalisations et les réservoirs. En effet, une eau trop acide ou trop alcaline peut attaquer les matériaux des infrastructures, conduisant à des fuites, à des ruptures de canalisation et à d'autres dommages structurels. Cette corrosion peut

également entraîner la libération de métaux lourds et d'autres contaminants dans l'eau, ce qui pose un risque pour la santé publique.



Fig. III.3 : Conséquences des eaux agressives sur les réseaux de distribution. [10]

2. Risques pour la santé publique :

Les problèmes de corrosion des infrastructures d'eau peuvent avoir des répercussions directes sur la qualité de l'eau potable. Les fuites dans les canalisations peuvent permettre à des contaminants extérieurs de pénétrer dans le réseau d'eau, augmentant ainsi le risque de contamination microbologique et chimique de l'eau potable. De plus, la corrosion des canalisations peut altérer le goût et l'odeur de l'eau, ce qui peut être désagréable pour les consommateurs et entraîner une diminution de la confiance dans l'eau du robinet.

3. Coûteuses réparations :

La corrosion des infrastructures d'eau peut entraîner des coûts considérables en termes de réparations et de remplacement des équipements endommagés. Ces coûts comprennent non seulement les frais de réparation des canalisations et des réservoirs, mais aussi les coûts indirects associés à la perturbation des services d'eau, aux interruptions de fourniture et aux pertes économiques pour les entreprises et les ménages. Dans toutes les cas, il est impératif de comprendre les propriétés de l'eau et de lui appliquer un traitement approprié afin d'atteindre l'équilibre calcocarbonique, en particulier lors du processus de dessalement de l'eau de mer en raison du risque plus élevé d'entartrage et de corrosion, assurant ainsi la durabilité et l'efficacité des infrastructures hydriques.

III.13. Caractéristiques souhaitables :

- L'eau doit être à l'équilibre de saturation calcique pour favoriser la formation spontanée d'un dépôt de carbonate de calcium sur les surfaces en contact, tout en évitant son attaque.
- Elle doit avoir une concentration appropriée en ions calcium pour assurer un dépôt adéquat sans excès.
- La proportion d'ions SO_4^{2-} ou Cl^- doit être limitée pour éviter la porosité du dépôt formé.
- Un pH élevé est souhaitable pour réduire la corrosivité de l'eau vis-à-vis des métaux.
- La présence d'oxygène, entre 4 et 5 mg/l, est nécessaire pour modérer la vitesse de précipitation des dépôts insolubles lors de l'attaque des métaux.
- Pour respecter ces conditions, le TH (dureté) doit être compris entre 6,5 et 15°F, le TAC autour de 7 à 10 °F, le pH supérieur à 7,2 et égal ou supérieur au pH de saturation (pHs), et aucune présence excessive de gaz carbonique (CO_2 agressif) ne doit être constatée.
- Il est considéré que la référence de qualité est satisfaite lorsque :
 - $-0,2 \leq \text{pH}_{\text{eq}} - \text{pH in situ} \leq 0,2$ (eau à l'équilibre calco-carbonique).
 - $-0,3 \leq \text{pH}_{\text{eq}} - \text{pH in situ} < -0,2$ (eau légèrement incrustante).

Avec : pH in situ, le pH mesuré in situ (sur site) et pH_{eq} , le pH d'équilibre. [21]

III.14. Comment mettre l'eau à l'équilibre calcocarbonique :

Deux problématiques distinctes se présentent généralement : la correction d'une eau agressive et la correction d'une eau incrustante.

➤ TRAITEMENTS DES EAUX AGRESSIVES :

Pour traiter une eau agressive, plusieurs méthodes sont envisageables :

- Ajout de chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en solution à partir de lait de chaux ou d'eau de chaux
- Ajout de soude NaOH en solution
- Filtration à travers des matériaux calcaires pour neutraliser.
- Élimination du CO_2 agressif par dégazage (cascade, stripping). [22]

➤ TRAITEMENTS DES EAUX INCRUSTANTES :

Pour corriger une eau incrustante, le processus d'adoucissement est une solution envisageable, se manifestant par : réalisée par précipitation chimique, échange d'ions ou séparation membranaire. [22]

III.15. Définition de la reminéralisation :

La reminéralisation est un procédé de traitement des eaux visant à rééquilibrer les eaux agressives sur le plan calcocarbonique, voire à les rendre légèrement incrustantes pour augmenter leur alcalinité et/ou dureté [24].

Ce processus, essentiel dans le domaine de la gestion de l'eau, poursuit plusieurs objectifs :

- Améliorer les qualités organoleptiques, par exemple, améliorer le goût de l'eau distillée.
- Prévenir la corrosion des réseaux d'eau potable en favorisant la formation d'une couche protectrice à l'intérieur des canalisations.
- Stabiliser le pH : En ajoutant de l'alcalinité, on évite les chutes de pH lors de l'ajout de réactifs acides.

Cette méthode est essentielle pour garantir la qualité et la durabilité des infrastructures de distribution d'eau potable, tout en assurant une meilleure expérience pour les consommateurs.

III.15.1. Techniques de reminéralisation :

Chaque technique présente ses propres avantages et inconvénients, tant du point de vue de la qualité de l'eau que des considérations de processus. Parmi ces procédés, les systèmes de dosage de la chaux et les lits à calcite sont les plus largement appliqués, en particulier dans les grandes usines de dessalement.

Les techniques les plus couramment utilisées dans le monde pour la reminéralisation et la stabilisation de l'eau dessalée ou naturellement douce sont présentées dans les sections suivantes [24]:

a) Dosage direct de solutions chimiques

Le dosage direct de solutions chimiques est une méthode simple et efficace pour contrôler la qualité de l'eau traitée. Les combinaisons les plus courantes incluent le chlorure de calcium (CaCl_2) pour augmenter la dureté et le bicarbonate de sodium (NaHCO_3) pour accroître l'alcalinité, avec parfois l'ajout de soude caustique pour ajuster le pH. Cette méthode permet un

contrôle précis des quantités d'ions ajoutés et évite les problèmes de sous-produits ou de turbidité résiduelle.[24]

Cependant, le principal inconvénient de cette technique est le coût élevé des produits chimiques, limitant son utilisation aux petites installations où les coûts d'investissement sont plus significatifs que les coûts d'exploitation. De plus, cette méthode augmente les ions chlorure dans l'eau, ce qui peut accroître la corrosivité de l'eau envers les tuyaux et équipements en fer et en acier, selon l'indice de Larson-Skold.[24]

b) Méthode de gaz carbonique et chaux (la carbonatation) :

L'injection de CO₂, suivie de chaux, est une méthode couramment utilisée, nécessitant des investissements importants selon la réaction (III.1) :



Ce procédé est mis en œuvre à l'aide de colonnes ou de cuves spécialement conçues, où le CO₂ est injecté via de simples tubes, ou idéalement à travers des diffuseurs poreux ou des bosselures calibrées. Par ailleurs, les systèmes de dosage de la chaux préparent une solution saturée de chaux directement sur site, en utilisant soit de la chaux hydratée (hydroxyde de calcium), soit de la chaux vive (oxyde de calcium) transformée en chaux hydratée sur place. La solution est ensuite produite en mélangeant une suspension d'hydroxyde de calcium avec de l'eau et un flocculant dans un saturateur, permettant ainsi de séparer une solution claire des particules solides restantes.[24]

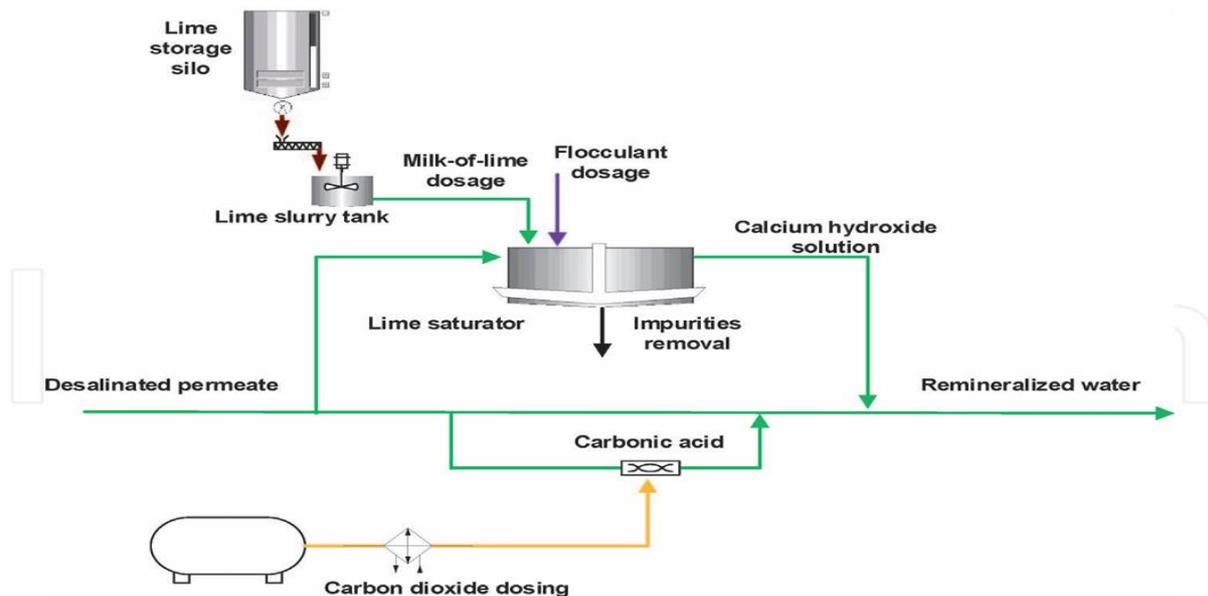


Fig. III.4 : Schéma d'un système de dosage de chaux [23]

Cette technique de reminéralisation, bien que complexe et lourde, est réservée aux grandes unités de production et comporte les avantages et inconvénients suivants [20] :

➤ **Avantage :**

Les avantages de la chaux et les raisons pour lesquelles elle est un choix populaire pour les concepteurs de systèmes sont :

- Sa disponibilité mondiale en tant que produit commercial.
- Son coût relativement bas par rapport à d'autres produits chimiques.
- Sa solubilité élevée Jusqu'à 1700 mg/l à 20°C.
- Excellente capacité reminéralisante de la chaux.
- L'injection de CO₂ permet un bon contrôle du pH et, par conséquent, de la reminéralisation en sortie de filière.
- Le CO₂ est un acide faible (non toxique, non corrosif et inoffensif), respectueux de l'environnement car il ne laisse aucun résidu polluant dans l'eau traitée.
- Réaction facilement contrôlable grâce à la stabilité du CO₂.

➤ **Inconvénients :**

- La chaux n'est pas un produit pur (80 à 95 %), ce qui entraîne la formation de matières en suspension qu'il faut clarifier, cela veut dire que la chaux hydratée contient des impuretés insolubles. Ces impuretés sont principalement du carbonate de calcium non brûlé, mais peuvent également inclure des silicates et d'autres contaminants. Ces impuretés représentent généralement entre 5 et 15 % et doivent être éliminées et traitées comme des déchets, et aussi plus le contenu insoluble est faible, plus le produit est pur et plus son prix est élevé. Si les impuretés ne sont pas efficacement éliminées, elles augmenteront la turbidité de l'eau finale pour améliorer l'efficacité du processus de clarification, un flocculant est souvent ajouté pour aider à la sédimentation. Ces déchets doivent ensuite être épaissis sur place et envoyés pour une élimination appropriée. Ces facteurs augmentent encore les coûts opérationnels et la complexité des systèmes de dosage de chaux.
- Le contrôle des paramètres de la reminéralisation nécessite un dosage minutieux et précis des quantités de CO₂ et de chaux injectées.
- Équipement coûteux.
- Plusieurs problèmes d'exploitation, tels que le colmatage des tuyaux et la difficulté de maintenir les paramètres de l'eau produite.

- Les systèmes de dosage de la chaux nécessitent un entretien et un nettoyage réguliers des canalisations de boue de chaux ou des saturateurs.
- La consommation de CO₂ est relativement élevée car pour atteindre la même dureté calcique et alcalinité dans l'eau finale, deux fois plus de CO₂ est nécessaire par rapport à l'utilisation de carbonate de calcium.
- La chaux est plus coûteuse par kilogramme de CaCO₃ disponible en raison du processus de production et cela s'explique par le fait que la chaux est produite par calcination (chauffage) et hydratation supplémentaire du carbonate de calcium, puis séchée pour produire une chaux hydratée en poudre

c) Méthode de passage sur lit filtrant (dolomite) :

Le procédé de filtration sur lit de calcaire, marin ou terrestre, repose sur le contact de l'eau à traiter avec un matériau à travers lequel elle percole, à l'intérieur d'un réacteur ouvert ou fermé. L'élimination du CO₂ agressif peut se faire par passage de l'eau sur un lit de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium (dolomite non calcinée, CaCO₃ et MgCO₃) ou bien de dolomite calcinée (CaCO₃ et MgO) peu soluble. Ce matériau est attaqué par le CO₂ agressif selon la réaction suivante (dans le cas de dolomite calcinée) :[24]



La reminéralisation et/ou la neutralisation par cette méthode nécessitent un réacteur ouvert ou fermé, en respectant le temps de contact. Le matériau étant consommé au fil du temps, une recharge périodique est nécessaire. [20]

Cette méthode présente les avantages et inconvénients suivants [20]:

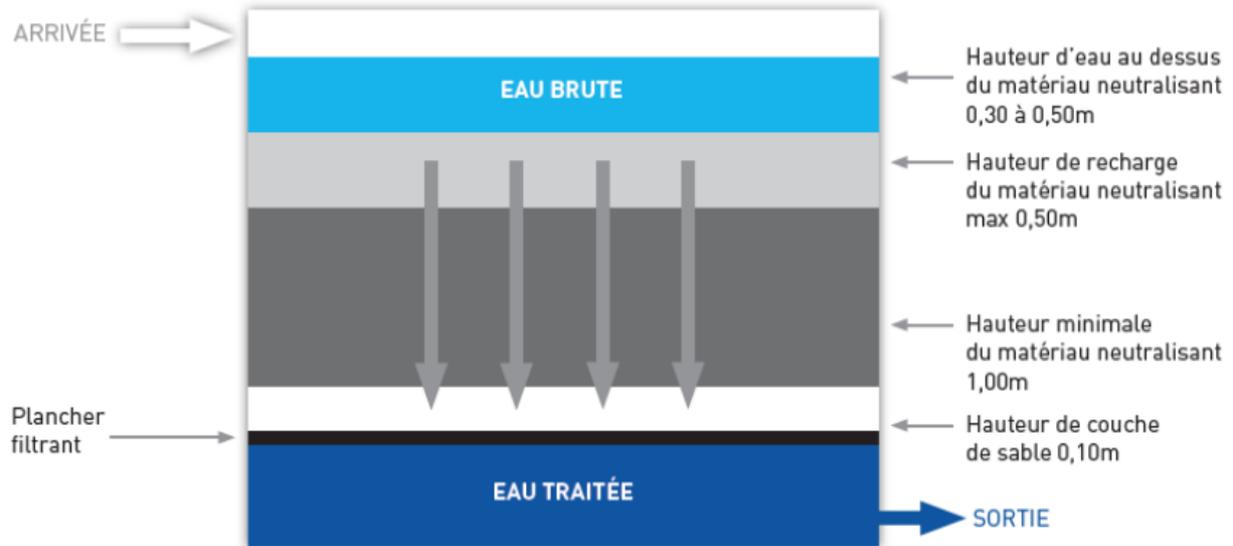
Avantage :

- Elle est facile à exploiter.
- La dolomite enrichit l'eau en magnésium et assure un équilibre optimal entre le calcium et le magnésium, bénéfique pour la consommation humaine.

Inconvénients :

- Les équipements et le dimensionnement de l'installation peuvent être coûteux en cas de débit important.

- Nécessite un lavage à contre-courant ou à l'air, ainsi que des recharges périodiques en calcaire en petites quantités.
- Ce procédé ne permet pas de dépasser le pH d'équilibre, contrairement au procédé à la chaux et au CO₂. Une injection de soude, par exemple, peut être mise en œuvre en aval de la filtration.



La figure III.2 ci-dessous montre clairement le processus de filtration sur dolomite :

Fig. III.05 : Schéma du fonctionnement d'un filtre de dolomite.

d) Ajout de Calcium : Contacteurs de Calcaire (Calcite) [20]

Le calcaire, un minéral naturel composé de calcite (carbonate de calcium), est utilisé pour reminéraliser l'eau dessalée. Le passage de l'eau à travers des médias de calcite dissout cette source de calcium et, en réaction avec le dioxyde de carbone, augmente la dureté calcique et l'alcalinité bicarbonatée de l'eau produite. La réaction chimique de reminéralisation est la suivante :

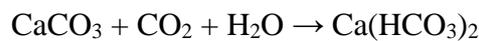
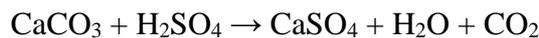


Selon cette équation, pour augmenter de 1,0 mg/L la dureté et l'alcalinité de l'eau dessalée, il faut ajouter 1,00 mg/L de calcite et 0,44 mg/L de dioxyde de carbone. Pour atteindre une dureté et une alcalinité recommandées de 100 mg/L, il faut traiter l'eau dessalée avec 100 mg/L de calcite et 44 mg/L de dioxyde de carbone.

La reminéralisation avec la calcite nécessite deux fois moins de dioxyde de carbone que l'utilisation de la chaux. Bien que seulement 0,74 mg/L de chaux soient nécessaires pour ajouter

1,0 mg/L d'alcalinité et de dureté, le coût de la chaux est généralement plus de deux fois supérieure à celui de la calcite. De plus, la production de chaux ayant une empreinte carbone plus élevée que celle de la calcite, l'utilisation de la calcite est plus économique et écologique pour la reminéralisation.

Une alternative à l'utilisation directe de dioxyde de carbone est l'ajout d'acide sulfurique, qui crée indirectement le dioxyde de carbone nécessaire à la formation de l'alcalinité bicarbonatée :



L'utilisation de l'acide sulfurique au lieu du dioxyde de carbone nécessiterait l'ajout de deux fois plus de calcite pour obtenir la même alcalinité, car une partie de la calcite est utilisée pour former du sulfate de calcium. Cependant, l'acide sulfurique est souvent préféré car il réduit plus facilement le pH de l'eau dessalée à presque n'importe quel niveau souhaité, et le taux de solubilité de la calcite avec l'acide sulfurique est plus élevé qu'avec le dioxyde de carbone. Cela permet de traiter seulement une fraction du débit d'eau dessalée à travers les filtres de calcite et de réduire la taille de ces filtres. Si le coût de l'acide sulfurique est plus élevé que celui du dioxyde de carbone, le compromis entre des coûts d'investissement plus élevés pour des contacteurs de calcite plus grands et des coûts d'exploitation et de maintenance plus faibles peut justifier l'utilisation du dioxyde de carbone.

Un autre avantage de l'acide sulfurique est qu'il produit un rapport de concentration calcium/alcalinité de 2:1, tandis que le dioxyde de carbone donne un rapport de 1:1. Cela augmente la concentration en sulfate (SO_4^{2-}) de l'eau, ce qui peut être avantageux pour l'irrigation agricole.

Les systèmes de contacteurs de calcite pour la reminéralisation sont bien établis et sont utilisés dans toutes les nouvelles usines de dessalement de 330 000 m³/jour à Ashkelon, en Israël, l'une des plus grandes au monde. Pour atteindre des niveaux de pH plus élevés (8,0 à 8,5), il est souvent plus économique de traiter une partie du débit d'eau dessalée à travers les contacteurs de calcite et de mélanger ce flux avec le reste de l'eau dessalée pour obtenir la dureté, l'alcalinité et le pH cibles. [20]

Dans un système de contacteur de calcite typique, le pH de l'eau dessalée est d'abord réduit à 4,5 ou moins par l'ajout de dioxyde de carbone ou d'acide sulfurique, puis cette eau est filtrée à travers un lit de granules de calcite pendant 10 à 30 minutes pour atteindre les niveaux de dureté et d'alcalinité souhaités. La concentration en calcium de l'eau reminéralisée peut être ajustée en modifiant la dose d'acide.

Pour augmenter le taux de réaction dans les contacteurs de calcite, le pH de l'eau d'alimentation est souvent réduit, ce qui accélère la dissolution mais empêche l'atteinte du niveau de saturation en carbonate de calcium. Cela augmente les coûts chimiques et produit de l'eau avec du CO₂ non réagi, nécessitant un ajustement du pH par ajout de base forte ou élimination du CO₂, ajoutant aux coûts d'investissement et d'exploitation.[20]

Les contacteurs de calcite nécessitent des rétrolavages fréquents pour gérer les pics de turbidité causés par les "fines" des nouveaux matériaux, augmentant les besoins en traitement des déchets. Les variations de hauteur du lit de calcite affectent la qualité de l'eau traitée. Les contacteurs de calcite sont chargés manuellement, ce qui augmente les coûts opérationnels, contrairement aux systèmes de chaux qui sont automatiques.

Pour atteindre 80 mg/l de dureté et d'alcalinité, des quantités spécifiques de CaCO₃ et de CO₂ sont nécessaires, avec des implications sur les coûts en fonction des méthodes utilisées pour ajuster le pH et gérer le CO₂ excédentaire.

e) Reminéralisation par mélange avec de l'eau de source

Cette méthode de reminéralisation consiste à mélanger l'eau dessalée avec une partie de l'eau de source utilisée pour le dessalement, ou avec d'autres sources d'eau douce. Cette pratique est courante dans les usines de dessalement d'eau saumâtre par osmose inverse et dans les usines de dessalement thermique. Par exemple, mélanger de l'eau saumâtre à faible salinité avec de l'eau dessalée est une pratique courante. Cependant, cette méthode n'est pas acceptable que si l'eau de source est de haute qualité, a été préalablement traitée pour éliminer les préoccupations microbiologiques et chimiques, et si le mélange respecte toutes les normes de qualité de l'eau applicables. [20]

Cette technique est couramment utilisée pour augmenter la production et satisfaire les besoins en eau, notamment lorsque la salinité des eaux naturelles est faible. Pour équilibrer les eaux osmosées, l'ajout de seulement 1% d'eau de mer peut être suffisant. Toutefois, cette méthode peut altérer la qualité de l'eau produite en raison de la grande différence de salinité

entre les deux types d'eau. Par conséquent, si cette technique est employée, il est crucial de procéder ensuite à une neutralisation du pH.

Conclusion :

Une attention particulière doit être portée à la qualité du perméat à la sortie des usines SWRO (osmose inverse à l'eau de mer) afin de limiter la corrosion des tuyaux et des équipements, et respecter les normes d'eau potable. Cela doit être pris en compte lors de la conception et de l'exploitation des usines.

En particulier, les post-traitements doivent être soigneusement étudiés, notamment lorsque des unités d'osmose inverse à passage unique sont utilisées. Il faut tenir compte des conditions locales (disponibilité et coût des produits chimiques) ainsi que des coûts d'investissement des projets. De plus, lors de la détermination de la qualité du perméat, il ne suffit pas de se fier uniquement aux données fournies par les logiciels des fabricants de membranes. Il est essentiel d'obtenir des garanties sur la qualité chimique réelle du perméat au fil du temps (vieillissement des membranes) conformément au plan de remplacement des membranes prévu. Une marge de sécurité doit être prévue pour prendre en compte les variations possibles de la composition de l'eau de mer et le vieillissement des membranes.

CHAPITRE IV :
Dimensionnement du post
traitement

Introduction :

Le post-traitement de l'eau vise à améliorer la qualité finale de l'eau. Parmi les méthodes utilisées, le lit de calcite est efficace pour neutraliser l'acidité et augmenter la dureté de l'eau en dissolvant du carbonate de calcium. Ce chapitre présente une méthodologie complète pour dimensionner un lit de calcite, en couvrant les principes de fonctionnement, les critères de dimensionnement, les calculs nécessaires, la conception des composants, la durée de vie de la calcite, et les procédures d'entretien. Des études de cas pratiques sont également incluses pour illustrer les concepts discutés. De plus, nous aborderons le calcul des dosages de CO₂ et des quantités de calcite nécessaires pour assurer une correction optimale de la qualité de l'eau.

IV.1. L'objectif du post traitement :

La fonction principale du système de post-traitement est de reminéraliser l'eau du perméat sortant du système d'osmose inverse (RO) afin d'atteindre la qualité requise pour son pompage et sa distribution dans chaque ligne. Le post-traitement inclut :

- Un système de dosage de CO₂.
- Des lits de calcite.
- Un système de pompage de l'eau produite.

En outre, pour désinfecter l'eau, un point de dosage d'hypochlorite est prévu dans la chambre de mélange des réservoirs d'eau potable. Un système de dosage de NaOH est également prévu pour éliminer le CO₂ libre et ajuster le pH.

IV.2. Concept du post traitement :

Le système de post-traitement comprend tous les systèmes nécessaires pour atteindre la qualité de l'eau et la station de pompage utilisée pour envoyer l'eau à Chaiba et Lac des Oiseaux. Le système de post-traitement se compose de :

- Reminéralisation d'une partie du perméat par la techniques des lits de calcite.
- Ajout de CO₂ à une partie du perméat (comprenant le système de stockage et de dosage).
- Ajout d'hypochlorite de sodium pour désinfecter et obtenir la qualité de l'eau.
- Ajout de soude caustique pour éliminer le CO₂ libre et ajuster le pH.
- Station de pompage et de stockage de l'eau produite.

L'eau du perméat sortant de l'osmose inverse remplit un petit réservoir de rinçage, puis elle est envoyée vers deux flux différents : l'un vers les lits de calcite et l'autre vers le bypass des lits de calcite vers le réservoir l'eau. L'eau qui sera envoyée à travers les lits de calcite représentera 40 % du perméat.

Avant les lits de calcite, le CO₂ sera dosé dans un mélangeur statique pour assurer un mélange homogène avant que l'eau n'entre dans le système de lits de calcite. Le CO₂ est dosé pré-dilué avec de l'eau provenant du réservoir de rinçage, qui sera pompée par des pompes d'injection de CO₂.

Après le dosage de CO₂, l'eau passe à travers les lits de calcite où la reminéralisation a lieu.

Ensuite, l'eau reminéralisée est mélangée avec l'eau restant du perméat dans la zone de mélange du réservoir d'eau et cette eau mélangée est envoyée au réservoir d'eau potable.

La première chambre du réservoir d'eau potable est une chambre de mélange où ces deux flux sont correctement mélangés et où l'hypochlorite de sodium et la soude caustique sont dosés.

Depuis le réservoir de stockage d'eau potable, l'eau sera pompée vers Chaiba et Lac des Oiseaux avec des pompes.

IV.3. Principe de fonctionnement d'un lit calcite:

Dans un contacteur à calcite, l'eau passe à travers un lit de calcite broyée et tamisée. En s'écoulant à travers le réservoir du contacteur, l'eau dissout les minéraux carbonatés présents dans le lit de calcite jusqu'à ce que le pH atteigne un équilibre avec le carbonate de calcium (Robinson et al. 2005).

La dissolution de la calcite (carbonate de calcium) augmente :

- ✓ Le ph.
- ✓ L'alcalinité
- ✓ Les concentrations de carbone inorganique dissous dans l'eau.
- ✓ La dureté calcique et totale.

Les composants d'un contacteur comprennent :

- ✓ Un réservoir de contact.
- ✓ Un lit de calcite.

- ✓ Une conduite d'entrée et de sortie.
- ✓ Une conduite de trop-plein.
- ✓ Un couvercle d'accès (pour les contacteurs fermés).
- ✓ Une conduite de vidange.

La figure IV.1 illustre le schéma d'un contacteur à calcite typique. Les conditions d'équilibre dépendent de la vitesse d'écoulement et des caractéristiques initiales de l'eau (pH, teneur en CO_2 , calcium, alcalinité, solides dissous totaux et température).

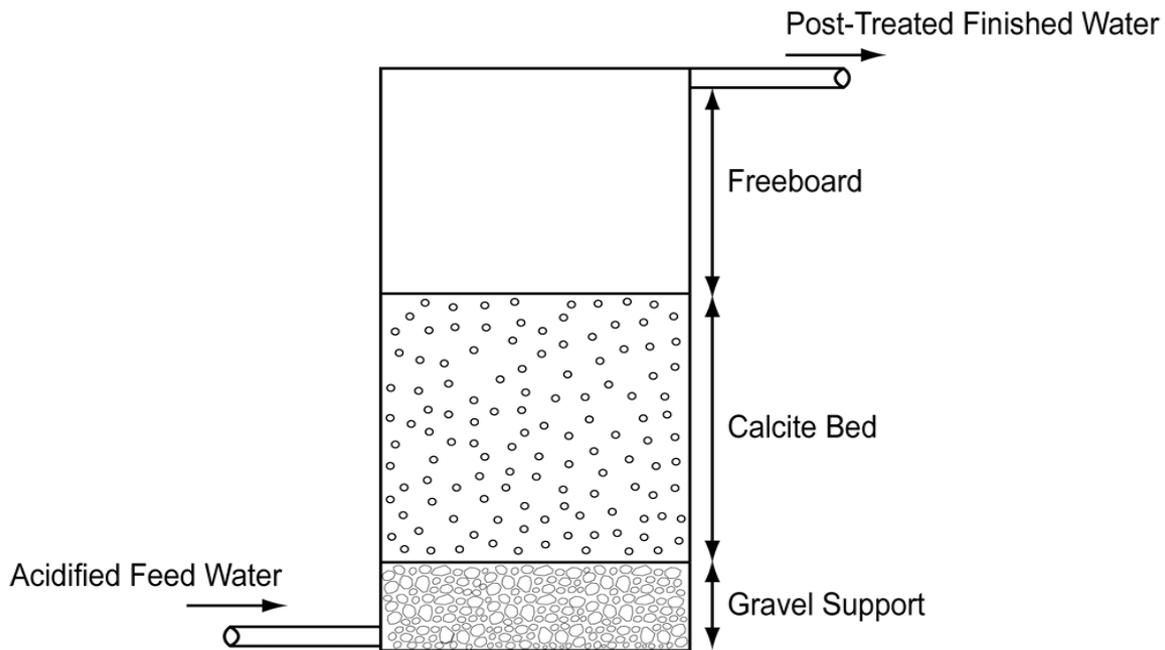


Fig. IV.1 : le schéma d'un contacteur à calcite typique

Au fil du temps, la dissolution de la calcite modifie la taille des particules, la profondeur du lit, la porosité du lit, la vitesse d'écoulement et la perte de charge dans le contacteur. À mesure que la hauteur du lit de calcite diminue, la force motrice pour la dissolution diminue, réduisant ainsi le taux de réaction de dissolution. La concentration de calcium dans l'eau d'alimentation du contacteur peut approcher la concentration d'équilibre, mais ne peut jamais l'atteindre ou la dépasser. Il est nécessaire d'ajouter périodiquement de la calcite aux contacteurs pour reconstituer le média dissous, ce qui empêche d'atteindre des conditions d'état stationnaire car la distribution granulométrique des particules de calcite continue de s'élargir. Par conséquent, l'effluent produit est généralement légèrement en dessous du point de saturation (c'est-à-dire avec un LSI légèrement négatif). Pour obtenir un LSI légèrement positif, un dosage de soude caustique est nécessaire pour augmenter le pH final de l'effluent.

IV.4. Dimensionnement de l'ouvrage du lit calcite :

Pour dimensionner un lit de calcite pour la reminéralisation de l'eau issue de l'osmose inverse, il est important de considérer plusieurs facteurs tels que la quantité d'eau à traiter, la concentration des ions minéraux souhaités, et la durée de fonctionnement du lit et l'espace existant.

Voici les étapes à suivre pour dimensionner correctement un lit de calcite :

IV.4.1. Détermination les paramètres de l'eau à traiter :

Cette étape consiste à identifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute, telles que le pH, la conductivité, la dureté, l'alcalinité, et la concentration en minéraux dissous, ainsi qu'à déterminer les quantités d'eau à traiter, afin de définir les besoins spécifiques en termes de traitement et d'ajustement pour atteindre les standards de qualité souhaités.

a) La quantité de l'eau à traiter :

La quantité d'eau à traiter détermine la taille du lit de calcite nécessaire. Plus la quantité d'eau à traiter est importante, plus le lit doit être grand.

Etant donné que la station est conçu pour produire 300 000 m³ /j donc le débit total du permeat à traiter est approximativement le même.

On a : $Q_{\text{produit}} = 300\,000 \text{ m}^3/\text{j}$

$$Q_{\text{peremat}} (\text{m}^3/\text{h}) = \frac{Q_{\text{produit}}}{24} = 12\,500 \text{ m}^3/\text{h}$$

Après la sortie des racks d'osmose inverse, le flux est divisé. La première partie, soit 40%, est introduite dans les cellules de calcite (CaCO₃), donc, le dimensionnement sera basé sur ce débit, tandis que les 60% restants sont dirigés vers le réservoir de mélange pour être mélangés ultérieurement avec l'eau reminéralisée.

Tableau IV.1 : Les valeurs des différents débits.

Paramètres	Unités	Valeurs
Débit produit	m ³ /h	12500
% du débit de permeat à traiter	%	40
Débit de permeat a traité	m ³ /h	5000
Débit non reminéralisé	m ³ /h	7500

Le choix de reminéraliser 40% du perméat dans une station de dessalement permet de concilier efficacement les contraintes d'espace, de coût, et de qualité de l'eau. En traitant une fraction réduite du perméat, la taille du lit de calcite et des infrastructures nécessaires est diminuée, ce qui réduit l'encombrement et facilite l'intégration dans des espaces restreints. Cela permet également d'optimiser la quantité de calcite utilisée, réduisant ainsi les coûts liés au matériau et à son remplacement. Cette approche permet de contrôler les coûts de construction et de maintenance tout en atteignant les objectifs de pH, dureté, et alcalinité requis pour l'eau potable. De plus, elle offre une flexibilité opérationnelle, permettant des ajustements en fonction des variations dans la qualité du perméat, tout en garantissant que l'eau finale respecte les normes sans sur dimensionner le système.

b) La qualité de l'eau à traiter (permeat):

Ces données sont obtenues par des projections utilisant des modèles mathématiques ou des logiciels spécialisés tels que WAVE, etc. Ces outils prennent en compte divers paramètres, comme les interactions entre les ions, les variations de flux et les phénomènes de polarisation de concentration. Ils permettent de simuler le comportement du système sous différentes conditions opérationnelles.

Tableau IV.2 : le bilan ionique du l'eau de permeat par projection

Température	°C	12	28
Solide en suspension	mg/l	173,3	312,6
Ca ²⁺	mg/l	0,477	1,087
Mg ²⁺	mg/l	1,59	3,622
Na ⁺	mg/l	48,3	110
K ⁺	mg/l	2,456	5,587
HCO ₃ ⁻	mg/l	0,89	2,139
SO ₄ ²⁻	mg/l	3,468	7,898
Cl ⁻	mg/l	79,2	180,3
NO ₃ ⁻	mg/l	0,0001	0,0001
B	mg/l	0,54	1,292
CO ₂ libre	mg/l	1,16	0,653
pH		6,174	6,69
Conductivité calculée	µs/cm	284,8	635,5

c) Calcul de la dureté totale :

$$TH = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$$

$$T_{\text{calcique}} = [Ca^{2+}]$$

Avec :

$$[Ca^{2+}] \text{ (ppm de } CaCO_3) = \frac{[Ca^{2+}] \text{ (ppm)} \times Z \times 50}{M}$$

$$[Mg^{2+}] \text{ (ppm de } CaCO_3) = \frac{[Mg^{2+}] \text{ (ppm)} \times Z \times 50}{M}$$

$$[Mg^{2+}] \text{ (}^\circ F) = \frac{[Mg^{2+}] \text{ (ppm)} \times Z \times 5}{M}$$

$$[Ca^{2+}] \text{ (}^\circ F) = \frac{[Ca^{2+}] \text{ (ppm)} \times Z \times 5}{M}$$

Tels que : Z = la valence.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3. Calcul de la dureté total et calcique :

Paramètres	Unités	valeurs	valeurs
Température	°C	12	28
Dureté total	Ppm de CaCO ₃	7,73	17,72
Dureté total	En degré français °F	0,77	1,76
Dureté calcique	Ppm de CaCO ₃	1,19	2,71
Dureté calcique	En degré français °F	0,12	0,27

d) La qualité de l'eau commercialisable souhaitée de l'usine :

La qualité de l'eau produite doit être conforme aux normes exigées par la réglementation Algérienne en vigueur relative à la qualité de l'eau potable (décret exécutif N°14-96 du 04 mars 2014 modifiant et complétant le décret n°11-125 du 22 mars 2011) et l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S).

Tableau IV.4. Les normes de paramètres principaux de la qualité de l'eau produit

Paramètres	valeur
Dureté totale	>65 ppm de CaCO ₃
Alcalinité	65 ppm de CaCO ₃
pH	8 à 8,5
Indice de Langelier	-0,4 à 0,4
Bore	Valeur annuelle moyenne inférieur ou égale à 1,3 mg/l
TDS	<500 ppm

e) Calcul des indices de saturation du permeal :

Tableau IV.5. Résultats des indices de saturation

Paramètres	Unités	Valeurs	Valeurs
Température	°C	12	28
Dureté totale	ppm de CaCO ₃	7,74	17,7
Alcalinité	ppm de CaCO ₃	0,73	1,76
pCa	-	4,92	4,57
pHCO ₃ ⁻	-	4,84	4,46

IV.4.2. Calcul des besoins de la reminéralisation :

Le calcul des besoins en remineralisation vise a ajuster la composition chimique de l'eau désalée afin de le rendre compatible avec les normes de potabilités, cette etape consiste a déterminer les quantités des minéraux a réintroduire, principalement du calcium pour corriger la dureté et l'alcalinité de l'eau.

a) TH final (après reminéralisation dans le mélange final) :

C'est la dureté totale (TH) de l'eau qu'on doit l'avoir après le processus de reminéralisation. La dureté totale inclut les ions calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺), mais ici, nous nous concentrons principalement sur le calcium.

b) La dureté à ajouter dans le mélange :

C'est la dureté (exprimée en termes de ppm CaCO_3) nécessaire (qui doit être ajoutée) pour atteindre la dureté finale souhaitée, calculée en soustrayant la dureté de l'eau perméat (avant son passage dans les lits de calcite) de la dureté souhaitée.

c) La dureté à ajouter dans le flux traité

C'est la quantité de dureté (exprimée en ppm de CaCO_3) à ajouter directement dans le flux traité. Cette valeur doit être plus élevée pour compenser la dureté de l'autre flux, car le flux total est divisé en deux parties : 40 % de l'eau passe par la reminéralisation, tandis que les 60 % restants doivent être mélangés avec le premier flux. Cela garantit une dureté suffisante après le mélange des deux flux.

Elle est calculée en divisant la dureté à ajouter dans le mélange sur le pourcentage du flux traité (40%)

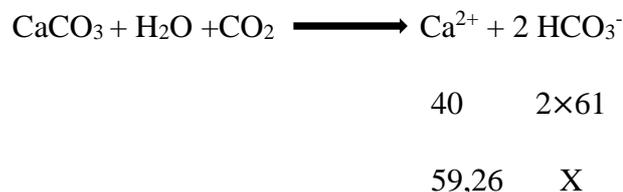
d) Ca^{2+} à ajouter dans le flux traité

C'est la quantité d'ions calcium à ajouter dans le flux traité, exprimée en termes de ppm CaCO_3 . Cette valeur est souvent identique à la dureté calcique (CaH) nécessaire pour la reminéralisation.

f) HCO_3^- à produire dans le flux secondaire traité

C'est la quantité d'ions bicarbonate (HCO_3^-) à produire dans le flux secondaire traité. Ces ions sont produits lorsque le carbonate de calcium (CaCO_3) réagit avec le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau.

Elle est calculée en se basant sur la réaction :

**g) CaCO_3 dissous dans le courant traité**

C'est la quantité de carbonate de calcium dissous dans le courant traité. Cette valeur est similaire à celle du CaCO_3 produit dans le flux secondaire traité, ce qui indique une dissolution complète dans le courant latéral.

Tous les résultats des calculs précédents sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.6. Les résultats du calcul des besoins

Paramètres	Unités	Valeurs	Valeurs
température	°C	12	28
TH final (après reminéralisation dans le mélange final)	ppm de CaCO ₃	67	75
La dureté à ajouter dans le mélange	ppm de CaCO ₃	59,26	57,37
La dureté à ajouter dans le flux traité	ppm de CaCO ₃	148,15	143,43
Ca ²⁺ à ajouter dans le flux traité	ppm	59,26	57,3
HCO ₃ ⁻ à produire dans le flux traité	ppm de CaCO ₃	180,74	174,77
CaCO ₃ dissous dans le courant traité	ppm CaCO ₃	148,15	143,43

IV.4.3. Calcul les besoins en CO₂ :

a) Besoins en CO₂ dans le flux secondaire traité

La concentration de CO₂ nécessaire dans le flux pour atteindre les objectifs de traitement, elle est calculée en se basant sur la réaction chimique



$$100 \qquad 44$$

$$148,15 \qquad X$$

b) CO₂ à doser (réaction stœchiométrique) dans le flux latéral traité

La quantité de CO₂ qui va effectivement réagi, ajustée en fonction de l'efficacité stœchiométrique.

c) CO₂ non réagi dans le flux latéral traité

C'est la quantité de CO₂ qui n'a pas réagi dans le flux latéral traité.

d) CO₂ à ajouter dans le flux latéral traité

La quantité de CO₂ à ajouter dans le flux traité pour compenser la pureté. Elle est calculée en divisant le CO₂ réagi sur la pureté.

e) La masse de CO₂ à doser (pureté 99%)

La quantité de CO₂ à doser en prenant en compte la pureté du gaz utilisé et le débit traité, exprimée en kg/h.

$$\text{La quantité de CO}_2 \text{ (kg/h)} = \frac{\text{les besoins en CO}_2 \times \text{le débit}}{\text{la pureté}}$$

f) CO₂ dosé par jour

La quantité totale de CO₂ dosée par jour, exprimée en kg/jour.

$$\text{CO}_2 \text{ dosée par jour (kg / d)} = \text{CO}_2 \text{ à doser par heure} \times 24$$

Ce tableau ci-dessous résume les résultats de divers paramètres liés au dosage et à l'efficacité du CO₂ dans le processus de reminéralisation de l'eau.

Tableau IV.7. Les résultats des paramètres liés au dosage du CO₂.

Paramètres	unités	valeurs	Valeurs
Besoins en CO ₂ dans le flux secondaire traité	mg/l	65,19	63,03
Efficacité de l'estequiométrie	%	95	95
Pureté du CO ₂	%	99	99
CO ₂ à doser (réaction estequimétrique) dans le flux latéral traité (CO ₂ qui a réagi)	mg/l	64,6	62,4
CO ₂ à ajouter dans le flux latéral traité	mg/l	68	65,68
CO ₂ non réagi dans le flux latéral traité	mg/l	3,4	3,28
CO ₂ à doser (pureté 99%)	kg/h	340,0	328,4

CO ₂ dosé par jour	kg/d	8160	7881,6
Autonomie	Jours	30	
Quantité de stockage	Ton	245	
Nombre de réservoir	Unité	3	
Quantité de stockage par réservoir	Ton	81,7	

Pour garantir une autonomie de 1 mois, on installera 3 réservoirs de capacité minimale 81 tonnes. Le dioxyde de carbone sera injecté dans un flux d'eau de perméat sous pression. Ce courant sous pression qui contient du dioxyde de carbone sera ensuite mélangé au débit total à traiter dans les lits de calcite.

IV.4.4. Calcul des dimensions de l'ouvrage (lit calcite) :

a) Débit de dimensionnement :

Il s'agit de la proportion du débit total de perméat (40 %) plus une marge de 10 % pour tenir compte des variations et des incertitudes du débit.

$$\text{Donc} \quad Q_{\text{Dim}} = Q_{\text{permeat}} \times \left(1 + \frac{\text{la marge}}{100}\right)$$

b) Temps de contact :

C'est le temps que l'eau passe en contact avec la calcite dans les filtres.

Le temps de contact typique pour un lit de calcite est de 10 à 15 minutes. Cela dépend de la qualité de l'eau et des objectifs de reminéralisation.

Dans notre station, on prend

c) Vitesse de passage :

La vitesse de passage de l'eau à travers le lit de calcite doit être suffisamment lente pour permettre une dissolution efficace du carbonate de calcium mais suffisamment rapide pour éviter la précipitation excessive de calcium sur la surface du lit.

On fixe la vitesse de passage : $V=11$ m/s

d) Nombre de filtres:

Le nombre de filtres est choisi en fonction de la taille et l'espace disponible pour l'installation.

Si moins de filtres étaient utilisés, ils auraient des dimensions plus grandes, ce qui peut poser des problèmes pratiques.

Si plus de filtres étaient utilisés, ils prendraient trop de place, ce qui pourrait ne pas être optimal pour l'espace disponible.

En plus, ces filtres offrent une surface totale suffisante pour que l'eau passe à travers une quantité adéquate de calcite, assurant la reminéralisation souhaitée.

Ces filtres sont organisés en 2 lignes, chaque ligne contenant 8 filtres, pour un total de 16 filtres.

Cette disposition est choisie pour des raisons de conception structurelle et d'organisation spatiale, étant donné que les filtres sont en béton armé.

e) La surface d'un filtre S_{filtre} :

C'est la surface minimum qui peut être occupée par un filtre de calcite.

Elle est calculée en divisant le débit de dimensionnement par le produit de la vitesse de passage et du nombre de filtres.

$$\text{La surface } S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{Q_{\text{dimensionnement}}}{\text{vitesse de passage} \times \text{nombre de filtre}}$$

f) La longueur et la largeur :

Ces dimensions doivent respecter la proportion 2:1 et permettre une disposition efficace et une performance hydraulique optimale.

On fixe la longueur $L = 8\text{m}$

$$l = \frac{\text{surface d'un filtre}}{\text{longueur}} = 3,55 \text{ m}$$

Pour que ces dimensions soit sont pratiques et réalisable, on doit les ajustés.

On prend $l = 3,6 \text{ m}$

On doit recalculer les paramètres et assurer que la vitesse est dans les normes dans ces deux cas :

1- $Q = Q_{\text{dim}} = Q_{\text{max}}$

2- $Q = Q_{\text{produit}}$

Ce tableau présente les caractéristiques et les dimensions nécessaires des filtres de calcite.

Tableau IV.8. Les dimensions et calculs hydrauliques de l'ouvrage.

Les dimensions et calculs hydrauliques de l'ouvrage			
Paramètres	unités	Formules	Résultats
Débit d'eau produite	m ³ /h	Q	12500
Vitesse de passage	m/h	U	12
Temps de contact	s	t	15
% du débit de perméat à traiter	%	Q	40
Débit de perméat traité	m ³ /s	Q	5000
Nombre de filtre de calcaire	unités	N	16
La marge	%	Q	10
Le débit maximum	m ³ /s	Q	5500
La surface	m ²	S	28,645
Longueur	m	l	8
Largeur	m	L	3,6
Surface réelle	m ²	S	28,8
Vitesse réelle	m/s	U	11,94
La hauteur	m	H	3
Le volume	m ³	V	86,4

IV.5. Estimation des Quantités de CaCO₃ Consommées

a) Débit unitaire nominal :

C'est le débit de perméat que chaque lit de calcite est conçu pour traiter individuellement, en considérant que seulement 40 % du débit total de perméat est destiné à la reminéralisation.

Il est calculé en divisant ce débit par le nombre total de lits de calcite..

$$\text{Débit unitaire nominal} = \frac{\text{le débit d'eau à reminéraliser}}{\text{le nombre de lits de calcite}}$$

b) Débit unitaire maximum :

C'est le débit de perméat maximum que chaque lit de calcite est conçu pour traiter lorsque l'un des lits est en attente (hors service pour maintenance ou autres raisons). Pour le calcul de ce débit, on divise le débit de perméat à traiter par le nombre de lits de calcite en service, ce qui est généralement un lit de moins que le total installé.

c) Consommation de CaCO_3 pur par filtre (kg/h de CaCO_3) :

Il s'agit de la quantité de carbonate de calcium (CaCO_3) pur consommée par chaque filtre de calcite par heure. Cette valeur représente la masse de CaCO_3 nécessaire pour reminéraliser le perméat passant à travers un filtre, exprimée en kilogrammes par heure, en tenant compte du fait que le CaCO_3 utilisé est pur.

d) Consommation totale de produit commercial par filtre :

Cette valeur représente la masse de carbonate de calcium (CaCO_3) utilisé, prenant en compte la pureté commerciale du produit. Elle est exprimée en kilogrammes par heure et reflète la quantité réelle de matériau nécessaire, en fonction de la qualité et de la pureté du produit commercial utilisé.

Elle est calculée en devisant la quantité de CaCO_3 d'un seul filtre sur la pureté du produit.

e) Consommation journalière par filtre :

Elle correspond à la quantité de produit consommée par un filtre en une heure, multipliée par le nombre d'heures de fonctionnement par jour.

Le résultat trouvé indique la quantité totale de produit utilisée par jour pour ce filtre.

f) Consommation journalière des filtres :

Elle se réfère à la quantité totale de produit (comme le CaCO_3) utilisée par l'ensemble des filtres en une journée.

Elle est calculée en multipliant la consommation journalière par filtre par le nombre des filtres.

g) Consommation totale après 14 jours :

Il s'agit de la quantité totale de produit consommée par l'ensemble des filtres sur une période de 14 jours. Cette valeur est calculée en multipliant la consommation journalière totale des filtres par 14, ce qui permet de déterminer la quantité de produit nécessaire pour deux semaines d'opération continue.

Tableau IV.9. Les résultats des paramètres liés au dosage du CO₂.

Paramètres	Unités	Valeurs	Valeurs
Températures	°C	12	28
Débit unitaire nominal	m ³ /h	312,5	312,5
Débit unitaire maximum	m ³ /h	333,33	333,33
Consommation de CaCO ₃ pur par filtre	kg/h CaCO ₃	46,30	44,8
Consommation de CaCO ₃ pur par filtre (1 en attente)	kg/h CaCO ₃	49,38	47,81
Consommation de produit commercial par filtre	kg/h	48,73	47,18
Consommation de produit commercial par filtre (1 en attente)	kg/h	51,98	50,32
Consommation totale de produit commercial	kg/h	779,69	754,88
Consommation journalière par filtre	kg/d	1 169,52	1 132,32
Consommation journalière par filtre (1 stand-by)	kg/d	1 248,52	1 207,68
Consommation journalière des filtres	Kg/d	18 712,32	18 117,12
Consommation totale après 14 jours	kg/14 days	261 972,48	253 639,68
Consommation après 14 jours par filtre	kg/14 days	16 373,28	15 852
Consommation après 14 jours / filtre (1 stand-by)	kg/14 days	17 464,832	16 909,312

IV.6. Qualité de l'eau produit finale :

Les concentrations des ions dans l'eau avant son passage sur le lit de calcite restent globalement inchangées après le traitement, à l'exception de quelques paramètres clés. En

particulier, on observe une augmentation des ions calcium (Ca^{2+}), des bicarbonates (HCO_3^-), ainsi qu'une modification de la dureté, du TDS (Total Dissolved Solids) et de l'alcalinité. Ces variations spécifiques seront calculées individuellement par la suite afin de déterminer leurs nouvelles concentrations après reminéralisation.

a) La concentration de Ca^{2+} finale dans l'eau produite finale:

Elle est égale à la somme de la concentration initiale des ions calcium dans l'eau perméat et de la concentration de Ca^{2+} ajoutée pendant la reminéralisation dans le mélange final.

b) La concentration de HCO_3^- finale dans l'eau produite finale :

Tant qu'on connaît la concentration de Ca^{2+} (calcium) après le passage dans un lit de calcite, on peut utiliser la réaction de dissolution du carbonate de calcium (CaCO_3) dans l'eau :



D'après la stœchiométrie de la réaction, chaque molécule de Ca^{2+} produit 2 molécules de HCO_3^- , donc :

$$[\text{HCO}_3^-] = [\text{Ca}^{2+}] \times \frac{2 \times \text{La masse molaire du } \text{HCO}_3^-}{\text{Masse molaire de } \text{Ca}^{2+}}$$

Tel que :

La masse molaire de Ca^{2+} est 40,08 g/mol.

La masse molaire de HCO_3^- est 61 g/mol.

c) Détermination de l'alcalinité :

L'alcalinité est principalement calculée à partir de la concentration en HCO_3^- , et d'autres ions comme CO_3^{2-} et OH^- si présents en quantités significatives. Pour l'eau de traitement ou l'eau potable, le calcul basé sur HCO_3^- est souvent suffisant.

En considérant que l'alcalinité est principalement due aux bicarbonates, la formule simplifiée est :

$$\text{Alcalinité (en mg/L de } \text{CaCO}_3) = [\text{HCO}_3^-] \times \frac{50}{61}$$

Où :

- $[\text{HCO}_3^-]$ est la concentration des bicarbonates en mg/L.
- 50 est la masse équivalente de CaCO_3 en mg/L (correspondant à 1 meq/L).
- 61 est la masse molaire de HCO_3^- en g/mol.

Tableau IV.10. Bilan ionique du l'eau produit

Paramètres	Unités	Valeurs	Valeurs
Température	°C	12	28
TDS	mg/l	233	405
Ca ²⁺	mg/l	24,18	24,007
Dureté calcique	Ppm de CaCO ₃	60,45	60,02
Mg ²⁺	mg/l	1,59	3,62
TH	Ppm de CaCO ₃	67,05	75,09
HCO ₃ ⁻	mg/l	73,74	73,20
Alcalinité	mg/l de CaCO ₃	60,45	59,99
Na ⁺	mg/l	48,3	110
K ⁺	mg/l	2,456	5,587
SO ₄ ²⁻	mg/l	3,468	7,898
Cl ⁻	mg/l	79,2	180,3
NO ₃ ⁻	mg/l	0,0001	0,0001
B	mg/l	0,54	1,292
CO ₂ libre	mg/l	4,05	3,95

IV.7. Calcul des indices de saturations

a) Calcul du pH :

Il est calculé en se basant sur la formule suivante :

$$\text{pH} = 6,35 + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} \right)$$

- Pour une température T= 12°C on aura un Ph = 7,61
- Pour une température T= 28°C on aura un Ph = 7,62

b) Calcul du pH_s :

Le pH_s est une valeur critique dans le traitement de l'eau, en particulier pour éviter les problèmes d'incrustation ou de corrosion. Il est déterminé en tenant compte des solides dissous, de la température, de la dureté calcique et de l'alcalinité de l'eau.

$$\text{pH}_s = 9.3 + \text{TDSF} + \text{TF} - \text{CF} - \text{AF}$$

Avec :

- TDSF: Total dissolved solid factor
- TF: Temperature factor
- CF: Calcium hardness factor
- AF: Alkalinity factor

➤ **Détermination du TDSF (Total Dissolved Solids Factor) :**

Le TDSF dépend de la concentration totale des solides dissous dans l'eau. Il est généralement calculé à partir de la concentration en TDS en mg/L. Le TDSF est obtenu à partir de la relation $TDSF = \text{Log} ([TDS]-1) / 10$ ou de courbes spécifiques qui relient le TDS à un facteur.

Tableau. IV.11 : les valeurs de TDSF en fonction de TDS.

TDS	TDSF
100	0,2
150	0,21
200	0,23
300	0,24
400	0,26
600	0,28
800	0,29

➤ **Détermination du TF (Température Factor) :**

Le TF est lié à la température de l'eau. Il est obtenu à partir de la table ci dessous ou de la formule suivante qui relient la température (en °C) à un facteur de correction

$$TF = -13,12 \text{ Log} (T^{\circ}\text{C} + 273) +$$

Tableau. IV.12 : les valeurs de TF en fonction de la température.

Température	TF
14	2,3
17	2,24
20	2,18

23	2,13
26	2,07
29	2,01
30	2,18

➤ **Détermination du CF (Calcium Hardness Factor) :**

Le CF est calculé à partir de la concentration de dureté calcique $[Ca^{2+}]$ dans l'eau, souvent exprimée en mg/L de $CaCO_3$. Comme pour les autres facteurs, le CF est obtenu à partir de tables ou de la formule spécifique suivante : $CF = -\text{Log}(\text{dureté calcique mg/l de } CaCO_3)$

Tableau. IV.13 : les valeurs de TF en fonction de la température.

dureté calcique (mg/l)	CF
30	1,06
40	1,20
50	1,30
60	1,38
70	1,45
80	1,51
90	1,56

➤ **Détermination du AF (Alkalinity Factor) :**

L'AF dépend de l'alcalinité de l'eau, souvent exprimée en mg/L de $CaCO_3$. Ce facteur est également obtenu à partir ce tableau ou de cette formule : $CF = -\text{Log}(\text{alcalité mg/l de } CaCO_3)$

Tableau. IV.14 : les valeurs d'AF en fonction de l'alcalinité.

Alcalinité (mg/l de $CaCO_3$)	AF
30	1,48
40	1,60

50	1,70
60	1,78
70	1,85
80	1,90
90	1,95

- **Méthode de calcul :**

Une fois les quatre facteurs déterminés, ils sont insérés dans l'équation pour calculer le pHs.

• **Pour le premier cas :**

- TDS= 233 mg/L, ce qui donne TDSF=0.23
- Température T=12°, ce qui donne TF=2,23
- Dureté calcique =60,45 mg/L de CaCO₃, ce qui donne CF=1,78.
- Alcalinité HCO₃⁻=60,45 mg/L de CaCO₃, ce qui donne AF=1,78

Le pHs serait alors calculé comme suit :

$$\text{pHs} = 9,3 + 0,23 + 2,23 - 1,78 - 1,78 = 8,2$$

• **Pour le deuxième cas :**

- TDS=405mg/L, ce qui donne TDSF=0.26
- Température T=28°, ce qui donne TF=2,03
- Dureté calcique =60,02 mg/L de CaCO₃, ce qui donne CF=1,77.
- Alcalinité HCO₃⁻=59,99 mg/L de CaCO₃, ce qui donne AF=1,77.

Le pHs serait alors calculé comme suit :

$$\text{pHs} = 9.3 + 0.26 + 2,03 - 1.77 - 1.77 = 8.05$$

c) **Calcul de l'index de saturation de langelier :**

Paramètres	Valeurs
LSI _{min}	- 0,59
LSI _{max}	- 0,43

Les calculs ont révélé que les valeurs de l'indice de saturation de Langelier (LSI) minimum et maximum se situent en dehors des normes acceptables. Cela indique que l'eau du produit

final présente un potentiel de déséquilibre qui pourrait conduire à la corrosion ou à l'entartrage des installations. Pour rectifier cette situation, il sera nécessaire d'ajuster le pH de l'eau en ajoutant de la soude caustique NaOH (son nom chimique est l'hydroxyde de sodium), afin de ramener les valeurs du LSI dans les limites recommandées, assurant ainsi la stabilité chimique de l'eau.

IV.8. Ajustement du pH :

Comme mentionné précédemment, pour ajuster le pH de l'eau, nous utiliserons de la soude caustique (NaOH) afin de le ramener dans la plage souhaitée, garantissant ainsi la conformité avec les normes de potabilité.

a) NaOH nécessaire pour neutraliser tout le CO₂ libre,

Cette valeur représente la quantité de NaOH nécessaire pour réagir avec tout le CO₂ libre présent dans l'eau.

En se basant sur la réaction chimique, une quantité précise de NaOH est requise pour neutraliser le CO₂ dissous.



Dans cette réaction, chaque mole de NaOH réagit avec une mole de CO₂ pour former une mole de NaHCO₃.

b) Le pourcentage de CO₂ libre réagi :

Ce pourcentage indique la proportion de CO₂ libre qui a réagi avec le NaOH ajouté.

On le détermine en utilisant la même réaction chimique, on obtient :



$$\begin{array}{cc} 44 & 40 \\ X & 2,80 \end{array}$$

On trouve X = 3,08 mg/l

Il est calculé en divisant la quantité de CO₂ qui réagit avec le dosage de NaOH par la quantité totale de CO₂ libre, puis en multipliant par 100 pour obtenir un pourcentage.

c) Calcul HCO_3^- produit par l'ajout de $\text{Na}(\text{OH})$:

Pour calculer la quantité de HCO_3^- produite par l'ajout de NaOH , nous devons utiliser l'équation chimique de la réaction de neutralisation précédente.

Pour chaque mole de NaOH ajoutée, une mole de NaHCO_3 est formée. Cela signifie que la quantité de HCO_3^- produite est équivalente à la quantité de NaOH ajoutée.

$$\text{HCO}_3^- \text{ produite (mg/l)} = \frac{C_{\text{NaOH}} \times 61}{40}$$

d) Calcul de la quantité de CaCO_3 produit :

L'ajout de NaOH peut neutraliser le dioxyde de carbone CO_2 et produire du bicarbonate HCO_3^- , qui peut ensuite réagir avec le calcium pour former du carbonate de calcium CaCO_3 .

La réaction est la suivante : $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Selon la stœchiométrie de la réaction, 1 mole de Ca^{2+} réagit avec 2 moles de HCO_3^- pour produire 1 mole de CaCO_3 .

Masse de CaCO_3 produit = molarité de HCO_3^- \times masse molaire de CaCO_3

Masse de CaCO_3 produit = $\frac{\text{HCO}_3^- \text{ produit par l'ajout de Na(OH)}}{\text{masse molaire du HCO}_3^-}$ \times masse molaire de CaCO_3

Masse de CaCO_3 produit = $0.07 \text{ mmol/L} \times 100 \text{ g/mol} = 7 \text{ mg/l}$

e) Calcul de la quantité du CO_2 libre restante :

Cette valeur indique la concentration de CO_2 libre restante après le traitement.

Après avoir réagi avec 71 % du CO_2 libre initial, il reste 29 % mg/L de CO_2 non réagi dans l'eau.

f) Calcul du TDS finale :

Le calcul du TDS final se fait en utilisant la formule suivante :

$$\text{TDS finale} = \text{TDS après lit calcite} + [\text{HCO}_3^-] \text{ produit} + [\text{Na}^+] \text{ produit.}$$

g) Calcul de l'alcalinité finale :

Elle correspond à l'alcalinité après passage dans le lit de calcite, additionnée du CaCO_3 produit par l'ajout de NaOH .

Tableau IV.15. Les Paramètres de l'eau Après Traitement et Ajustement du pH

Paramètres	Unités	valeur	Valeurs
CO ₂ libre	mg/l	4,05	3,95
Na(OH) nécessaire pour tout CO ₂ libre	mg/l	3,68	3,59
Dosage de Na(OH)	mg/l	2,80	2,80
% de CO ₂ libre réagi	%	76%	76%
HCO ₃ ⁻ produit par l'ajout de Na(OH)	mg/l	4,27	4,27
HCO ₃ ⁻ finale	mg/l	78,01	77,47
CaCO ₃ produit	mg/l	7	7
Na ⁺ produit	mg/l	1,61	1,61
Na ⁺ finale	Mg/l	49,91	111,61
CO ₂ libre	mg/l	0,98	0,86
TDS finale	mg/l	238,89	410,88
pH		8,25	8,3
Dureté totale	Ppm de CaCO ₃	67	74,92
alcalinité	Ppm de CaCO ₃	66,9	66,5
p _{hs}		8,27	8

h) Calcul de l'indice de saturation :

Souvent calculé sous forme de l'Indice de Langelier (LSI) qui se définit par la formule

$$LSI = pH - pH_s$$

Et les résultats sont mentionnés dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.16. Résultats du LSI pour Différentes Températures

Paramètres	Résultat	Résultat
Température	12	28
LSI	-0,01	0,3

Puisque le LSI calculé et le pH final de l'eau produite sont tous deux dans les plages exigées (LSI entre -0,4 et 0,4, et pH entre 8 et 8,5), cela indique que l'eau du produit final est bien

équilibrée. Elle ne présente ni tendance à la corrosion ni à la formation excessive de dépôts de carbonate de calcium. Cela garantit que l'eau est stable et appropriée pour son utilisation finale, minimisant ainsi les risques pour les installations et assurant une qualité optimale du produit.

IV.9. Consommation de NaOH :

Cette section détaille la quantité de soude caustique (NaOH) nécessaire pour ajuster le pH de l'eau à un niveau souhaité. La consommation de NaOH est calculée en fonction de la dose requise pour neutraliser le CO₂ libre et atteindre les normes de potabilité.

Tableau IV.17. Consommation de NaOH pour le Traitement de l'eau

Paramètres	Unités	Résultat	Résultat
Débit total traité	m ³ /h	12500	12500
Dose de NaOH	mg/l	2,8	2,8
Consommation horaire	Kg/h	35	35
Consommation journalière	Kg/j	840	840

Conclusion :

Ce chapitre a présenté le dimensionnement du post-traitement par lit de calcite, avec un focus sur les quantités de CaCO₃ et de NaOH nécessaires pour reminéraliser l'eau perméat. Les calculs ont permis de déterminer les dimensions optimales des filtres et la quantité de réactifs nécessaires pour obtenir une eau de qualité potable.

Les indices de saturation, tels que l'indice de Langelier (LSI), ont été vérifiés et les résultats se situent dans les normes de potabilité. Cela confirme que le système est bien conçu pour assurer une reminéralisation efficace, tout en maintenant la stabilité chimique de l'eau finale.

CHAPITRE V :

**Comparaison technico-
économique entre les différents
matériaux utilisés**

Introduction

La reminéralisation des eaux de perméat issues de l'osmose inverse est essentielle pour garantir la potabilité de l'eau dessalée. Ce chapitre compare deux méthodes courantes, utilisant la dolomite et la calcite, en se concentrant sur les coûts de mise en œuvre et d'exploitation, ainsi que sur la qualité de l'eau produite. L'objectif est de déterminer laquelle de ces deux approches offre le meilleur compromis en fonction des besoins spécifiques des stations de dessalement.

V.1. Comparaison détaillée entre la dolomite et la calcite :

Cette section explore les différences et similitudes entre la dolomite et la calcite en tant que matériaux de reminéralisation dans le post-traitement des eaux de perméat d'osmose inverse. La comparaison s'articule autour de plusieurs critères clés, notamment la composition chimique, la réactivité avec le CO_2 , les coûts d'acquisition et d'exploitation, la qualité de l'eau produite, l'impact sur la santé des consommateurs, ainsi que les effets environnementaux associés à leur utilisation. L'objectif est de fournir une analyse complète qui permet de déterminer l'approche la plus adaptée aux besoins spécifiques des stations de dessalement.

V.1.1. Composition Chimique :

Cette sous-section examine la composition chimique de la dolomite et de la calcite, deux minéraux utilisés pour la reminéralisation des eaux de perméat. Elle met en lumière les éléments constitutifs de chaque minéral et explique comment leur composition influence la libération d'ions dans l'eau, impactant ainsi la dureté et la qualité de l'eau traitée.

- **Dolomite :**

La dolomite est un minéral appartenant à la classe des carbonates, plus précisément un carbonate double de calcium et de magnésium. Sa formule chimique est $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, ce qui signifie qu'elle est composée d'ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} , liés à des groupes carbonate CO_3^{2-} . Lorsqu'elle se dissout, la dolomite libère simultanément du calcium et du magnésium dans l'eau, ce qui augmente non seulement la dureté calcique mais aussi la dureté magnésienne, contribuant à une reminéralisation plus équilibrée.

- **Calcite :**

La calcite est un carbonate de calcium pur, avec la formule chimique CaCO_3 . Elle est composée exclusivement d'ions calcium Ca^{2+} et d'ions carbonate CO_3^{2-} . En se dissolvant, la

calcite libère uniquement du calcium dans l'eau, ce qui augmente principalement la dureté calcique de l'eau.

V.1.2. Réaction avec le CO₂ :

- **Pour la dolomite :**

Lorsque la dolomite entre en contact avec l'eau enrichie en CO₂, elle commence à se dissoudre en libérant des ions de calcium Ca²⁺ et magnésium Mg²⁺. La présence de CO₂ dans l'eau forme de l'acide carbonique H₂CO₃, qui réagit avec la dolomite.

La dolomite se dissout selon la réaction suivante :



Cette réaction est essentielle pour le processus de reminéralisation de l'eau, car elle augmente les concentrations de ces minéraux dans l'eau traitée.

La réaction de la dolomite est plus lente que celle de la calcite en raison de la solubilité relativement faible du magnésium comparée à celle du calcium. La présence de magnésium dans la dolomite ralentit le processus de dissolution, nécessitant parfois des temps de contact plus longs et des ajustements plus précis du pH pour atteindre les niveaux souhaités de reminéralisation.

- **Pour la calcite :**

La calcite, qui est un carbonate de calcium pur avec la formule chimique CaCO₃, réagit avec le dioxyde de carbone CO₂ dissous dans l'eau pour libérer des ions calcium Ca²⁺ et former des ions bicarbonate HCO₃⁻ qui servent à augmenter l'alcalinité de l'eau, ce qui contribue à stabiliser le pH et à rendre l'eau moins corrosive., et donc la réaction chimique globale peut être représentée comme suit :



La dissolution de la calcite est relativement rapide en raison de la solubilité du carbonate de calcium CaCO₃ dans l'eau acidifiée. Cette réaction est souvent plus rapide que celle de la dolomite, car le calcium est plus soluble que le magnésium. L'ajout de CO₂ favorise la dissociation de la calcite, facilitant une augmentation rapide de la concentration de calcium dans l'eau.

Contrairement à la dolomite, la calcite ne fournit pas de magnésium. Cela signifie que l'eau reminéralisée avec la calcite peut manquer de cet élément minéral important, qui joue un rôle dans plusieurs fonctions corporelles.

V.1.3. Des Quantités nécessaires et de la qualité de l'eau traitée avec la calcite et la dolomite:

Afin d'arriver à cet objectif, un logiciel assisté par ordinateur pour le calcul de l'équilibre calco-carbonique de l'eau basé sur le modèle de Legrand-Poirier sera utilisée pour optimiser la reminéralisation de l'eau dessalée. Cette application permettra de déterminer avec précision les quantités nécessaires de calcite et de dolomite pour atteindre les objectifs de qualité de l'eau, notamment en termes de dureté. En plus de cela, elle générera les bilans d'ions de l'eau produite après traitement, fournissant ainsi une vue d'ensemble complète des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Les résultats obtenus seront ensuite comparés pour évaluer l'efficacité des différents traitements et identifier la meilleure approche pour garantir une eau équilibrée et conforme aux normes de potabilité.

IV.1.3.1. Interface Graphique du Logiciel :

Le logiciel utilisé pour l'équilibre de l'eau dispose d'une interface graphique en Python structurée en trois étapes clés :

- La saisie des données.
- L'analyse de l'eau.
- Le traitement final.

Ces étapes sont présentées sous forme de fenêtres interactives, créées à l'aide de Qt Designer et gérées par PyQt5.

a) Saisie des Données Initiales de l'Eau

Dans cette première étape, on entre les données initiales de l'eau, telles que les concentrations en cations et en anions. Ces données peuvent être saisies dans différentes unités, comme mg/l, meq/l ou mmol/l. Une fois les informations saisies, le bouton "Calcul" permet de mettre à jour les valeurs affichées dans les champs correspondants. Le logiciel calcule également les concentrations de certains composés, tels que le CO₂ dissous (H₂CO₃), les ions bicarbonate (HCO₃⁻) et carbonate (CO₃²⁻), qui n'ont pas été directement introduits au départ. Après avoir validé ces données, on peut passer à l'étape suivante en cliquant sur "Suivant", ce qui ouvre la fenêtre de l'analyse de l'eau.

Pour commencer, j'ai saisi les données de départ (le bilan ionique du perméat en mmol/l) dans le logiciel, comme illustré dans les figures IV.1 ci-dessous.

Figure V.1 : Saisie des données initiales.

b) Analyse de l'Eau (Appréciation) :

Dans cette seconde étape, le logiciel évalue l'équilibre de l'eau en calculant le pH d'équilibre (pHs). Ce pH d'équilibre est ensuite comparé au pH mesuré de l'eau pour déterminer si celle-ci est susceptible d'être corrosive ou incrustante. Les résultats de cette analyse sont affichés à l'utilisateur, lui permettant d'ajuster les paramètres si nécessaire avant de passer à l'étape finale de traitement.

Dans notre cas, les résultats de l'analyse de l'eau saisis lors de la première étape sont présentés dans la figure ci-dessous.

Water appreciation

pH of saturation (pHS)
12.37901

Langelier index (LSI)
-6.209009999999999

Larson index (LRI)
157.86401644962302

Stiff and Davis index (S&DI)

Saturation index (SI)
0.0

Leroy index(LyR)
0.089029

Lambda
0.01888 mmol/

Appreciation based on LSI or S&DI or SI
Aggressive water

Appreciation based on Larson index
Corrosive water

Precedent Save Curve Next

Figure V.2 : La phase d'appréciation de l'eau

c) Étape de Traitement

Dans cette dernière étape, l'utilisateur sélectionne le type de traitement approprié pour ajuster l'eau agressive à son équilibre optimal. Les options de traitement disponibles incluent :

- l'ajout de chaux,
- l'ajout de soude,
- le traitement par dolomite non calcinée ($n=0,5$).
- la carbonatation.

Une fois le traitement choisi, un clic sur le bouton "Calcul" génère les quantités de réactifs nécessaires ainsi que les caractéristiques de l'eau après traitement, permettant d'assurer que l'eau traitée atteint l'équilibre souhaité.

Dans notre cas, nous allons opter pour deux traitements : l'un par dolomite non calcinée et l'autre par calcite. Nous analyserons ensuite les quantités de ces matériaux nécessaires ainsi que le bilan ionique de l'eau après leur utilisation, et nous comparerons les résultats obtenus.

- **Par la calcite :**

Les résultats de l'analyse après le traitement par la calcite sont présentés dans la figure ci-dessous. Cette figure illustre les quantités de calcite utilisées, ainsi que les modifications apportées aux paramètres de l'eau, y compris le bilan ionique et la nouvelle dureté de l'eau. Ces résultats permettent de visualiser l'efficacité du traitement par calcite dans l'atteinte de l'équilibre souhaité.

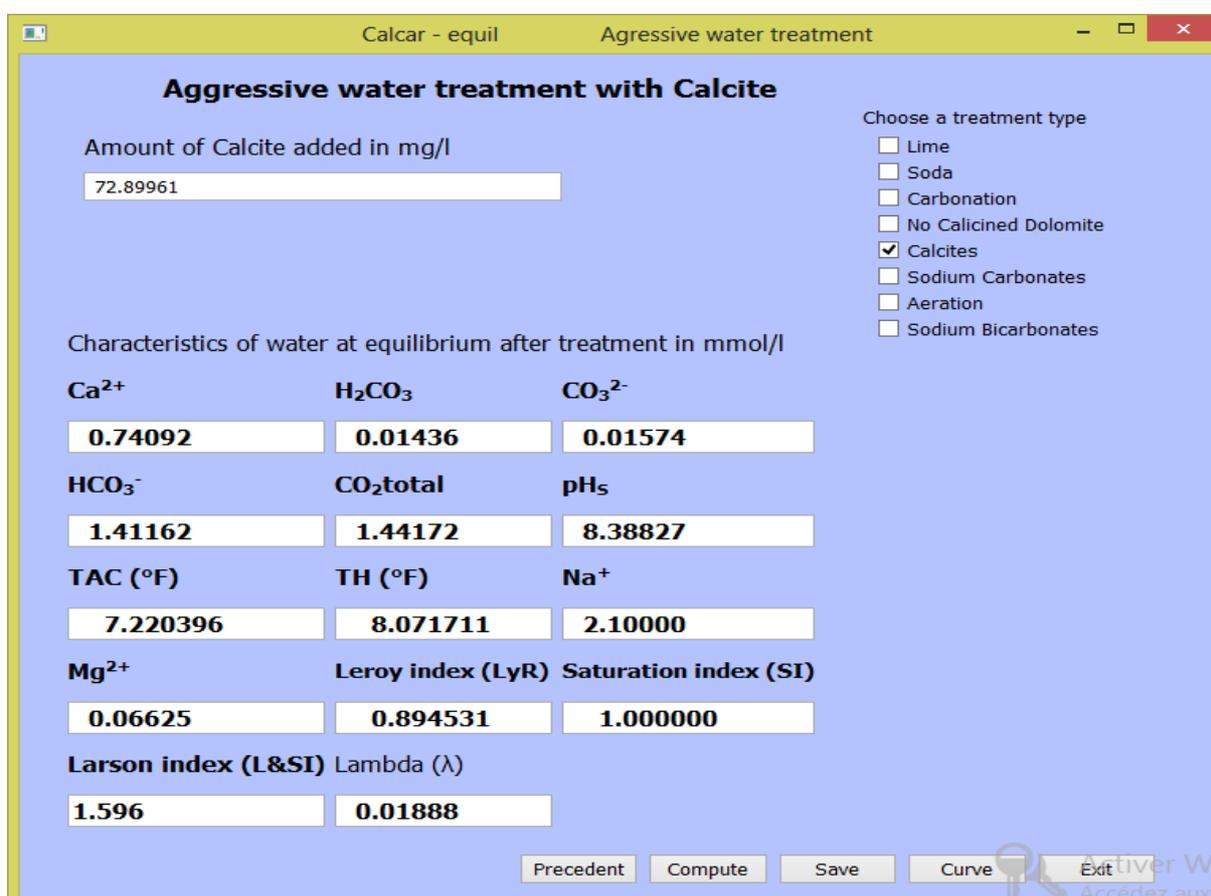


Figure V.2 : Les résultats du traitement de l'eau par la calcite

La quantité obtenue par le logiciel est exprimée en mg/l, et nous allons calculer la quantité totale de calcite nécessaire pour l'ensemble des filtres en kg/j, comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau V.1. : La quantité journalière de CaCO₃ consommées par les filtres

Paramètres	Unités	Résultat
Température	°C	12
CaCO ₃ ajouté	Mg/l	72,899
Consommation journalière des filtres	Kg/d	21869,7

• Avec la dolomite :

La figure ci-dessous présente les résultats obtenus après le traitement de l'eau avec de la dolomite non calcinée. Elle illustre les quantités de dolomite ajoutées ainsi que les effets sur les paramètres de l'eau, y compris les changements dans le bilan ionique et l'ajustement de la dureté, de manière similaire à la section précédente utilisant la calcite.

Ces données permettent d'évaluer comment l'utilisation de la dolomite non calcinée contribue à atteindre un état d'équilibre optimal pour l'eau.

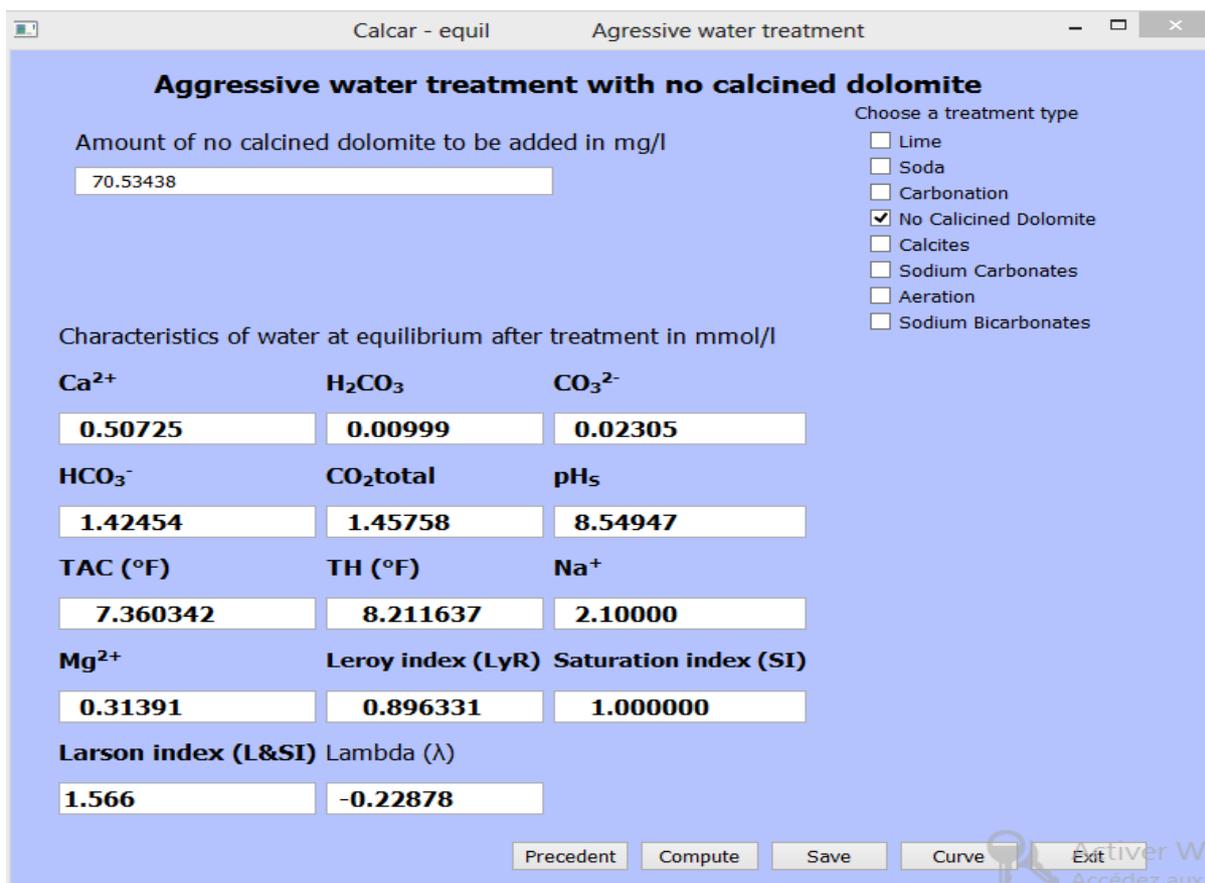


Figure IV.2 : Les résultats du traitement de l'eau par la dolomite

Le logiciel fournit la quantité requise de dolomite en mg/l. Nous procéderons à convertir cette quantité en une consommation totale quotidienne pour tous les filtres, exprimée en kg/j, comme le montre le tableau suivant.

Tableau V.2. : La quantité journalière de la dolomite consommée par les filtres

Paramètres	Unités	Résultat
Température	°C	12
dolomite ajouté	Mg/l	70,534
Consommation journalière des filtres	Kg/d	21160,2

A propos des quantités, le logiciel a révélé que 72,899 mg/l de CaCO_3 sont nécessaires avec la calcite, contre 70,534 mg/l avec la dolomite, montrant ainsi que la dolomite nécessite une quantité légèrement inférieure. En termes de consommation quotidienne, les filtres nécessitent 21 869,7 kg/j de calcite, tandis que la dolomite en demande 21 160,2 kg/j, ce qui indique que la dolomite requiert un peu moins de matière que la calcite pour le même processus.

A propos la qualité d'eau produite, les observations montrent que le TAC est légèrement supérieur après traitement avec la dolomite, tout comme la TH, indiquant une dureté totale plus élevée. La concentration en calcium est plus importante après traitement avec la calcite, ce qui est attendu étant donné que la calcite est principalement constituée de CaCO_3 , tandis que la dolomite augmente significativement la concentration en magnésium, en raison de la présence de MgCO_3 . Le pH d'équilibre est plus élevé avec la dolomite, suggérant une eau légèrement plus alcaline. Enfin, les deux traitements atteignent un indice de saturation identique, indiquant un équilibre similaire en termes de potentiel de corrosion ou d'incrustation.

À la lumière des résultats obtenus, il est clair que les deux matériaux, la calcite et la dolomite, offrent des performances similaires en termes de quantités nécessaires pour atteindre l'équilibre de l'eau après traitement. Cependant, la calcite présente plusieurs avantages notables qui justifient sa préférence dans les processus de reminéralisation des stations de dessalement. Sa pureté élevée garantit une meilleure maîtrise des réactions chimiques, ce qui se traduit par une efficacité accrue et une meilleure stabilité du traitement. En revanche, la composition incertaine de la dolomite, qui contient déjà de la calcite mais dont les proportions exactes des composants sont méconnues, peut engendrer des variations dans les résultats de traitement,

rendant le contrôle de la qualité plus complexe. Ainsi, bien que les différences quantitatives entre les deux matériaux soient minimales, la calcite s'impose comme le choix privilégié pour assurer une qualité constante et fiable de l'eau reminéralisée.

V.1.4. Comparaison des Coûts de Consommation

Cette partie permet de comparer facilement les coûts de consommation entre la calcite et la dolomite, en tenant compte des taxes applicables.

- **De la calcite :**

Le coût total dépend du prix unitaire de la calcite et se calcule selon la formule suivante ;

$$\text{Coût total} = \text{Quantité totale (kg)} \times \text{Prix unitaire (DA/kg)}$$

Sachant que le prix d'une (1) tonne de la calcite est de 2600 DA hors taxes

Tableau V.3. Le cout de consommation de la calcite

Paramètres	unités	résultat
prix unitaire	DA/kg	2,6
Prix total hors taxes	DA	56861,22
Les taxes	%	19
Prix totale TTC	DA	67664,85

- **De la dolomite :**

Le coût total dépend du prix unitaire de la calcite et se calcule selon la formule suivante ;

$$\text{Coût total} = \text{Quantité totale (kg)} \times \text{Prix unitaire (DA/kg)}$$

Sachant que le prix d'une tonne de dolomite est de 9800 DA

Tableau V.4. Le cout de consommation de la calcite

Paramètres	unités	résultat
prix unitaire	DA/kg	9,8
Prix total hors taxes	DA	207369,96
Les taxes TVA	%	19
Prix total	DA	246770,25

La comparaison des coûts de consommation montre une différence significative entre la calcite et la dolomite. Le prix unitaire de la dolomite est beaucoup plus élevé que celui de la calcite (9800 DA/tonne contre 2600 DA/tonne), ce qui se reflète directement dans le coût total. En effet, le coût total hors taxes pour la dolomite est près de quatre fois supérieur à celui de la calcite (207 369,96 DA contre 56 861,22 DA). Même en tenant compte des taxes, cette différence reste marquée, rendant la dolomite nettement plus coûteuse.

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'identifier le matériau le plus adéquat pour la reminéralisation des eaux dessalées. L'analyse montre que la calcite, tout en étant économiquement plus avantageuse, enrichit l'eau en calcium de manière efficace. En revanche, bien que la dolomite apporte un enrichissement en magnésium et améliore légèrement la qualité de l'eau, son coût plus élevé et la complexité de sa composition la rendent moins attrayante. De plus, la pureté de la calcite, étant une source de calcium presque pure, permet un meilleur contrôle de la qualité du traitement. En conclusion, la calcite se révèle être le choix optimal, offrant un bon compromis entre coût, efficacité et pureté, contrairement à la dolomite, qui, malgré ses avantages, présente des coûts et des complexités supplémentaires.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous avons entrepris une analyse approfondie du dimensionnement du post-traitement pour la reminéralisation de l'eau dans les stations de dessalement, en se concentrant sur l'utilisation de la calcite et de la dolomite. Cette étude a permis de définir précisément les dimensions requises pour le lit de calcite, d'évaluer les quantités nécessaires de CaCO_3 , CO_2 , et NaOH , tout en réalisant une comparaison rigoureuse des coûts et des performances des deux matériaux.

Grâce aux données recueillies, nous avons déterminé que pour le dimensionnement du post-traitement, il est nécessaire d'installer 16 lits de calcite, chacun mesurant 8 mètres de longueur et 3,6 mètres de largeur, offrant ainsi une surface totale de 28,645 m² par lit. La hauteur de chaque lit est de 3 mètres, ce qui donne un volume global de 86,4 m³. La calcite choisie, d'une pureté de 95 % et d'un diamètre variant entre 3 et 5 mm, a permis d'établir les quantités nécessaires pour des températures minimales de 12°C et maximales de 28°C.

Pour dissoudre efficacement la quantité requise de calcite, il est impératif de réduire le pH de l'eau en ajoutant du CO_2 . Les résultats montrent que le CO_2 à doser dans le flux latéral traité est de 68 mg/l à température minimale (12°C) et de 65,68 mg/l à température maximale (28°C), avec une consommation totale de CO_2 de 8 160 kg/jour à 12°C et de 7 881,6 kg/jour à 28°C. La consommation de CaCO_3 pur par filtre est estimée entre 44,8 et 46,30 kg/h, ce qui conduit à une consommation journalière totale de 18 117,12 kg. Enfin, le dosage de NaOH nécessaire pour neutraliser le CO_2 libre est de 2,8 mg/l, avec une consommation totale de 840 kg/jour. Les indices de Langelier (LSI) obtenus sont conformes aux normes, confirmant ainsi que les quantités calculées sont appropriées pour assurer une eau de qualité optimale après traitement.

Nous avons effectué une simulation à l'aide d'une application pour déterminer quel matériau est le plus approprié. En termes de coût, la calcite s'est avérée plus économique, avec un coût total de 67 664,85 DA TTC, comparé à la dolomite, qui est nettement plus onéreuse avec un coût total de 246 770,25 DA TTC. La simulation a également montré que la calcite permet un meilleur contrôle de la concentration en calcium, tandis que la dolomite augmente la concentration en magnésium. Les deux matériaux offrent cependant une bonne qualité d'eau.

Pour finir, bien que la dolomite présente certains avantages en termes de qualité de l'eau, la calcite se distingue comme le choix le plus approprié pour la reminéralisation, grâce à son coût inférieur, son efficacité supérieure, et sa pureté remarquable.

J'espère que ce travail, malgré sa modestie, saura pleinement répondre à vos exigences et attentes.

Annexe

Tableau des paramètres avec valeurs indicatives

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/l platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux dessalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	μS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO ₃	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Manganèse	mg/l	50
	Phosphore	mg/l	5
	Potassium	mg/l	12
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
	Température	°C	25

Les références

Les références :

- [01] : Bessenasse Mohamed., (2006). Dessalement d'Eau de Mer : Étude de Trois Stations du Littoral Algérois.
- [02] : Amitouche., (2016). « Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur », université des sciences et de la technologie Mohamed Khider ,Biskra
- [03] : Maurel, A., (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2ème édition. TEC & DOC, 286 p.
- [04] : Bushnak, A., (2012). Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales. Rapport final, Gestion Intégrée Durable de l'Eau Mécanisme de Soutien (SWIM - SM).
- [05] : Lattemann, S., (2003). « Chemical impacts from seawater desalination plants: A case study of the northern Red Sea », Desalination, 152.
- [06] : PNUE, (2001). Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : Évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure, UNEP (DEC)/MED WG.183/Inf.6, Athènes.
- [07] : Fernandez-Torquemada, Y., & Sanchez-Lizaso, J.L., (2013). « Effects of salinity on seed germination and early seedling growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile », Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 119, p. 64-70.
- [08] : PNUE, (2001). « Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : Évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure », UNEP (DEC)/MED WG.183/Inf.6, Athènes.
- [09] : Arnoult & Fournier, (1999). Dessalement de l'eau de mer.
- [10] : Algérienne des Eaux, Formation à l'exploitation et à la maintenance des unités de dessalement d'eau de mer.
- [11] : Oualla Adil., (2006). « Projet d'évolution de la station de dessalement d'eau de mer par osmose inverse de l'île de Sein : Installation d'un module de récupération d'énergie par échange de pression ».
- [12] : Aroua, A., (1981). Problèmes de santé liés à l'hyper minéralisation de certaines eaux en Algérie. Séminaire sur la technologie appropriée à la déminéralisation de l'eau potable.
- [13] : Degremont, (1995). Mémento technique de l'eau, Suez, Vol. 1.
- [14] : Legrand, & Poirier, (1981). Les équilibres carboniques et l'équilibre calcocarbonique dans les eaux naturelles. Eyrolle.
- [15] : Moulin, P., & Roques, H., (2003). « Zeta potential measurement of calcium carbonate

- », *Journal of Colloid and Interface Science*, N. 261, pp. 115-126.
- [16] : Burnol, A., Duro, L., & Grive, M., (2006). « Chapitre A : éléments théoriques concernant le transfert de zinc, de cadmium et de plomb dans un dépôt pluvio-glaciaire carbonaté », INERIS-DRC, N°06-66246.
- [17] : Rejsek, F., (2002). *Analyse des eaux, aspect réglementaire et technique*. CRDP d'Aquitaine, France, 849 p.
- [18] : Elfil, H., (2006). *Phénomène d'entartrage : Système Calco-carbonique CaCO₃-CO₂-H₂O*, Centre de Recherche et des Technologie de l'eau, MEDREC.
- [19] : Raymond, D., (1997). *Le traitement des eaux*, 2ème éd. L'école polytechnique de Montréal, Canada.
- [20] : Nelson, N., & De Luca, A., (2023). *Remineralization and Stabilization of Desalinated Water*. CRC Press.
- [21] : Legube, B., Merlet, N., & Coll., (2009). *L'analyse de l'eau : Techniques modernes d'analyse chimiques, biologiques et microbiologiques des eaux*, 9e édition, Dunod, Paris.
- [22] : Cardot, C., (1999). *Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques*. Ed. Ellipse, Paris.
- [23] : Harkabus, N., (2006). « Étude de la mise à l'équilibre de l'eau avec diminution du potentiel du dissolution du plomb » mémoire fin d'étude, école nationale du génie de l'eau et de l'environnement du Strasbourg
- [24] : Shih, W. Y., Sutherland, J., Sessions, B., Mackey, E., & Walker, W. S. (2012). *Upflow Calcite Contactor Study: Final Report*. Texas Water Development Board, Austin, TX.

Webographie :

[W1] <https://kidiscience.cafe-sciences.org/articles/leau-sur-terre-quels-problemes/>

<https://www.oieau.fr/>

[W3] [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/pnue_dessalement_eau_de_mer_pays_mediterran
ee ns.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/pnue_dessalement_eau_de_mer_pays_mediterranee_ns.pdf)

[W2] <https://aphadolie.com/eau-potable-lor-du-21eme-siecle-video/>

[W4] [https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/eau-y-t-il-eau-douce-
monde 805/](https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/eau-y-t-il-eau-douce-monde-805/)

[W5] [https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-
saumatres/](https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres/)

[W6] <http://www.cleantektv.com>

[W8] <https://www.suezwaterhandbook.f>