

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR
HYDRAULICS



المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرباوي"

"The Mujahid Abdellah ARBAOUI"

ⵎⴰⵔⵓⵏ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵙⵉⵎⵓⵔ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : REUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES

THEME :

**DIMENSIONNEMENT DE LA CHAINE DE POST-
TRAITEMENT DE
LA STATION DE DESSALEMENT DE CAP-BLANC WILAYA
D'ORAN**

Présenté par :

AMAZOUZ SAOUSSEN

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
DERNOUNI Youcef	M.A.A	Président
KHALED HOULI Samia	M.A.A	Examinatrice
KHEDIM ALLAH Abderrahmane	M.A.A	Examinateur
TAFAT Leila	M.A.A	Examinatrice
HACHEMI ABDELKADER	M.C.A	Promoteur

Session Septembre 2024

Remerciements :

﴿ *Ils dirent: «Gloire à Toi! Nous n'avons de savoir que ce que Tu nous as appris. Certes c'est*

Toi l'Omniscient, le Sage ﴾ ﴿ Baqarah aya 32

Je tiens avant tout à exprimer ma profonde gratitude à Allah, qui m'a donné la force, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire malgré les obstacles et les difficultés.

Il m'importe ensuite d'exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Mr **HACHEMI ABDELKADER**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je souhaite également remercier chaleureusement l'équipe CTH Boumerdes pour leur aide précieuse, et en particulier **Mme BEN MOUHOUB LYDIA** directrice de l'antenne de Boumerdes pour ses conseils et son implication afin d'accéder à toutes les ressources nécessaires.

Je tiens de même à exprimer ma reconnaissance envers les ingénieurs de l'AEC pour leur aide et leur disponibilité. Sans oublier l'équipe du département exploitation de la direction DWT de l'entreprise GCB Dar El Beida à leur tête le chef du département **Mr BENMEDJENNAH SEDDAM HOUSSEIN** qui ont partagé leurs connaissances, leurs idées qui ont enrichi mon travail.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude, ainsi qu'à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces :

Je dédie mon modeste travail à mon cher père et ma chère mère qui m'ont soutenu, encouragé et tant sacrifié pour moi

A ma grand-mère aimante et généreuse

A mes frères et sœurs, source de ma joie et de mon inspiration

A mes amies qui m'ont accompagné tout au long de ce dur parcours plein d'obstacles, à nos moments partagés ensemble, à nos heures de révisions, à nos discussions et folies nocturnes

A mon adorable chat, fidèle compagnon de mes jours et mes nuits, mon bonheur

À celui qui illumine mes journées et inspire mes rêves

R

ملخص

يشكل نقص المياه العذبة تحديًا رئيسيًا للجزائر، و لتلبية هذا الطلب وضمان الأمن المائي، تتجه البلاد إلى موارد غير تقليدية مثل تحلية مياه البحر. محطة تحلية المياه الرأس الأبيض، قيد الإنشاء في ولاية وهران مثال على ذلك. إذا كانت تحلية المياه يسمح بإنتاج مياه صالحة للشرب من مياه البحر، فمن الضروري ضمان جودة هذه المياه المحلاة لجعلها مناسبة للاستهلاك البشري. هنا يأتي دور المعالجة النهائية، وهي مرحلة أساسية في عملية تحلية المياه التي تهدف إلى إزالة البقايا غير المرغوب فيها وإعادة تمعدن الماء لإعطائه الخصائص الحسية والمعدنية المطلوبة.

يهدف هذا البحث إلى تصميم المعالجة النهائية في محطة الرأس الأبيض، مع التركيز على ثلاث جوانب رئيسية تتمثل في تحديد طريقة إعادة المعدنة المثلى، أبعاد معدات المعالجة النهائية وصيانة المعدات.

يقترح البحث اعتماد تقنية إعادة التمدن باستخدام سرير الكالسيت، باستخدام 100٪ من المياه المعالجة المنتجة. **كلمات مفتاحية** المعالجة النهائية، تمعدن الماء، إعادة المعدنة المثلى.

Résumé

La pénurie d'eau douce constitue un défi majeur pour l'Algérie, pays confronté à un climat aride et à une forte croissance démographique. Pour répondre à cette demande et garantir la sécurité hydrique de sa population, le pays se tourne vers des ressources non conventionnelles telles que le dessalement de l'eau de mer. La station de dessalement de Cap Blanc, en cours de réalisation dans la wilaya d'Oran, en est une illustration concrète. Si le dessalement permet de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer, il est crucial de garantir la qualité de cette eau dessalée pour la rendre propre à la consommation humaine. C'est là qu'intervient le post-traitement, une étape essentielle du processus de dessalement qui vise à éliminer les résidus indésirables et à reminéraliser l'eau pour lui conférer les propriétés gustatives et minérales requises.

Le présent mémoire s'attache à dimensionner le post-traitement au sein de la station de Cap Blanc, en se concentrant sur trois aspects clés : la Détermination du procédé de reminéralisation optimal, le Dimensionnement des équipements de post-traitement, Ainsi que leur Maintenance. Le mémoire propose l'adoption d'une technique de reminéralisation par lit de calcite, utilisant 100% du perméat produit, Ce qui présente : Efficacité, Durabilité et Performance.

Mots clés : le post-traitement , reminéraliser l'eau , reminéralisation optimal.

Abstract

Freshwater scarcity is becoming a significant challenge for Algeria, a country facing an arid climate and high population growth. To meet this demand, the country is turning to seawater desalination, exemplified by the Cap Blanc plant under construction. While desalination produces drinking water, post-treatment is crucial to ensure its optimal quality for human consumption. This thesis focuses on designing the post-treatment at Cap Blanc, targeting three key aspects: remineralization process selection, equipment sizing, and maintenance. The thesis proposes a calcite bed remineralization technique utilizing 100% of the permeate produced. ensuring Efficiency, Sustainability and performance.

Key words : post-treatment , remineralization process , optimizing post-treatment

Table des matières :

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

Chapitre I: Ressources en eau et dessalement en Algérie

Introduction :	3
I.1 Ressources en eau superficielles et souterraine :	3
I.2 Les ressources en eaux non conventionnelles :	5
I.3 Historique du dessalement dans le monde :	6
I.4 Dessalement en Algérie :	8
4.1. Historique du dessalement en Algérie :	9
I.5 Enjeux et perspectives :	10
Conclusion.....	11

Chapitre II: Procédés de dessalement

Introduction	13
II.1 Définition détaillée du dessalement :	13
II.2 Caractéristiques des eaux marines et eaux saumâtres :	14
2.1. Les eaux marines :	14
2.2. Les eaux saumâtres :	17
II.3 Normes de potabilité	18
II.4 Techniques de dessalement :	20
4.1. L'osmose inverse :	21
4.1.1. Principe de l'osmose inverse.....	21
4.2. Les procédés de distillation	26
4.2.1. le procédé de distillation à détente étagée MSF :	26
4.2.2. Le procédé de distillation à multiples effets MED :	28
II.5 Facteurs influençant le choix de la technique de dessalement :	31
Conclusion :	32

Chapitre III: Les techniques de reminéralisation

Introduction :	34
III.1 Importance de la reminéralisation :	34
1.1. Définition de l'eau corrosive :	34
1.2. Définition de l'eau agressive :	34
1.3. Définition de l'équilibre calco-carbonique :	35
1.4. Facteurs influençant l'équilibre calco-carbonique :	36

III.2	Risques sanitaires d'une eau faiblement minéralisée :	37
III.3	Techniques de remineralisation :	38
3.1.	Remineralisation par l'ajout d'agents chimiques :	38
3.1.1.	L'ajout de calcium :	38
3.1.2.	Ajout de magnésium :	40
3.2.	Remineralisation par mélange d'eau dessalée et d'eau source :	40
3.3.	Remineralisation par dissolution des minerais naturels :	41
3.3.1.	Addition de calcium :	41
3.3.2.	Addition de dolomite :	42
	Conclusion :	42

Chapitre IV: Description de la zone d'étude

	Introduction :	45
IV.1	Définition de la station de dessalement cap blanc d'Oran :	46
IV.2	Etudes préliminaires :	47
2.1.	Evaluation de la pluviométrie :	47
IV.3	Évaluation de la population :	47
IV.4	Evaluation de la température :	48
IV.5	Prélèvement d'échantillons d'eau :	48
IV.6	Analyse des données :	51
6.1.	Température :	51
6.2.	Salinité :	51
6.3.	Oxygène dissout :	51
6.4.	PH :	51
6.5.	Conductivité :	51
6.6.	Turbidité :	51
IV.7	Description détaillée de la station :	52
7.1.	Prise d'eau de mer et station de pompage :	52
7.2.	Bac d'eau de mer et station de pompage :	53
7.3.	Prétraitement :	54
7.4.	Système de remineralisation :	55
	Cellule de calcite :	55
	Réservoirs d'eau produite :	55
	Pompes d'eau produite :	55
	Pompes d'eau potable :	55
	Bâche de neutralisation :	55
	Bâche de rejet :	56
	Conclusion :	56

Chapitre V: Dimensionnement de la chaine de post traitement

Introduction	58
V.1 Qualité de l'eau produite par le système de reminéralisation	58
V.2 Paramètres de conception	58
V.3 Calculs de dimensionnement des réservoirs a remineralisation	60
V.4 Sélection de l'équipement pour le process du système de reminéralisation :.....	61
V.5 Granulométrie et caractéristiques du lit de calcite :	62
5.1. Impact de la taille des grains de calcite sur la profondeur du lit :	62
V.6 Calcul du process du système de remineralisation :	62
6.1. Consommation de calcite :	62
6.2. Calcul du stockage de calcite	63
6.3. Consommation du dioxyde de carbone :	63
6.4. Vérification de la solubilité du dioxyde de carbone :	64
6.5. Stockage du dioxyde de carbone :	65
6.6. Vérification du PH de l'eau produite :	65
6.7. Calcul de la période de lavage à contrecourant :	65
6.8. Calcul du taux de récupération du réservoir de remineralisation :	66
6.9. Calcul de l'index de langelier :	66
V.7.Ajustement du pH :	67
7.1. NaOH nécessaire pour neutraliser tout le CO ₂ libre :	67
7.2. Le pourcentage de CO ₂ libre réagi :	68
7.3. Calcul HCO ₃ ⁻ produit par l'ajout de Na(OH) :	68
7.4. Calcul de la quantité de CaCO ₃ produit :	68
7.5. Calcul de la quantité du CO ₂ libre restante :	69
7.5.1.Calcul du TDS final :	69
7.5.2.Calcul du l'alcalinité finale :	69
V.8. Estimations de cout de la calcite :	70
Conclusion générale :	79
Bibliographie :	81

Liste des planches

Planche 1 :

Plan de masse de la station de dessalement de Cap Blanc .

Planche 2 :

Coupes de lit de calcite.

Planche3 :

Plan de PFD de la station.

Liste des figures

- figureI.1 Stress hydrique et capacité de désalinisation dans le monde
- figureI.2 Ressources en eau souterraine en Algérie et le Nord-Africain
- figureI.3 Les stations de dessalement en Algérie
- figureI.4 Capacité de dessalement des pays dans le monde
- figureI.5 Cout des projets de dessalement dans les pays d’Afrique du nord et le moyen orient.

- figure II .1. Composition chimique du sel d’eau de mer
- figure II .2. La température des eaux de surface des océans
- figure II .3. Les concentrations en sel des eaux des océans
- figure II .4. Le phénomène d’osmose inverse
- figure II .5. La composition d’une unité d’osmose inverse
- figure II .6. Skid composé de plusieurs membranes
- figure II .7. Le phénomène de la polarisation des membranes
- figure II .8. La composition d’une membrane
- figure II .9. Le récupérateur d’énergie et son principe de fonctionnement
- figure II .10. Principe de fonctionnement d’un système par détente successives (MSF) à 3 étages
- figure II .11. Schéma de principe d’un système d’évaporateurs multiples effets (MED)
- figure II .12. Schéma de principe d’une unité d’évaporation simple-effet avec compression de vapeur
- figure II .13. Évolution de la température d’ébullition de l’eau en fonction de la pression

- figure III .1. Conséquence d’une eau agressive sur les conduites
- figure III .2. Réservoir de stockage de dioxyde de carbone

- figure IV .1. La station de dessalement de Cap Blac depuis Google Earth
- figure IV .2. Les quantités de précipitations dans la wilaya d’Oran durant l’année
- figure IV .3. Représentation de la température pendant une année dans la Wilaya d’Oran
- figure IV .4. Représentation des points de prélèvement d’échantillons d’eau
- figure IV .5. Outils et méthode de prélèvement
- figure IV .6. Coupe d’un schéma du bassin de captage représentant le degriilleur et le tamis rotatif

- figure V .1. Coupe d’un schéma de lit de calcite
- figure V .2. Graphique représentant la solubilité du CO₂ en fonction de la température

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les différentes stations en Algérie et leur capacité de production

Tableau II.1. Comparaison des normes de potabilité algérienne sur les sels avec les recommandations de l'OMS

Tableau IV.1 Mesures in-situ au niveau de la zone d'étude

Tableau V.1 Paramètres de conception

Tableau V.2 Données du retro lavage

Tableau V.3 Données du rinçage a l'air

Tableau V.4 Caractéristiques de la calcite et du sable quartz

Tableau V.5 Paramètres de calcul du PH de saturation

Liste des abréviations

NTU : Unité standard de mesure de la turbidité. NTU < 5 : eau claire.

PH : potentiel hydrogène.

LSI :L'indice de saturation de Langelier.

TH : Titre hydrometrique.

TAC :Titre Alcalimétrique Complet.

TDS :Total Dissolved Solids Traduit de l'anglais-Le total des solides dissous .

OMS : Organisation mondiale de la santé.

MSF : La distillation multi-flash.

MED : La distillation à multiples effets .

OI : Osmose inverse .

ED : Electrodialyse.

Introduction générale :

La pénurie d'eau douce constitue l'un des défis majeurs du 21^{ème} siècle, accentué par le changement climatique et la pression démographique, cette crise menace la stabilité mondiale dans plusieurs secteurs. Face à cette situation, le dessalement d'eau de mer émerge comme une solution non conventionnelle cruciale pour répondre à la demande croissante d'eau potable et offrir une approche durable pour exploiter les vastes réserves d'eau salée dans le monde. C'est pourquoi l'utilisation des technologies de dessalement devient essentielle afin de garantir la distribution d'une eau de qualité optimale et cela en grande partie grâce à la reminéralisation des eaux dessalées effectué dans la partie post traitement d'une station de dessalement.

La station de dessalement de Cap Blanc, en cours de réalisation dans la wilaya d'Oran, en est une illustration concrète. Si le dessalement permet de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer, il est crucial de garantir la qualité de cette eau dessalée pour la rendre propre à la consommation humaine. C'est là qu'intervient le post-traitement, une étape essentielle du processus de dessalement qui vise à éliminer les résidus indésirables et à reminéraliser l'eau pour lui conférer les propriétés gustatives et minérales requises.

Le présent mémoire s'attache à optimiser le post-traitement au sein de la station de Cap Blanc, en se concentrant sur trois aspects clés : la Détermination du procédé de reminéralisation optimal, le Dimensionnement des équipements de post-traitement, Ainsi que leur Maintenance. Le mémoire propose l'adoption d'une technique de reminéralisation par lit de calcite, utilisant 100% du perméat produit, Ce qui présente : Efficacité, Durabilité et Performance.

Chapitre I:

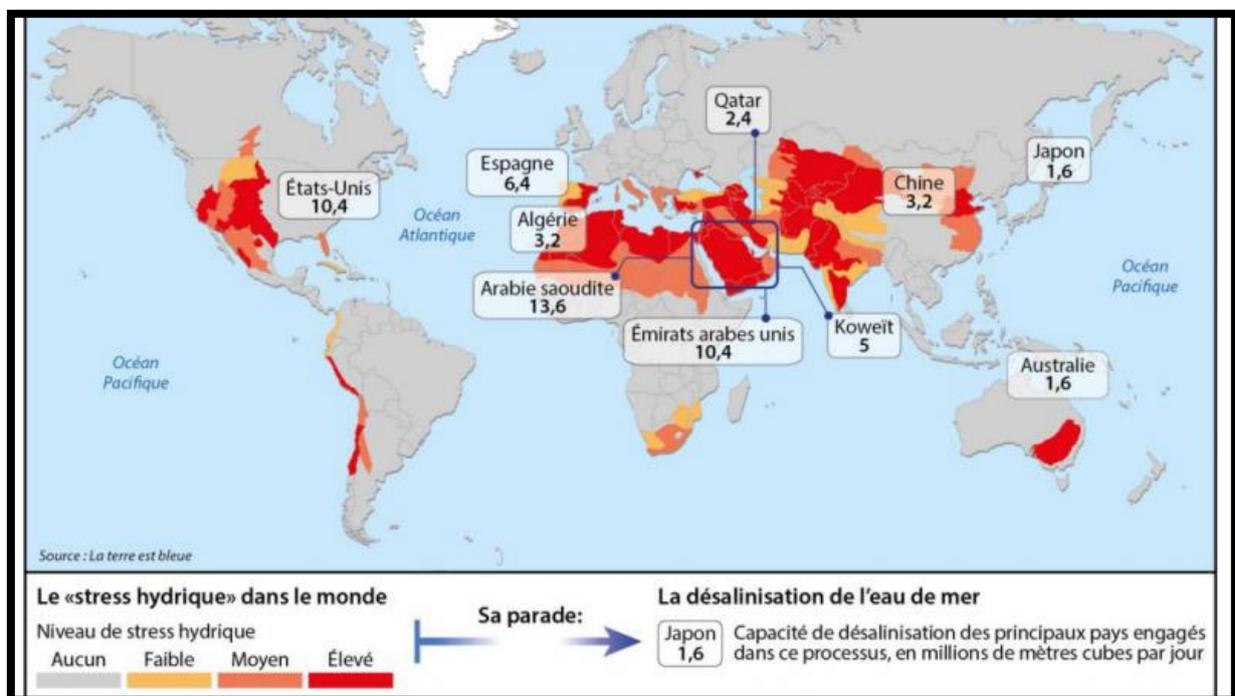
Ressources en eau et dessalement en Algérie

Introduction :

L'Algérie, pays d'Afrique du Nord majoritairement aride et semi-aride, se retrouve face à un défi de taille : la gestion durable de ses ressources en eau.

Confrontée à une rareté naturelle de l'eau et à une demande croissante due à la croissance démographique et à l'activité économique, l'Algérie doit jongler avec un éventail de sources d'eau et relever des défis complexes pour garantir la sécurité hydrique à long terme.

Voici une image qui représente le stress hydrique que connaît le monde et l'Algérie plus précisément durant ces dernières années :



figureI.1 *Stress hydrique et capacité de désalinisation dans le monde*
Source : defense.gouv.fr

I.1 Ressources en eau superficielles et souterraine :

L'Algérie présente une particularité hydrologique intéressante. Son territoire s'organise autour de cinq grands bassins hydrographiques majeurs, qui fonctionnent comme des systèmes naturels de collecte et de drainage des eaux. Ces bassins hydrographiques, à leur tour, regroupent 17 bassins versants plus petits, qui alimentent en eau les cours d'eau et les nappes phréatiques de la région. Cependant, l'abondance et la nature des ressources en eau ne sont pas uniformes à travers le pays. On observe une disparité notable à plusieurs niveaux.

La répartition géographique des ressources en eau est inégale. Les régions du nord de l'Algérie bénéficient généralement d'un meilleur approvisionnement en eau de surface grâce aux Oueds et aux lacs plus abondants qui représentent environ 10 milliards de mètre cube par An, ces eaux jouent un rôle crucial pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable et la production de l'hydroélectricité, malheureusement la variabilité saisonnière des cours d'eau, la pollution due aux activités humaines et l'impact du changement climatique sur les régimes pluviométriques complique la gestion durable de cette ressource.

En revanche, les régions du sud, plus arides, dépendent davantage des eaux souterraines, qui constituent la principale source d'eau renouvelable du pays estimées à environ 50 milliards de mètres cubes dont 20 milliards exploitables, souvent plus limitées en quantité à cause de la surexploitation due à l'irrigation intensive et à l'approvisionnement en eau potable menaçant la durabilité de cette ressource ainsi que la pollution due aux activités agricoles et industrielles, notamment l'intrusion d'eau salée dans les zones côtières, nécessite une gestion attentive pour préserver la qualité de l'eau souterraine.

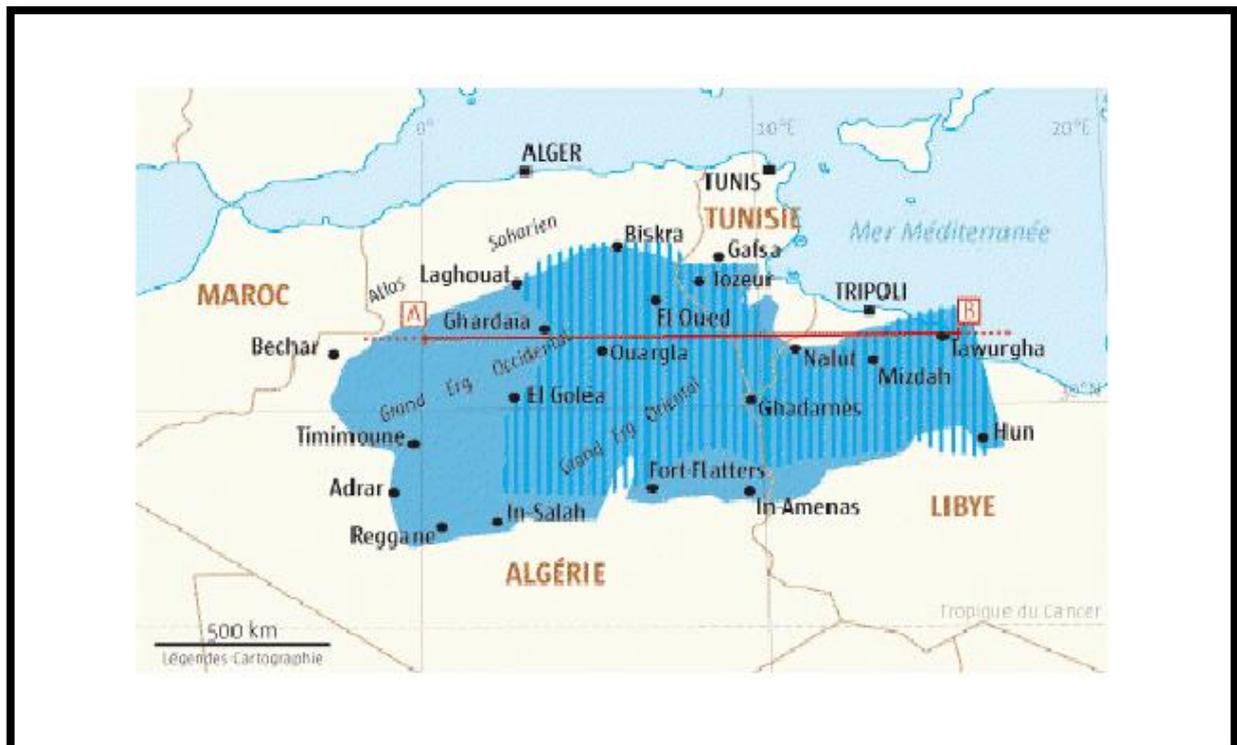


figure I.2 *Ressources en eau souterraine en Algérie et le Nord-Africain*
Source : researchGate.net par tchouar Noureddine

Il est important de noter que la quantité d'eau disponible varie considérablement d'une zone à l'autre. Certaines régions disposent de ressources en eau abondantes, tandis que d'autres en manquent cruellement. Ce déséquilibre est particulièrement préoccupant dans un contexte de

changement climatique et de croissance démographique croissante, de plus, la nature même de la ressource en eau diffère selon les régions. Les zones qui ont principalement accès aux eaux de surface, comme les rivières et les lacs nécessitent souvent un traitement avant d'être consommables. Les autres régions, en particulier dans le sud, dépendent davantage des eaux souterraines, qui sont généralement d'une bonne qualité mais plus vulnérables à la surexploitation et à la pollution.

I.2 Les ressources en eaux non conventionnelles :

Face à la rareté croissante des ressources en eau conventionnelles, l'Algérie se tourne de plus en plus vers les eaux non conventionnelles. Ces dernières regroupent les eaux usées traitées, les eaux de dessalement et les eaux pluviales. Le développement du traitement des eaux usées, l'augmentation des capacités de dessalement et la collecte des eaux pluviales offrent des opportunités prometteuses pour diversifier les sources d'approvisionnement en eau. Cependant, ces solutions alternatives présentent également des défis. Le coût élevé du traitement des eaux usées et du dessalement nécessite des investissements importants. La collecte des eaux pluviales, quant à elle, se heurte à des contraintes techniques et nécessite une infrastructure adéquate. De plus, les impacts environnementaux potentiels du dessalement, notamment le rejet de saumure concentrée, doivent être pris en compte.

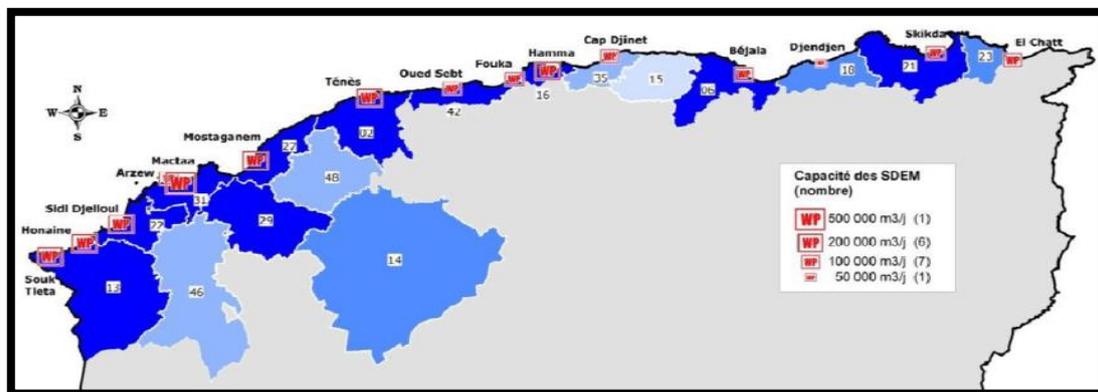


figure I.3 Les stations de dessalement en Algérie

Source : [researchGate.net](https://www.researchgate.net) par Ahmed Kettab

Pour faire face à ces défis, l'Algérie met en œuvre plusieurs stratégies pour une gestion durable de ses ressources en eau. La modernisation des infrastructures de distribution d'eau vise à réduire les pertes d'eau par fuites. La sensibilisation du public et des acteurs économiques à l'utilisation rationnelle de l'eau est également cruciale pour réduire la demande. En parallèle, le développement des ressources en eau non conventionnelles est encouragé afin de diversifier les

sources d'approvisionnement. L'adoption de pratiques agricoles plus efficaces en eau et la lutte contre la pollution de l'eau sont également des éléments clés de la stratégie algérienne.

I.3 Historique du dessalement dans le monde :

Le dessalement est une pratique qui remonte à l'Antiquité.

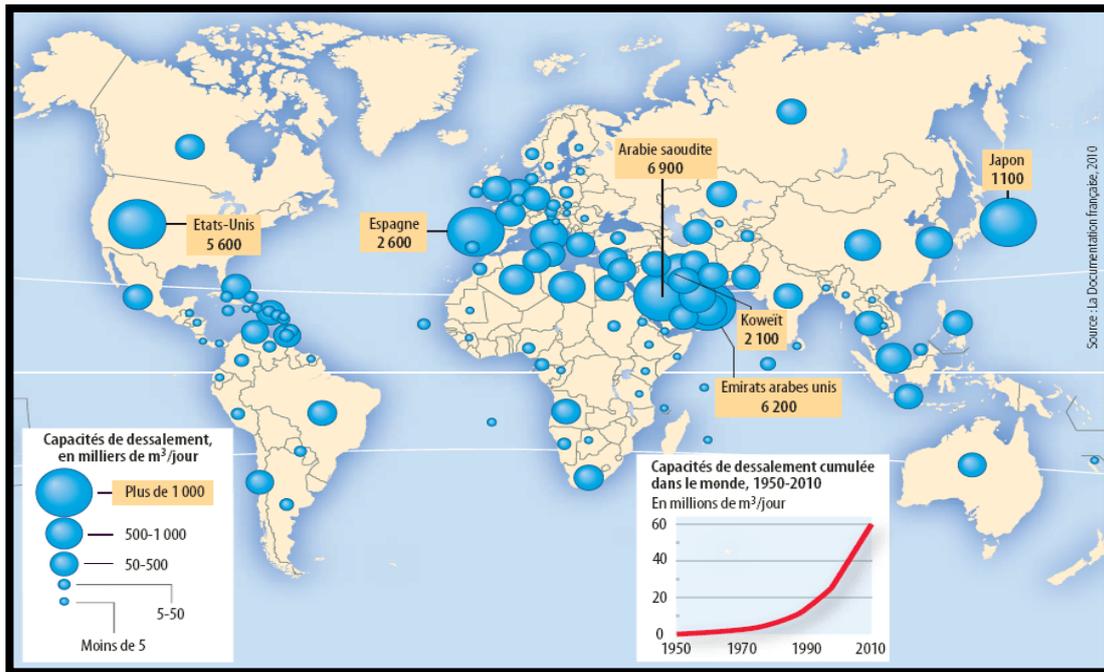
Les premières traces de dessalement remontent à environ 3 000 av. J.-C., lorsque les Grecs et les Romains utilisaient des techniques d'ébullition et de condensation pour produire de l'eau douce à partir d'eau de mer. Au fil des siècles, d'autres techniques ont été développées, notamment l'osmose inverse et l'électrodialyse qu'on va détailler ultérieurement.

Le développement du dessalement moderne a débuté au XXe siècle, avec l'avènement de nouvelles technologies et de sources d'énergie plus puissantes. La première usine de dessalement à grande échelle a été construite en 1965 à Kuwait City, au Koweït. Depuis lors, le dessalement s'est répandu dans le monde entier, avec des installations en service dans plus de 150 pays.

Le développement du dessalement a été stimulé par plusieurs facteurs :

- La croissance de la population mondiale et la demande croissante en eau douce
- La pénurie d'eau dans de nombreuses régions du monde
- L'amélioration des technologies de dessalement et la réduction des coûts

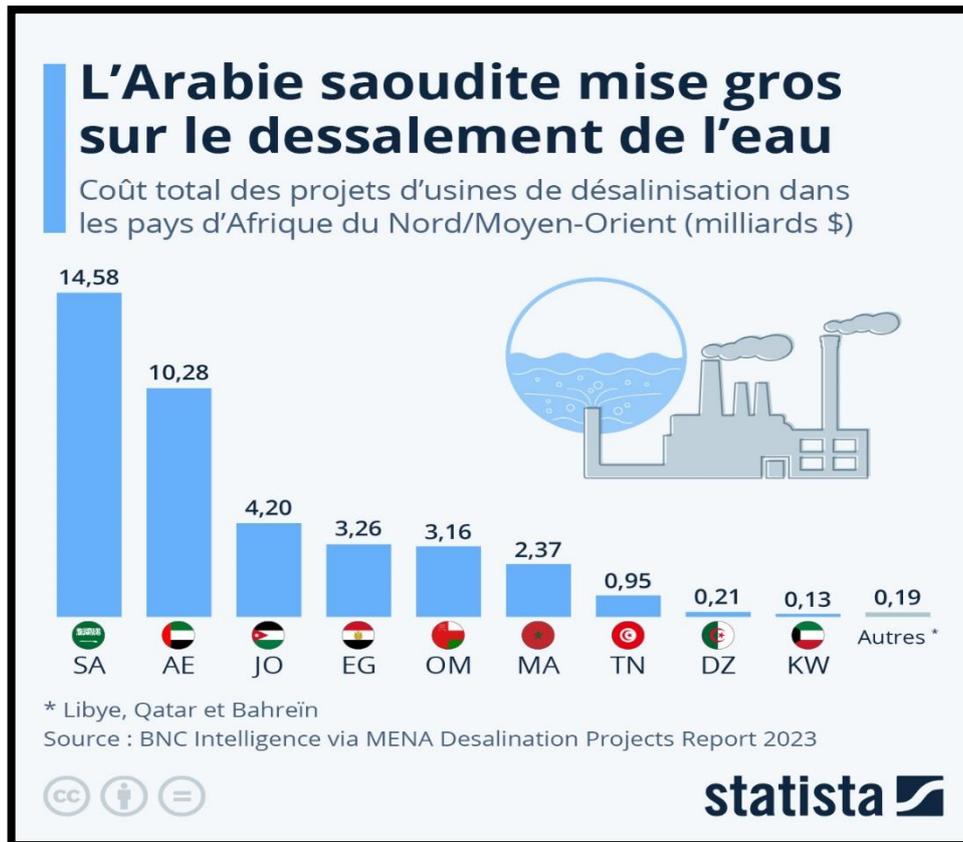
Aujourd'hui, le dessalement est une technologie essentielle pour répondre aux besoins en eau douce dans de nombreuses régions du monde. Il est utilisé pour produire de l'eau potable, pour irriguer les cultures et pour alimenter les industries.



figureI.4 *Capacité de dessalement des pays dans le monde*
 Source : *alternatives-economiques.fr*

Voici quelques dates importantes dans l'histoire du dessalement :

- 3 000 av. J.-C.: Les Grecs et les Romains utilisent des techniques d'ébullition et de condensation pour produire de l'eau douce à partir d'eau de mer.
- 1560: La première usine de dessalement terrestre est construite sur une île tunisienne.
- 1872: Le Chili met en service la première unité de dessalement à énergie solaire au monde.
- 1898: La Russie met en service sa première usine de dessalement basée sur le principe de l'évaporation multi-effets.
- 1965: La première usine de dessalement à grande échelle est construite à Kuwait City, au Koweït.
- 2000: Le nombre d'usines de dessalement dans le monde atteint les 10 000.
- 2023: Le nombre d'usines de dessalement dans le monde atteint les 18 000 .



figureI.5 *Coût des projets de dessalement dans les pays d'Afrique du nord et le moyen orient.*

Source : fr.statista.com

I.4 Dessalement en Algérie :

L'Algérie est confrontée à un défi hydrique majeur. La population devrait doubler dans les 30 prochaines années, alors que les ressources en eau douce conventionnelles resteront limitées. Cette situation est aggravée par la sécheresse persistante qui sévit sur les régions côtières, où se concentre la majorité de la population et des activités économiques du pays. Heureusement, le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une solution prometteuse. L'accès à l'eau de mer est facilité par plus de 1200 kilomètres de littoral algérien. De plus, la Méditerranée offre des conditions idéales pour le dessalement : la température de l'eau y est relativement basse (19°C) et la salinité est modérée, contrairement aux eaux plus chaudes et plus salées d'autres régions.

Ces permettent d'exploiter les stations de dessalement à des coûts plus faibles et d'obtenir des rendements plus élevés. La méthode privilégiée est l'osmose inverse, une technologie qui a connu des avancées importantes ces dernières années. Grâce à des membranes plus performantes et durables, le coût de production de l'eau dessalée a considérablement baissé, ne dépassant pas 0,5 euro par mètre cube. Donc, le dessalement de l'eau de mer, solution

économiquement fiable et performante, se positionne comme une réponse essentielle aux besoins croissants en eau potable de l'Algérie et garantir sa sécurité hydrique.

4.1. Historique du dessalement en Algérie :

Le dessalement en Algérie a débuté dans les années 1960 avec de petites installations pour répondre aux besoins des populations locales dans les régions côtières arides.

Les premières stations utilisaient des technologies thermiques, comme l'évaporation-condensation, qui étaient énergivores et coûteuses.

Développement et expansion :

À partir des années 1980, l'Algérie a connu une croissance démographique importante et une sécheresse persistante, ce qui a accéléré le développement du dessalement.

L'introduction de l'osmose inverse dans les années 1990 a marqué un tournant majeur, car cette technologie est plus efficace et moins gourmande en énergie.

Le gouvernement a alors investi massivement dans la construction de stations de dessalement d'envergure, en particulier le long du littoral méditerranéen.

Situation actuelle :

L'Algérie compte aujourd'hui plus de 20 stations de dessalement en service un peu partout tout au long du littoral, avec une capacité de production totale de plus de 2 millions de mètres cubes par jour.

Cette capacité permet de répondre à environ 12% de la demande nationale en eau potable.

Le dessalement est devenu une source d'eau potable indispensable pour de nombreuses villes côtières algériennes.

Voici quelques grandes stations de dessalement en Algérie :

tableau I.1. *Les différentes stations en Algérie et leur capacité de production*

WILAYA	STATION	MISE EN SERVICE	CAPACITE DE PRODUCTION (m^3/j)
Alger Oran	El hamma	2008	200 000
	El marsa	2022	60 000
	Mactaa	2015	500 000
	Kahrma Arzew	2005	90 000
Tlemecen	Honaine	2010	200 000
	Souk Tlata	2010	200 000
Boumerdes	Cap djenet	2010	100 000
Skikda	Skikda	2009	100 000
Ain Tmouchent	Benisaf	2009	200 000
Chelef	Tenes	2010	200 000
Mostaganem	Mostaganem	2010	200 000
Tipaza	Fouka	2010	120 000
	TOTAL		2 170 000

Source : Réalisé par l'étudiante à partir de données AEC

I.5 Enjeux et perspectives :

Le développement du dessalement se poursuit en Algérie, avec de nouveaux projets en cours de réalisation.

Deux nouvelles stations de dessalement d'une capacité de 300 000 m^3 /jour chacune seront construites en Algérie, l'une dans la wilaya d'El Tarf et l'autre à l'ouest d'Alger. Sans oublier la station de Cap Blanc (ouest de la wilaya d'Oran) d'une capacité de 300.000 m^3 /jour, qui doit être réceptionnée fin 2024.

La station d'El Tarf permettra de renforcer et de sécuriser l'alimentation en eau potable d'une vaste zone géographique de l'est du pays.

La station de l'ouest d'Alger répondra quant à elle à la demande en eau potable de la partie ouest d'Alger et de Blida.

Ces deux stations, en plus de celles déjà en activité, porteront à 25% la part de la production nationale d'eau potable issue du dessalement, contre 17% actuellement.

La construction de la station de l'ouest d'Alger est particulièrement urgente car les aléas climatiques ont provoqué une chute drastique des réserves des barrages et une baisse du niveau des nappes phréatiques, notamment celles de la Mitidja, de Mazafran et du Hamiz. Donc ces nouvelles stations de dessalement constituent un élément crucial pour la sécurité hydrique de l'Algérie.

Conclusion

En investissant dans le dessalement et en s'engageant dans la recherche de solutions innovantes, l'Algérie se dote d'un outil précieux pour garantir la qualité de vie de ses citoyens et son développement économique et social. Le dessalement représente une réponse prometteuse aux défis de l'eau en Algérie et lui permettra de naviguer sereinement dans le 21ème siècle.

Chapitre II:
Procédés de dessalement

Introduction

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1380 millions de km³. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km³. Mais la répartition de cette eau est très inégale.

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années. Mais leur coût limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par m³ ont connu une forte diminution.

II.1 Définition détaillée du dessalement :

Le dessalement également connu sous le nom de désaliénation est un ensemble de procédés physico-chimiques qui vise à éliminer le sel dissous dans l'eau de mer ou d'autres eaux salines pour la rendre potable ou utilisable à d'autres fins que ça soit dans la consommation humaine, l'irrigation, l'industrie etc. Il s'agit d'une technologie cruciale pour répondre aux besoins croissants en eau douce dans le monde.

Le dessalement repose sur la séparation du sel dissous dans l'eau de mer ou d'autres eaux salines (eaux saumâtres issues des lacs salés ou des eaux souterraines saumâtres). Cette séparation exploite la différence de propriétés entre l'eau et le sel. L'eau, constituée de molécules polaires (H₂O), est capable de former des liaisons hydrogène, alors que le sel se dissocie en ions chlorure ($-Cl^-$) et sodium (Na^+) lorsqu'il est dissous. Les techniques de dessalement tirent parti de cette différence pour isoler l'eau douce des ions de sel.

II.2 Caractéristiques des eaux marines et eaux saumâtres :

2.1. Les eaux marines :

Les eaux marines, qui recouvrent environ 71 % de la surface terrestre, présentent des caractéristiques uniques qui les distinguent des autres types d'eaux. Ces caractéristiques sont déterminées par une combinaison de facteurs, notamment la composition chimique, la température, la salinité, la densité et la lumière.

Composition chimique : L'eau de mer est une solution complexe composée d'une grande variété d'éléments et de composés. Les principaux éléments dissous dans l'eau de mer sont le chlorure de sodium (NaCl), suivi du sulfate de magnésium (MgSO₄), du sulfate de calcium (CaSO₄) et du chlorure de potassium (KCl). En plus de ces éléments majeurs, l'eau de mer contient également des traces de nombreux autres éléments, tels que le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc et le fluor. Ces éléments traces jouent un rôle crucial dans les processus biologiques marins.

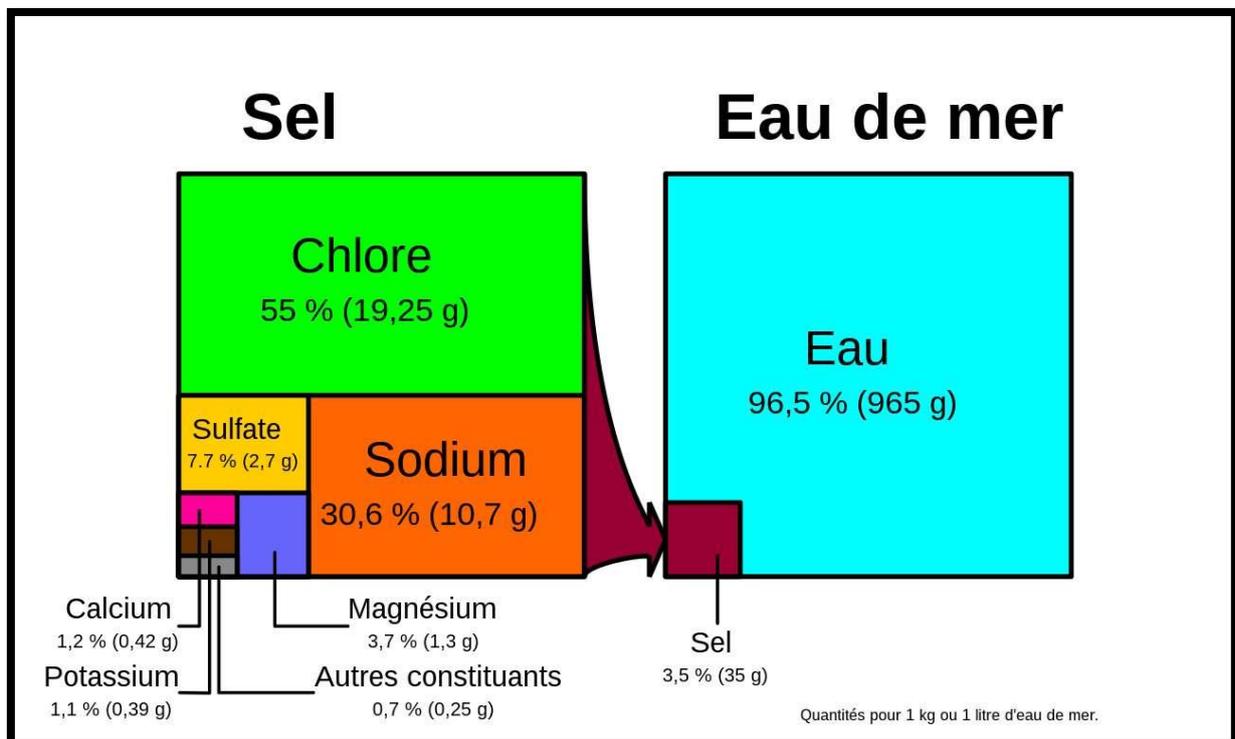


figure II .1. Composition chimique du sel d'eau de mer
Source : futura-sciences.com

Température : La température des eaux marines varie considérablement en fonction de la latitude, de la profondeur et de la saison. En moyenne, la température de surface de l'océan est d'environ 25 °C. Cependant, elle peut atteindre 30 °C ou plus dans les régions tropicales et descendre en dessous de 0 °C dans les régions polaires. La température de l'eau de mer diminue généralement avec la profondeur. Cela est dû à l'absorption de l'énergie solaire par la surface de l'océan, qui chauffe les couches supérieures de l'eau. La chaleur se diffuse ensuite progressivement vers les couches plus profondes, qui restent plus froides.

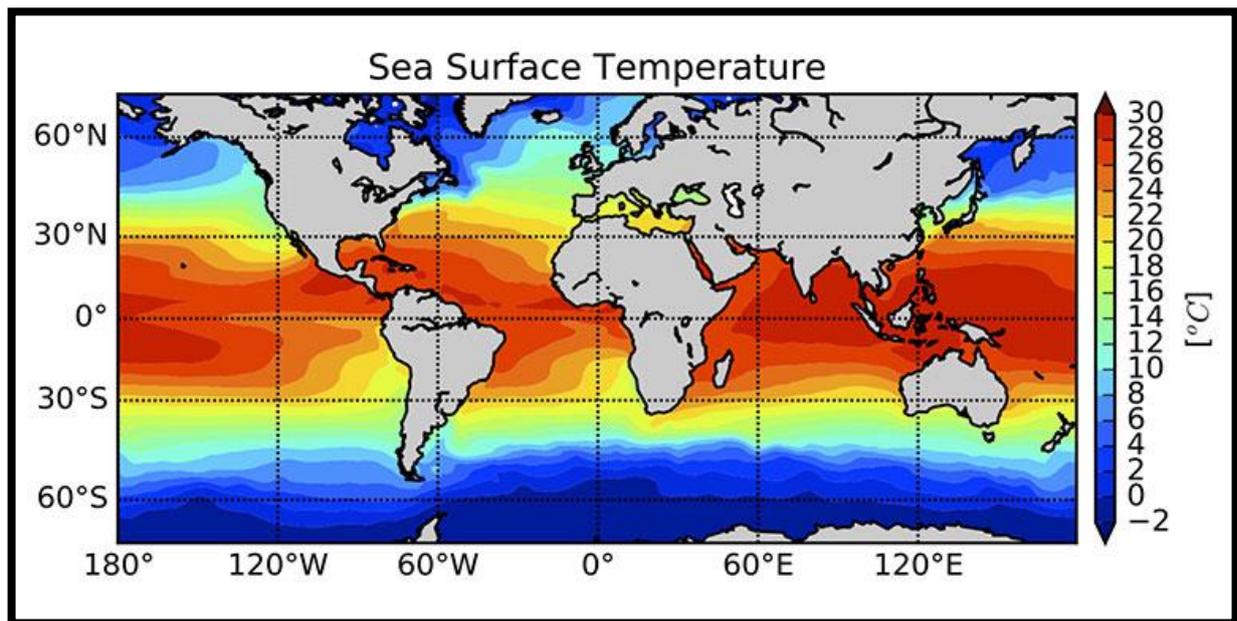


figure II .2. La température des eaux de surface des océans
Source : oceansconnectes.org

Salinité : La salinité de l'eau de mer est définie comme la quantité totale de sels dissous dans un kilogramme d'eau de mer. La salinité moyenne des océans est d'environ 35 grammes par litre (g/L), ce qui signifie que chaque litre d'eau de mer contient 35 grammes de sels dissous. La salinité de l'eau de mer n'est pas uniforme à travers les océans. Elle peut varier en fonction de la latitude, de la précipitation, de l'évaporation et de la présence de rivières et de glaciers. Les régions océaniques avec une forte évaporation et de faibles précipitations, comme les mers subtropicales, ont tendance à avoir une salinité plus élevée, tandis que les régions avec des précipitations abondantes et un faible apport d'eau douce, comme les zones polaires, ont une salinité plus faible.

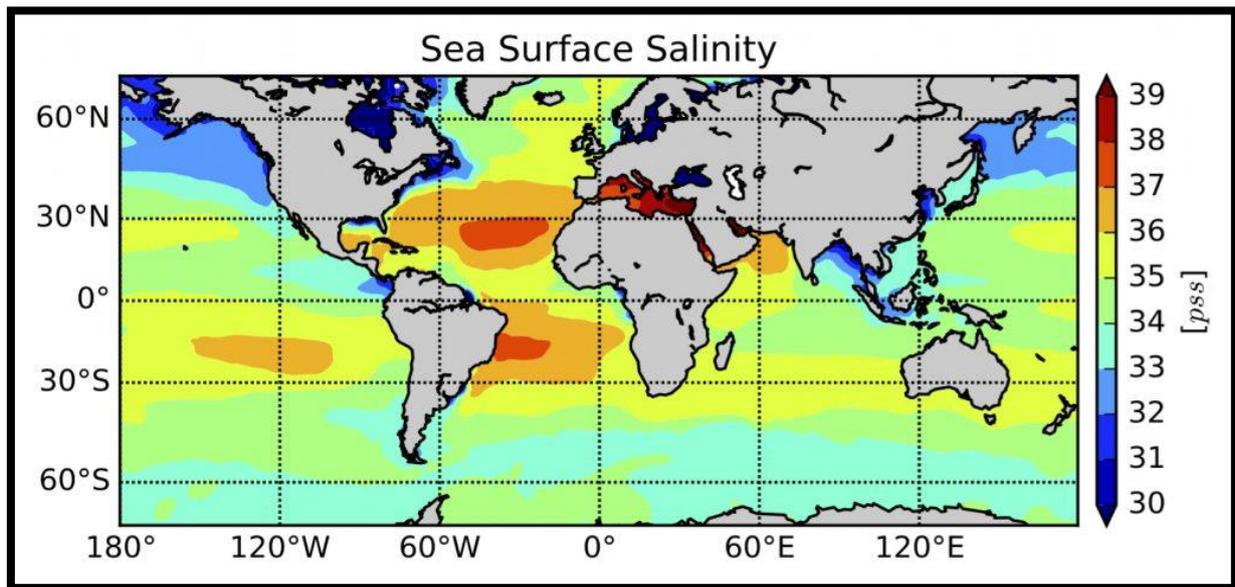


figure II .3. Les concentrations en sel des eaux des océans
 Source : oceansconnectes.org

Voici quelque exemple de salinité des mers les plus connues :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L-1,
- Mer Rouge : environ 40 g.L-1,
- Mer Caspienne : 13 g.L-1,
- Mer Morte : 270 g.L-1,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.L-1.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique.

Densité : La densité de l'eau de mer est légèrement supérieure à celle de l'eau douce, due à la présence de sels dissous. La densité moyenne de l'eau de mer est d'environ 1 025 kilogrammes par mètre cube (kg/m³), tandis que la densité de l'eau douce est d'environ 1 000 kg/m³. Cette différence de densité a des implications importantes pour la circulation océanique et la vie marine. L'eau de mer plus dense a tendance à s'enfoncer, tandis que l'eau douce moins dense remonte à la surface.

Lumière : La lumière du soleil pénètre dans l'eau de mer, mais son intensité diminue rapidement avec la profondeur. La lumière rouge est absorbée en premier, suivie de la lumière

orange, jaune et verte. La lumière bleue est la lumière la plus pénétrante et peut atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres. La pénétration de la lumière dans l'eau de mer est importante pour la photosynthèse, qui est le processus par lequel les algues et les plantes marines produisent de la nourriture. La photosynthèse ne peut se produire que dans les zones où la lumière solaire est suffisamment intense.

2.2. Les eaux saumâtres :

Les eaux saumâtres se distinguent des eaux douces et des eaux de mer par leur teneur en sel intermédiaire. Elles contiennent généralement entre 0,5 et 30 grammes de sel par litre (g/L), ce qui les rend impropres à la consommation humaine directe sans traitement préalable.

Les eaux saumâtres présentent plusieurs caractéristiques importantes :

Concentration en sel : La concentration en sel des eaux saumâtres est inférieure à celle de l'eau de mer (environ 35 g/L), mais supérieure à celle de l'eau douce (inférieure à 0,5 g/L). Cette concentration influence le choix de la technique de dessalement la plus adaptée et son efficacité.

Diversité de composition : La composition des eaux saumâtres varie considérablement en fonction de leur origine. Elles peuvent contenir des minéraux supplémentaires, des polluants organiques et des microorganismes, ce qui peut nécessiter des étapes de prétraitement avant le dessalement.

Facilité de traitement : Les eaux saumâtres, avec leur concentration en sel plus faible que l'eau de mer, peuvent nécessiter un traitement moins intensif et moins énergivore pour produire de l'eau douce.

Avantages environnementaux : Le dessalement des eaux saumâtres peut présenter des avantages environnementaux par rapport au dessalement de l'eau de mer. La production de saumure, un sous-produit du dessalement, est moins concentrée, ce qui réduit son impact potentiel sur l'environnement marin.

Sources d'eaux saumâtres : Les eaux saumâtres peuvent provenir de différentes sources, telles que :

- Eaux souterraines : Les nappes phréatiques côtières peuvent être naturellement saumâtres en raison de l'infiltration d'eau de mer.

- Eaux de surface : Les rivières et les lacs situés dans des zones arides ou semi-arides peuvent avoir une teneur en sel élevée due à l'évaporation et à la faible pluviométrie.
- Eaux usées traitées : Les eaux usées traitées à un niveau avancé peuvent être considérées comme des eaux saumâtres et peuvent être dessalées pour produire de l'eau d'irrigation ou d'autres usages non potables.

L'exploitation des eaux saumâtres pour le dessalement offre un potentiel important pour augmenter la disponibilité d'eau douce dans les régions où les ressources en eau douce sont limitées. Le choix de la technique de dessalement la plus adaptée aux eaux saumâtres doit tenir compte de leurs caractéristiques spécifiques et des objectifs du projet.

II.3 Normes de potabilité

L'eau dessalée doit répondre à des normes de qualité strictes avant d'être distribuée à la consommation humaine. Ces normes visent à garantir que l'eau est exempte de contaminants nocifs et propre à la consommation. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a établi des directives internationales pour la qualité de l'eau potable, qui couvrent une large gamme de paramètres, y compris :

Paramètres physico-chimiques : pH, conductivité, turbidité, couleur, odeur, saveur, minéraux dissous (tels que le sodium, le chlorure, le calcium, le magnésium)

Paramètres microbiologiques : Absence de bactéries pathogènes, telles que *Escherichia coli* (*E. coli*), coliformes fécaux, entérocoques

Paramètres chimiques : Limites maximales admissibles pour les contaminants chimiques, tels que les métaux lourds (plomb, mercure, arsenic), les nitrates, les pesticides

Paramètres radiologiques : Limites maximales admissibles pour les radionucléides, tels que le radium 226 et le tritium.

En plus des directives de l'OMS, de nombreux pays ont également leurs propres normes nationales de potabilité de l'eau. Ces normes peuvent être plus strictes que les directives de l'OMS, en fonction des préoccupations sanitaires et environnementales spécifiques de chaque pays. Dans le contexte du dessalement, il est important de tenir compte des défis particuliers

liés à la production d'eau potable à partir d'eau de mer. Le processus de dessalement peut concentrer certains contaminants, tels que le sel et les métaux lourds, dans l'eau produite.

Par conséquent, des étapes de traitement supplémentaires peuvent être nécessaires pour garantir que l'eau dessalée répond aux normes de potabilité.

Voici quelques exemples de normes de potabilité de l'eau spécifiques au dessalement :

- L'Union européenne a fixé des normes de qualité pour l'eau dessalée destinée à la consommation humaine dans sa directive 98/83/CE. Cette directive stipule que l'eau dessalée doit répondre aux mêmes exigences de qualité que l'eau douce d'origine terrestre.
- Les États-Unis ont établi des normes nationales de qualité de l'eau potable pour l'eau dessalée dans le **Safe Drinking Water Act**. Ces normes sont similaires aux directives de l'OMS, mais elles incluent également des limites maximales admissibles pour des contaminants spécifiques qui peuvent être présents dans l'eau de mer, tels que le bore et le vanadium.

Il est important de noter que les normes de potabilité de l'eau peuvent évoluer au fil du temps, en fonction des nouvelles connaissances scientifiques et des préoccupations sanitaires. Par conséquent, il est crucial que les producteurs d'eau dessalée se tiennent au courant des dernières normes et s'assurent que leur eau répond à toutes les exigences en matière de qualité. En plus des normes de potabilité, il est également important de considérer les impacts environnementaux du dessalement. Le processus de dessalement peut produire des saumures concentrées, qui peuvent être nocives pour l'environnement marin si elles ne sont pas gérées correctement. Il est donc essentiel que les projets de dessalement mettent en œuvre des stratégies de gestion de la saumure durables.

tableau II.1. Comparaison des normes de potabilité algérienne sur les sels avec les recommandations de l'OMS

Paramètre	Norme Algérienne (décret n°11-155 du 11 mai 2011)	Recommandations de l'OMS (Guide pour la qualité de l'eau potable, 4ème édition, 2017)	Unité
Chlorure de sodium (NaCl)	200	250	mg/L
Sulfate (SO ₄)*	250	500	mg/L
Nitrate (NO ₃)	50	50	mg/L
Nitrite (NO ₂)	0,5	0,5	mg/L
Calcium (Ca)	200	70-200	mg/L
Magnésium (Mg)	50	12-50	mg/L
Fer (Fe)	0,3	0,3	mg/L
Manganèse (Mn)	0,1	0,4	mg/L
Conductivité	< 2800	< 2500	μS/cm

Source : élaboré par l'étudiante depuis le journal Officiel Algérie et www.who.int

II.4 Techniques de dessalement :

Les techniques de dessalement actuelles se divisent en deux grandes familles, selon le principe physique mis en œuvre :

1. **Les procédés thermiques** qui induisent un changement d'état de l'eau, comme la congélation ou la distillation.
2. **Les procédés membranaires** qui utilisent des membranes semi-perméables pour séparer l'eau des sels, tels que l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi ces procédés, la distillation et l'osmose inverse sont les plus répandus et les plus performants pour dessaler l'eau de mer. Leur succès commercial est tel qu'elles dominent le marché mondial du dessalement. Les autres techniques, bien qu'intéressantes sur le papier, n'ont pas connu un développement comparable en raison de contraintes liées à la consommation énergétique ou aux coûts d'investissement.

Quel que soit le procédé choisi, le dessalement d'eau de mer suit généralement quatre étapes clés :

- **Prélèvement et filtration grossière** de l'eau de mer.
- **Prétraitement** pour éliminer les impuretés et prévenir l'encrassement des équipements.
- **Processus de dessalement** proprement dit, qu'il s'agisse d'un procédé thermique ou membranaire.
- **Post-traitement** pour ajuster la qualité de l'eau produite et la rendre potable ou adaptée à un usage industriel.

À l'issue de ce processus, l'eau obtenue doit respecter des normes strictes de salinité, généralement inférieures à 0,5 gramme de sel par litre.

4.1. L'osmose inverse :

L'osmose inverse est une technique de purification de l'eau qui exploite des membranes spéciales pour séparer l'eau des sels dissous. Sous l'effet d'une pression élevée, comprise entre 54 et 80 bars pour l'eau de mer, l'eau traverse ces membranes tout en laissant les sels derrière. Ce procédé fonctionne à température ordinaire et ne nécessite pas de transformation de l'eau en vapeur. Les membranes utilisées, généralement en polymère, sont conçues pour laisser passer les molécules d'eau tout en retenant les particules et les ions. L'énergie nécessaire à ce processus est principalement d'origine électrique, utilisée pour faire fonctionner les pompes haute pression. Grâce à cette technologie, il est possible d'obtenir une eau très pure, avec une teneur en sel inférieure à 0,5 gramme par litre.

4.1.1. Principe de l'osmose inverse

L'osmose est un processus où l'eau a tendance à se déplacer d'une zone de faible concentration en soluté vers une zone de concentration plus élevée, à travers une membrane semi-perméable. C'est comme si l'eau cherchait à équilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane. En appliquant une pression suffisante sur la solution concentrée, on peut inverser ce mouvement naturel. Cette pression, appelée pression osmotique, correspond à la force nécessaire pour arrêter le flux d'eau. Si l'on dépasse cette pression, l'eau va alors s'écouler dans le sens inverse, de la solution concentrée vers la solution diluée. C'est ce qu'on appelle l'osmose inverse.

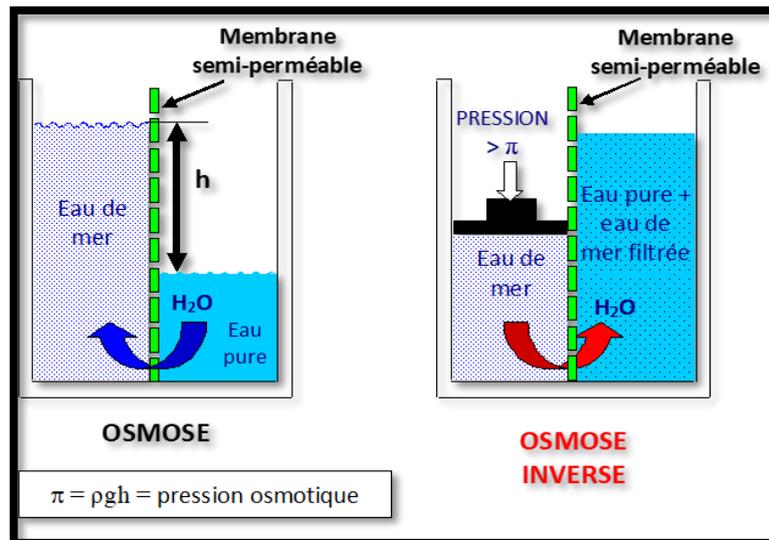


figure II .4. Le phénomène d'osmose inverse
 Source : *researchGate.net* par Louay Elsoufi

Dans le cas de solutions suffisamment diluées, la pression osmotique, notée π , peut être déterminée à l'aide de la loi de van't Hoff. Cette loi s'exprime par la relation :

$$\pi = i \times C \times R \times T.$$

Dans cette équation, i représente le nombre d'ions formés par la dissolution d'un composé dans l'eau, C est la concentration de la solution en moles par mètre cube, R est la constante universelle des gaz parfaits (égale à $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et T est la température absolue en kelvins.

Le débit d'eau pure produite par osmose inverse, noté J_1 , est directement lié à la différence entre la pression appliquée au système, P , et la pression osmotique, π . Cette relation peut être exprimée de la manière suivante :

$$J_1 = A \times (P - \pi),$$

où A est un coefficient caractéristique de la membrane, appelé coefficient de perméabilité à l'eau.

Quant au flux de sel à travers la membrane, noté J_2 , il est proportionnel à la différence de concentration de part et d'autre de la membrane. On peut l'exprimer par la relation :

$$J_2 = B \times \pi \times C,$$

où B est le coefficient de perméabilité de la membrane au sel.

Voici les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse :

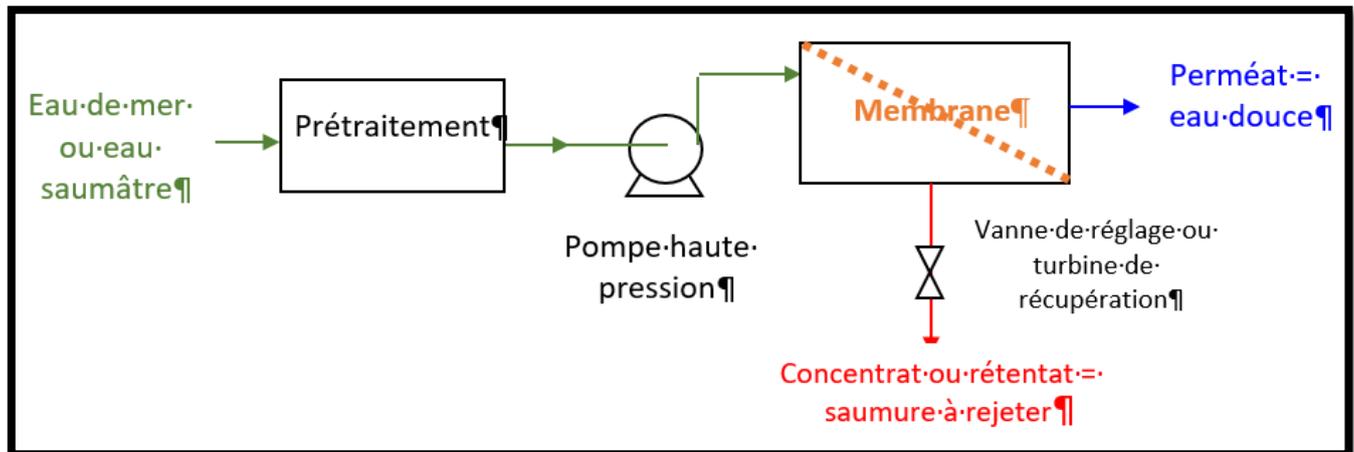


figure II .5. La composition d'une unité d'osmose inverse

Source : culturesciences.chimie.ens.fr

Avant de soumettre l'eau de mer à un processus de dessalement par osmose inverse, il est impératif de la purifier en profondeur. En effet, la présence de particules en suspension, même de très petite taille, risquerait d'obstruer rapidement les membranes et de réduire considérablement le débit d'eau produite. Pour éviter cela, l'eau de mer subit un prétraitement rigoureux en plusieurs étapes. Tout d'abord, une filtration grossière élimine les particules les plus importantes, de l'ordre de 10 à 50 micromètres, selon le type de module d'osmose inverse utilisé. Ensuite, un traitement au sable permet d'affiner la filtration et d'éliminer les particules les plus fines. Par ailleurs, l'ajout de biocides et une légère acidification de l'eau sont nécessaires pour prévenir la prolifération de micro-organismes et la formation de dépôts calcaires sur les membranes. Enfin, une filtration sur cartouches vient compléter le processus en retenant les dernières particules en suspension, de taille inférieure à quelques dizaines de micromètres.

Une fois prétraitée, l'eau de mer est propulsée à haute pression dans des modules contenant les membranes semi-perméables, comme illustré sur la figure :



figure II .6. Skid composé de plusieurs membranes
 Source : fr.freepik.com

Ces membranes agissent comme des filtres ultra-fins, laissant passer les molécules d'eau tout en retenant les sels et les impuretés. Toutefois, au cours du processus, un phénomène appelé polarisation de concentration se produit : la concentration en sel augmente progressivement à proximité de la membrane, ce qui peut entraver le passage de l'eau et même provoquer la formation de dépôts. Pour pallier ce problème, un flux continu d'eau balaye la surface de la membrane côté salé, empêchant ainsi l'accumulation de sels. Ce principe est comparable à une filtration tangentielle, où le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane. L'eau qui a traversé la membrane est appelée perméat, tandis que l'eau concentrée en sels est appelée concentrât

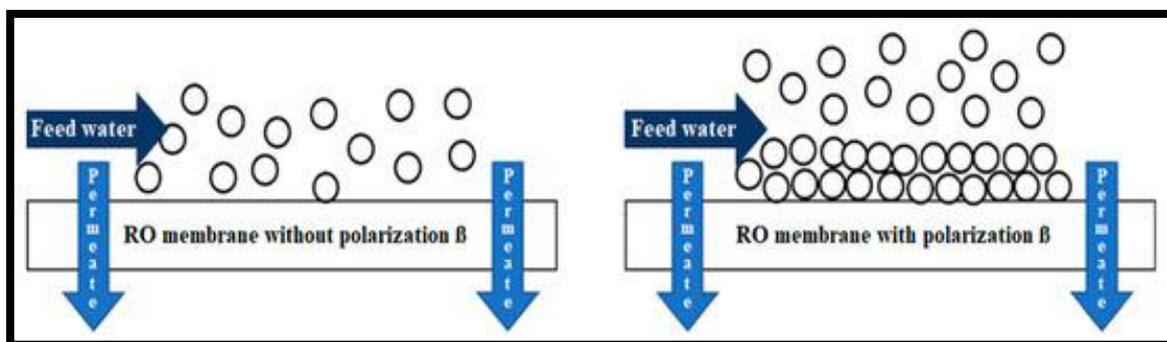


figure II .7. Le phénomène de la polarisation des membranes
 Source : mdpi.com

Afin d'optimiser la consommation énergétique du procédé, une partie de l'énergie contenue dans le concentrat sous haute pression peut être récupérée grâce à un dispositif appelé récupérateur d'énergie

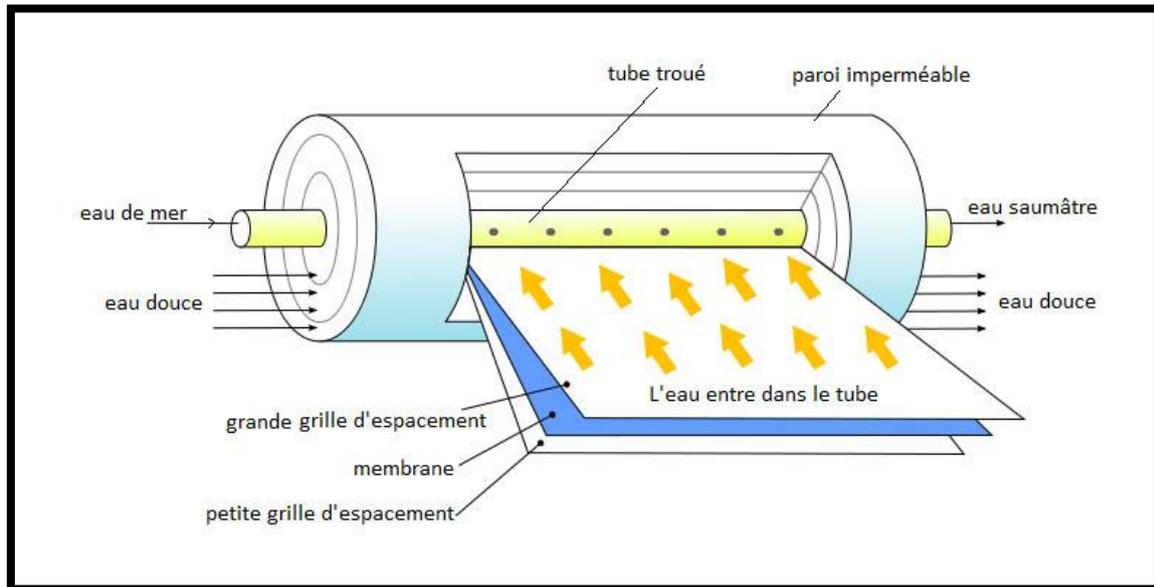


figure II .8. La composition d'une membrane
 Source : winternational.ma

Ce système innovant utilise un rotor en céramique pour transférer l'énergie du concentrât vers l'eau d'alimentation, réduisant ainsi la charge de travail de la pompe haute pression et diminuant significativement la consommation électrique de l'installation. En effet, cette technologie permet de réduire jusqu'à 60 % la consommation d'énergie d'un dessalinisateur industriel, redéfinissant ainsi les standards de l'industrie du dessalement.

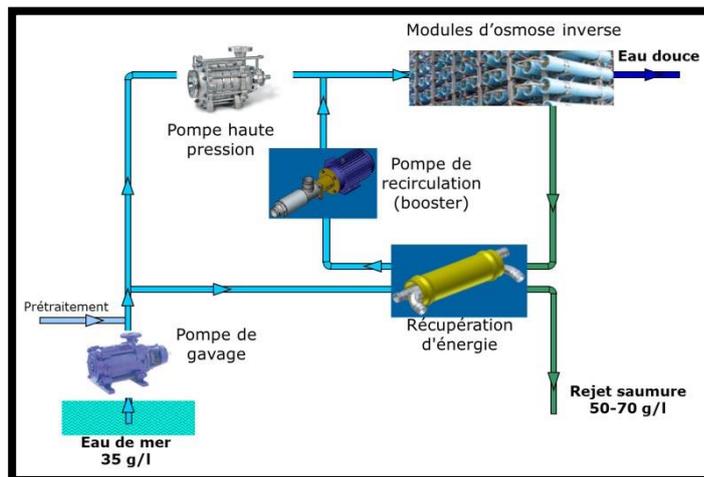
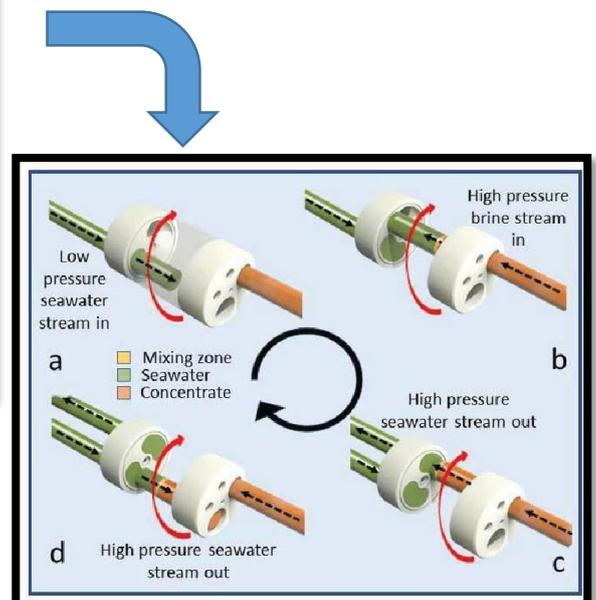


figure II .9. Le récupérateur d'énergie et son principe de fonctionnement
 Source : encyclopedie-energie.org



Une avancée technologique majeure a permis de développer un système de récupération d'énergie capable de réduire significativement la consommation énergétique des installations de dessalement. Ce système ingénieux utilise l'énergie contenue dans la saumure rejetée pour alimenter en partie la pompe haute pression. Grâce à un rotor en céramique hautement durable, l'énergie est transférée de la saumure sous pression à l'eau d'alimentation, réduisant ainsi considérablement la consommation électrique. Cette innovation permet de réaliser des économies d'énergie pouvant atteindre 60%, plaçant ainsi le dessalement sur une nouvelle voie en termes d'efficacité énergétique. Concrètement, l'eau de mer à basse pression est mélangée dans un échangeur avec la saumure sous pression, ce qui permet de transférer l'énergie de la saumure à l'eau de mer avant qu'elle ne soit pompée vers les membranes.

4.2. Les procédés de distillation :

La distillation est un procédé ancestral qui consiste à chauffer l'eau de mer pour en évaporer une partie. La vapeur ainsi produite, étant pure, se condense ensuite pour former de l'eau douce. Ce principe imite le cycle naturel de l'eau, où l'eau s'évapore des océans, se condense en nuages et retombe sous forme de pluie. Bien que simple, ce procédé a été utilisé dès l'Antiquité, notamment en mer pour produire de petites quantités d'eau potable.

Cependant, la distillation présente un inconvénient majeur : elle est très énergivore. En effet, il faut fournir une grande quantité d'énergie pour transformer l'eau liquide en vapeur. Pour réduire cette consommation énergétique, des procédés plus complexes ont été développés, tels que la distillation à multiples effets, qui permettent de récupérer une partie de la chaleur utilisée pour la vaporisation. Deux technologies de distillation thermique dominent actuellement le marché du dessalement :

- La distillation à détente étagées (MSF)
- La distillation à multiples effets (MED).

4.2.1. Le procédé de distillation à détente étagées MSF :

La distillation à multiples effets (MSF) est un procédé de dessalement qui exploite le phénomène de vaporisation instantanée, appelé "flash". L'eau de mer, portée à haute température et sous pression, est introduite dans une succession de chambres où la pression diminue progressivement. Cette chute de pression provoque une évaporation partielle de l'eau, formant de la vapeur qui se condense sur des surfaces refroidies. L'eau douce ainsi produite est

collectée, tandis que l'eau salée restante est envoyée dans la chambre suivante. Pour assurer un chauffage efficace, l'eau de mer circule dans les tubes de condensation, récupérant ainsi la chaleur de la vapeur produite dans les étages précédents.

Afin d'éliminer les gouttelettes d'eau salée entraînées par la vapeur, des séparateurs sont utilisés. Ces dispositifs permettent de retenir les gouttelettes d'eau salée, qui retombent alors au fond des chambres.

Le procédé MSF présente l'avantage de limiter les risques d'encrassement des tubes de chauffe, car l'évaporation se produit dans le volume du liquide. De plus, il peut être couplé à une centrale électrique, permettant ainsi de valoriser la chaleur perdue lors de la production d'électricité.

Le procédé MSF, bien qu'efficace pour des productions d'eau dessalée de grande envergure, présente une certaine rigidité en termes de flexibilité opérationnelle. En effet, la conception même du système, avec ses multiples étages fonctionnant en série et ses conditions de pression et de température strictement définies, rend difficile toute adaptation rapide à des variations de la demande en eau. Toute modification de la production requiert généralement des ajustements complexes et chronophages au niveau de l'ensemble de l'installation.

Cette caractéristique limite l'utilisation du procédé MSF dans des contextes où les besoins en eau peuvent fluctuer de manière significative, comme dans les zones touristiques ou industrielles soumises à des pics de consommation.

Pour pallier cette limitation, d'autres technologies de dessalement ont été développées, offrant une plus grande flexibilité :

- **Osmose inverse** : Ce procédé, basé sur la filtration membranaire, permet une adaptation plus rapide des débits de production en ajustant simplement la pression appliquée aux membranes.
- **Distillation à membrane** : Cette technologie combine les avantages de l'osmose inverse et de la distillation, offrant une plus grande flexibilité tout en réduisant la consommation énergétique.

Les évaporateurs à plaques, quant à eux, offrent une alternative intéressante. Dans ce cas, l'eau de mer et la vapeur circulent alternativement entre des plaques métalliques ondulées. Ces ondulations augmentent la turbulence des fluides et améliorent ainsi le coefficient d'échange thermique. Bien que les évaporateurs à plaques soient plus compacts et nécessitent moins d'encombrement, ils sont généralement plus sensibles à l'encrassement et nécessitent des opérations de nettoyage plus fréquentes.

Le choix entre les deux technologies dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- **La nature de l'eau à évaporer :** Les évaporateurs à tubes horizontaux sont souvent privilégiés pour les eaux contenant des solides en suspension, tandis que les évaporateurs à plaques sont plus adaptés aux eaux relativement propres.
- **Le débit à traiter :** Les évaporateurs à tubes horizontaux sont généralement utilisés pour de grands débits, tandis que les évaporateurs à plaques sont plus adaptés aux petits et moyens débits.
- **Les contraintes économiques:** Le coût d'investissement et les coûts d'exploitation sont des facteurs déterminants dans le choix d'une technologie

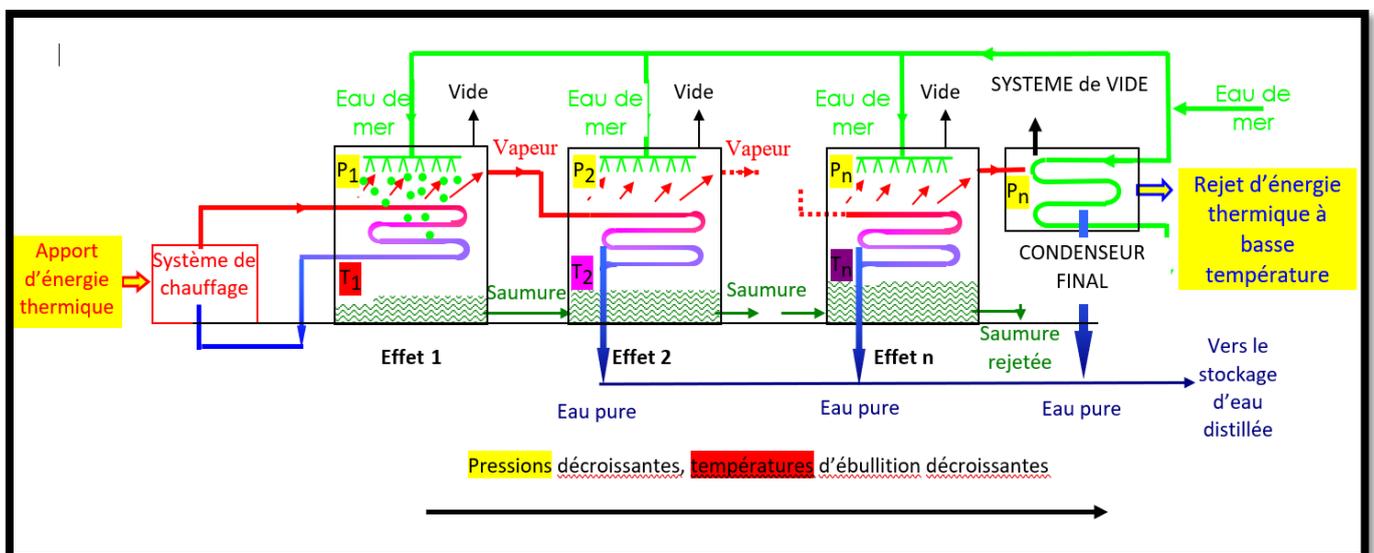


figure II .11. Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets
Source : Wikiwater.fr

Des évaporateurs multiples effets à plaques sont également en cours de développement. L'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la

plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle.

L'énergie thermique est le principal apport énergétique dans les procédés MED, notamment pour chauffer le premier effet. Cependant, pour réduire la consommation énergétique globale, il est possible d'utiliser des sources de chaleur résiduelles, comme celles provenant d'usines produisant de l'électricité ou rejetant des eaux chaudes. En complément, l'énergie électrique est nécessaire pour faire fonctionner les pompes et les systèmes de vide.

Une autre approche consiste à recourir à la compression mécanique de vapeur. Cette technique consiste à comprimer la vapeur produite dans le dernier effet, augmentant ainsi sa température et sa pression. Cette vapeur surchauffée peut ensuite être réutilisée pour chauffer l'eau de mer dans les effets précédents, améliorant ainsi le rendement énergétique du procédé.

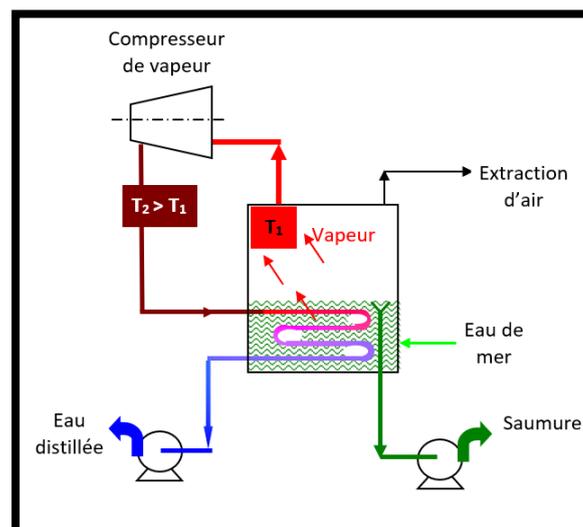


figure II .12. Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur

Source : culturesciences.chimie.ens.fr

L'un des principaux défis liés aux procédés MED est l'entartrage, causé par la précipitation de sels tels que le sulfate de calcium et le carbonate de calcium lorsque la température augmente. Pour limiter ce phénomène, il est nécessaire de traiter l'eau et de maintenir une température de fonctionnement relativement basse, généralement inférieure à 70°C.

La figure ci-dessous illustre clairement la relation entre la pression et la température d'ébullition de l'eau. Cette corrélation explique pourquoi il est avantageux de réduire la pression dans les différents effets d'un évaporateur multi-effet afin d'optimiser le processus d'évaporation

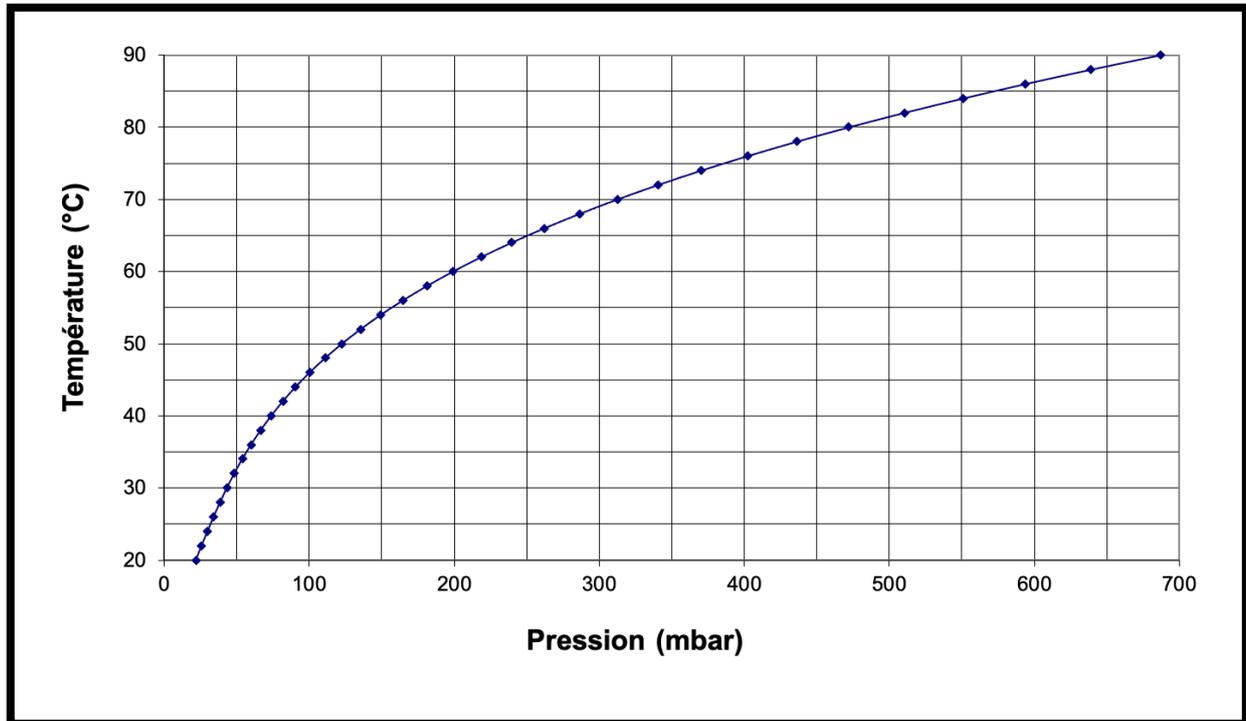


figure II .13. *Évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression*

Source : fr.science-question.org

II.5 Facteurs influençant le choix de la technique de dessalement :

Le choix de la technique de dessalement la plus appropriée dépend de plusieurs facteurs clés, qui peuvent être regroupés en trois catégories principales :

1. Facteurs liés à l'eau salée à traiter :

- **Qualité de l'eau salée :** La concentration en sel, la présence de polluants et la température de l'eau de mer influencent le choix de la technique et son efficacité.
- **Quantité d'eau salée à traiter :** Les techniques de grande capacité, comme l'osmose inverse, sont plus adaptées aux gros projets de dessalement, tandis que les techniques à petite échelle, comme la distillation solaire, conviennent mieux aux besoins domestiques ou communautaires.

2. Facteurs économiques :

- Coût de l'énergie : Les techniques énergivores, comme la distillation thermique multiple effet (MSF), peuvent être coûteuses à exploiter, tandis que les techniques utilisant des énergies renouvelables, comme la distillation solaire, sont plus durables mais nécessitent un investissement initial plus important.
- Coût de l'infrastructure : La construction et l'entretien des installations de dessalement varient selon la technique choisie.
- Coût de maintenance : La complexité de la technique et la fréquence des interventions de maintenance influencent les coûts d'exploitation.

3. Facteurs environnementaux et sociaux :

- Impacts environnementaux : La production de saumure, un sous-produit du dessalement, peut avoir des impacts négatifs sur l'environnement marin. Il est important de choisir une technique qui minimise la quantité de saumure produite et son impact sur l'écosystème.
- Acceptabilité sociale : L'implication des communautés locales et la prise en compte de leurs besoins et préoccupations sont essentielles pour le succès d'un projet de dessalement. En plus de ces facteurs principaux, d'autres éléments peuvent influencer le choix de la technique de dessalement, tels que :
 - L'expertise locale : La disponibilité de compétences techniques dans la région peut favoriser le choix de techniques spécifiques.
 - Les réglementations environnementales : Les exigences réglementaires en matière de traitement des saumures et de protection de l'environnement peuvent orienter le choix de la technique.

Conclusion :

Plusieurs techniques de dessalement sont à disposition, et chacune a ses points forts et faibles, L'analyse approfondie de ces facteurs et la prise en compte des besoins spécifiques du projet permettent de sélectionner la technique de dessalement la plus adaptée, garantissant une production d'eau douce efficace, durable et respectueuse de l'environnement.

Chapitre III:

Les techniques de Reminéralisation

Introduction :

L'eau dessalée, est pauvre en minéraux et vulnérable à la corrosion, nécessite une reminéralisation avant distribution pour protéger les canalisations, enrichir sa composition en éléments essentiels à la santé et à d'autres usages comme l'irrigation. Ce processus vise à réintroduire des minéraux spécifiques, comme le calcium et le magnésium, pour améliorer le goût, l'apport nutritionnel et l'adaptabilité de l'eau. La reminéralisation est une étape cruciale pour garantir une eau potable de qualité et durable.

III.1 Importance de la reminéralisation :

Dans le contexte de la reminéralisation, on parle souvent de la corrosivité et l'agressivité, bien que les termes "eau corrosive" et "eau agressive" soient souvent utilisés de manière interchangeable, il existe une distinction importante entre les deux :

1.1. Définition de l'eau corrosive :

Une eau corrosive est une eau qui a tendance à attaquer et à dissoudre les métaux avec lesquels elle entre en contact. Cela peut entraîner la rouille, la dégradation des canalisations et des robinetteries, et la libération de métaux dans l'eau. La corrosivité de l'eau est principalement due à son pH, à sa teneur en ions agressifs (tels que les chlorures et les sulfates) et à sa conductivité électrique. Un pH bas (acide), une teneur élevée en ions agressifs ainsi qu'une conductivité élevée augmentent tous le risque de corrosion.

1.2. Définition de l'eau agressive :

Une eau agressive est une eau qui a tendance à dissoudre le calcaire et d'autres minéraux présents dans les roches et les sols. Cela peut entraîner la formation de tartre dans les canalisations, les robinetteries et les appareils électroménagers. L'agressivité de l'eau est principalement due à sa teneur en dioxyde de carbone (CO_2) et en bicarbonate de calcium (HCO_3^-). Ces composés réagissent avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui dissout le calcaire.



figure III .1. Conséquence d'une eau agressive sur les conduites
Source : waterfiltercast.com

Voici les Indices de caractérisation de l'agressivité et de la corrosivité de l'eau :

- Indice de Langelier (ou indice de saturation) $IL = pH - pH_s$
- Indice de Ryznar (ou indice de stabilité) $IR = 2 pH_s - pH$
- Indice de Stiff-Davis $SDI = pH - pCa - pAlc - K$
- Indice de Larson $LR = ([Cl^-] + 2*[SO_4^{2-}]) / [HCO_3^-]$

Il est important de noter qu'une eau peut être à la fois corrosive et agressive. L'agressivité de l'eau est généralement mesurée par son indice d'agressivité (IA), qui prend en compte la teneur en CO_2 , le pH et la dureté de l'eau. La corrosivité de l'eau dépend de plusieurs facteurs, tels que la composition chimique de l'eau, la nature du métal et les conditions environnementales.

Il est nécessaire de trouver un équilibre entre ces deux types d'eau afin de prévoir le comportement de l'eau et les problèmes potentiels d'entartrage et de corrosion, cet équilibre est appelé « équilibre calco carbonique »

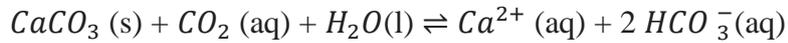
1.3. Définition de l'équilibre Calco-Carbonique :

L'équilibre calco-carbonique, également connu sous le nom d'équilibre calcite-dolomite, est un concept fondamental en chimie de l'eau qui décrit la relation entre le dioxyde de carbone dissous (CO_2), le pH et la concentration en ions calcium (Ca^{2+}) et bicarbonate (HCO_3^-) dans une solution aqueuse. Cet équilibre détermine si l'eau a tendance à déposer du calcaire (entartrage) ou à dissoudre le calcaire (agressivité).

Réactions chimiques impliquées :

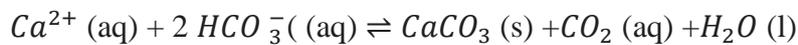
L'équilibre calco-carbonique implique deux réactions chimiques principales :

❖ Dissolution du calcaire (agressivité) :



Cette réaction montre que le calcaire (CaCO_3) se dissout dans l'eau en présence de CO_2 dissous, produisant des ions calcium (Ca^{2+}) et bicarbonate (HCO_3^-).

❖ Précipitation du calcaire (entartrage) :



Cette réaction inverse montre que les ions calcium (Ca^{2+}) et bicarbonate (HCO_3^-) précipitent en calcaire (CaCO_3) en libérant du CO_2 dissous et de l'eau.

Constante d'équilibre (Ks) : La constante d'équilibre (Ks) pour l'équilibre calco-carbonique est définie comme le produit des concentrations des ions calcium et bicarbonate à saturation, divisé par la concentration en CO_2 dissous :

$$K_s = [\text{Ca}^{2+}] * [\text{HCO}_3^-]^2 / [\text{CO}_2]$$

La valeur de Ks dépend de la température et de la force ionique de la solution. À une température donnée, une valeur de Ks plus élevée indique une eau plus saturée en calcaire, avec une plus grande tendance à l'entartrage.

1.4. Facteurs influençant l'équilibre Calco-Carbonique :

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'équilibre calco-carbonique et la tendance de l'eau à l'entartrage ou à l'agressivité :

1. **Teneur en CO_2 dissous :** Une augmentation de la teneur en CO_2 dissous déplace l'équilibre vers la gauche, favorisant la dissolution du calcaire (agressivité).
2. **pH :** Une diminution du pH déplace l'équilibre vers la gauche, favorisant également la dissolution du calcaire (agressivité).

3. **Température** : L'augmentation de la température augmente la solubilité du calcaire et déplace l'équilibre vers la gauche, favorisant la dissolution du calcaire (agressivité).
4. **Force ionique** : Une augmentation de la force ionique augmente la solubilité du calcaire et déplace l'équilibre vers la gauche, favorisant la dissolution du calcaire (agressivité).
5. **Présence de complexes** : La présence de complexes de calcium, tels que les complexes organiques, peut réduire la concentration d'ions calcium libres et déplacer l'équilibre vers la droite, favorisant la précipitation du calcaire (entartrage).

III.2 Risques sanitaires d'une eau faiblement minéralisée :

Quelques publications et études épidémiologiques, majoritairement anglo-saxonnes, font part de corrélations entre les maladies cardiovasculaires, et l'acidité ou la très faible dureté de l'eau. Récemment, 27 articles du journal scientifique russe Hygiène et Sécurité sanitaire (parus entre 1965 et 2005) ont été recensés et parviennent à des conclusions quant aux effets d'une consommation à long terme d'une eau faiblement chargée en calcium et magnésium sur la santé (Kozisek, 2006).

Ces articles rapportent en particulier des risques d'hypertension et de maladies cardiovasculaires, des effets directs sur la muqueuse intestinale (Kozisek, 2004). D'autre part, la toxicité des polluants présents dans l'eau serait plus élevée dans les eaux douces que dans les eaux dures (Gray, 1994). Les risques majeurs en terme de santé des consommateurs généralement pris en compte ont toujours été des risques indirects et liés au caractère acide et corrosif de l'eau.

Ce n'est qu'en 2004 qu'un rapport de l'OMS conclut sur la validité probable d'un apport bénéfique en terme de santé du magnésium (et du calcium, mais de moindre effet) contenu dans l'eau de boisson. Du 24 au 26 avril 2006, un symposium international a eu lieu à Baltimore (Maryland, Etats-Unis) afin d'aider l'OMS à définir les questions restant à approfondir sur les aspects de santé quant à la présence de magnésium et de calcium dans l'eau de boisson. Les procédés de mise à l'équilibre des eaux sont à l'interface de nombreux enjeux : la qualité organoleptique de l'eau, la santé publique et la sauvegarde du patrimoine.

Dans le réseau, le pH et la minéralisation sont donc des facteurs importants pour le contrôle de la corrosion, de l'agressivité de l'eau, l'action du désinfectant et la précipitation des éléments dissous. Mais le pH peut varier le long du réseau, l'eau n'étant pas à l'équilibre en sortie de

station, ou bien du fait d'une évolution de la concentration en CO_2 dissous. Distribuer une eau légèrement sursaturée en carbonate de calcium en suivant la règle des « trois huit » permet alors de favoriser la formation d'un dépôt protecteur dans les réseaux. (Loiseau & Juery, 2002).

III.3 Techniques de Reminéralisation :

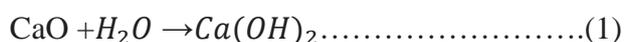
La reminéralisation de l'eau dessalée s'effectue généralement à l'aide de trois principaux groupes de technologies :

1. **Ajout direct de produits chimiques** contenant du calcium (par exemple, hydroxyde de calcium/chaux) et du magnésium (par exemple, chlorure et sulfate de magnésium).
2. **Mélange** de l'eau dessalée avec une partie de l'eau source utilisée pour le dessalement, ou avec d'autres sources d'eau douce à forte teneur en calcium et en magnésium.
3. **Dissolution de minéraux naturels** tels que le calcaire (carbonate de calcium/calcite) et la dolomite (carbonate de calcium et de magnésium) pour ajouter du magnésium et/ou du calcium.

3.1. Reminéralisation par l'ajout d'agents chimiques :

3.1.1. L'ajout de calcium :

La plupart des usines de dessalement d'eau de mer et d'eau saumâtre ajoutent généralement du calcium à l'eau dessalée sous forme de chaux ou de calcite. Plus de 90 % des usines de dessalement d'eau de mer existantes dans le monde utilisent un dosage séquentiel d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée) et de dioxyde de carbone pour fournir de la dureté et de l'alcalinité à l'eau produite, afin de protéger le réseau de distribution et la plomberie domestique de la corrosion. La reminéralisation à la chaux et au dioxyde de carbone suit la réaction chimique présentée ci-dessous :



Le produit à base de chaux utilisé pour la reminéralisation est généralement livré et stocké sur le site de l'usine de dessalement dans des silos, sous forme de chaux hydratée en poudre ou de chaux en grains (CaO), qui est ensuite éteinte pour produire de la chaux hydratée [$Ca(OH)_2$]. Dans les petites usines de dessalement, la chaux en poudre est souvent stockée dans des sacs de 25 kg. La chaux hydratée est introduite dans des saturateurs à chaux sous forme de lait de chaux. Ce lait de chaux est mélangé à l'eau douce produite par le processus de dessalement et

Soigneusement mélangé dans des cuves de saturation pour créer de l'eau de chaux saturée, qui est ensuite injectée dans l'eau dessalée non conditionnée.



figure III .2. Réservoir de stockage de dioxyde de carbone
Source : sodimate.fr

La figure montre les silos de stockage de chaux et le saturateur de l'usine d'osmose inverse, Le dioxyde de carbone est généralement acheminé sur le site de l'usine de dessalement sous forme liquéfiée et stocké sous pression dans des réservoirs métalliques. Une solution de dioxyde de carbone et d'eau (acide carbonique) est injectée dans l'eau dessalée en aval du point d'introduction de l'eau de chaux saturée. La majorité des usines de dessalement sont conçues pour produire une eau finie d'une dureté totale (calcium et magnésium) de 80 à 120 mg/L en $CaCO_3$. Comme l'eau dessalée contient généralement moins de 2 mg/L de magnésium, plus de 90 % de la dureté totale de l'eau potable conditionnée à la chaux est de la dureté calcique.

Lors de l'ajout de chaux à l'eau dessalée, il est important de garder à l'esprit que la solubilité du carbonate de calcium dépend du pH, de la température et de la force ionique. La chaux peut ne pas se dissoudre facilement et peut ajouter une turbidité résiduelle de 0,05 à 0,5 NTU (ou plus) à l'eau finie, ce qui peut constituer un inconvénient de ce type de procédé de reminéralisation.

3.1.2. Ajout de magnésium :

Bien que l'ajout de la dureté totale uniquement sous forme de dureté calcique soit acceptable pour protéger le réseau de distribution d'eau contre la corrosion, une telle eau offre une protection quelque peu limitée pour la santé humaine et une valeur agricole moindre. C'est pourquoi certains pays, comme Chypre, pratiquent actuellement ou envisagent l'ajout de magnésium à l'eau dessalée. Actuellement, dans les usines de dessalement, le magnésium est ajouté sous forme de sulfate de magnésium ou de chlorure de magnésium de qualité alimentaire disponible dans le commerce.

3.2. Reminéralisation par mélange d'eau dessalée et d'eau source

Les minéraux, y compris le calcium et le magnésium, peuvent être ajoutés à l'eau dessalée en la mélangeant avec de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre. Cette pratique est fréquemment utilisée pour les usines d'osmose inverse à l'eau saumâtre et les usines de dessalement thermique. Elle n'est acceptable que lorsque l'eau source est de haute qualité, qu'elle a été prétraitée de manière appropriée et que le mélange respecte toutes les normes de qualité de l'eau applicables.

Lorsque l'eau dessalée et l'eau de mer prétraitée sont mélangées, la quantité d'eau de mer est généralement limitée à 1 % ou moins, en raison du goût et d'autres considérations liées à la qualité de l'eau. Par exemple, un mélange de 1 pour 99 d'eau de l'océan Pacifique ayant une salinité de 33 500 mg/L et d'eau dessalée produite par un système d'osmose inverse d'une salinité de 220 à 350 mg/L donnerait une eau finale avec une teneur en calcium de 4 à 5 mg/L et en magnésium de 19 à 20 mg/L. Cependant, cette eau aura une teneur en TDS (matières dissoutes totales) relativement élevée (550 à 680 mg/L) ainsi que des concentrations élevées en sodium (180 à 230 mg/L) et en chlorure (310 à 370 mg/L).

Un niveau élevé de bromure dans l'eau de mer (généralement entre 60 et 90 mg/L) peut également conduire à une formation excessive de sous-produits de désinfection dans l'eau traitée. Ces sous-produits sont considérés comme cancérigènes et sont donc réglementés par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), l'OMS et d'autres organismes de

réglementation dans le monde entier. En raison de ces implications, le mélange du perméat produit par les usines d'osmose inverse à l'eau de mer avec de l'eau de mer source n'est généralement pas pratiqué.

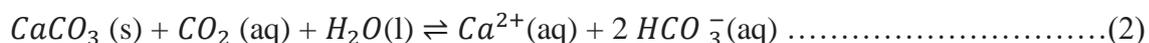
Cependant, le mélange d'eau saumâtre à faible salinité et d'eau dessalée est une pratique courante dans de nombreuses régions du monde, notamment aux États-Unis, au Moyen-Orient et en Europe. L'eau saline utilisée pour le mélange doit être traitée avant d'être mélangée à l'eau dessalée. Le type et la complexité du traitement de l'eau source dépendent de sa qualité.

Au minimum, l'eau saline utilisée pour la reminéralisation de l'eau dessalée doit être filtrée à travers des cartouches filtrantes. Un traitement amélioré de l'eau source, tel qu'une filtration au charbon actif granulaire, est recommandé pour l'eau exposée à une contamination potentielle due à une croissance excessive d'algues, à un ruissellement de surface ou à d'autres sources anthropiques de matières organiques ou de turbidité élevées dans l'eau. Des produits chimiques de prétraitement (tels que de l'acide) peuvent devoir être ajoutés, en fonction de l'endroit d'où provient l'eau de mélange par rapport à la tuyauterie d'alimentation.

3.3. Reminéralisation par dissolution des minerais naturels :

3.3.1. Addition de calcium :

La pierre à chaux (calcite) est un minerai naturel composée essentiellement de carbonate de calcium ($CaCO_3$). Le traitement de l'eau par ajout de calcite laisse dissoudre cette source de calcium. La réaction à de l'anhydride carbonique permet d'ajuster la dureté de calcium et l'alcalinité de bicarbonate à l'eau dessalée. La reminéralisation en utilisant la calcite et l'anhydride carbonique est donnée par la réaction chimique suivante :



La comparaison des équations (1) et (2) précédentes indique que la reminéralisation employant la calcite exige deux fois moins d'anhydride carbonique, le coût de chaux est habituellement plus de deux fois plus élevé que celui de la calcite. Par conséquent, l'utilisation de la calcite est habituellement plus rentable par rapport à l'application de la chaux pour la reminéralisation.

3.3.2. Addition de dolomite

La dolomite [$CaMg(CO_3)_2$] est un minéral naturel qui contient le carbonate de calcium et de magnésium. La circulation de l'eau dessalée à travers un joncteur de dolomite permet d'ajouter les deux minéraux en question, le calcium et le magnésium à l'eau obtenue. Dans la nature, le minéral de roche de dolomite est souvent non-homogène et il est intercalé avec de la pierre à chaux. Par conséquent, il est plus difficile de prévoir la qualité exacte de l'eau produite.

La solubilité de la dolomite pour enrichir l'eau dessalée avec des quantités proportionnées de calcium et de magnésium nécessite la réduction du pH de cette eau au moins de 4.5 par l'addition d'acide sulfurique ou d'anhydride carbonique. Du moment que, le magnésium ne se dissout pas bien dans l'eau avec pH supérieur à 5.5 l'ajustement du pH au niveau cible de 8 à 8.5 nécessaire pour la protection de corrosion a souvent comme conséquence un niveau relativement bas de l'alcalinité de carbonate et du magnésium dans l'eau par rapport à la dureté de calcium. La reminéralisation de l'eau avec la dolomite est moins faisable par rapport à l'utilisation de la pierre à chaux pour plusieurs raisons : Habituellement la dolomite est plus coûteuse et moins disponible que la pierre à chaux. La solubilité de la dolomite est plus de trois fois plus lente que la dissolution de la pierre à chaux. Ceci nécessite l'installation de joncteurs de dolomite de taille sensiblement plus grande et par conséquent plus coûteux.

Conclusion :

Le dessalement, s'il permet d'accéder à une ressource en eau précieuse, prive l'eau de ses minéraux essentiels. La reminéralisation s'impose donc comme une étape cruciale pour garantir la qualité et la conformité de l'eau dessalée aux normes de potabilité. En effet, l'eau déminéralisée issue du dessalement par osmose inverse est pauvre en sels et en oligo-éléments. Cette carence peut entraîner des problèmes de santé, tels que l'ostéoporose et les maladies cardiovasculaires. De plus, une eau trop douce est agressive pour les canalisations et les appareils ménagers, et peut perturber l'équilibre des écosystèmes aquatiques lors de son rejet.

La reminéralisation permet de pallier à ces risques en ajoutant les minéraux nécessaires à l'eau produite. Elle améliore ainsi sa saveur, prévient les carences en minéraux, protège les infrastructures et limite l'impact environnemental du dessalement. Différentes techniques de reminéralisation existent, telles que l'ajout de sels minéraux, le mélange avec de l'eau minérale ou l'utilisation de matériaux reminéralisants. Le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs, tels que la qualité de l'eau d'alimentation, les normes de potabilité à respecter et les

coûts d'investissement et d'exploitation. En conclusion, la reminéralisation est un processus indispensable pour une eau dessalée de qualité, sûre et durable. Elle garantit une ressource en eau précieuse pour les populations et les écosystèmes, tout en préservant l'environnement.

Chapitre IV:

Description de la zone d'étude

Introduction :

La réalisation des stations de dessalement d'eau de mer a été un choix d'urgence adopté par les hautes autorités du pays pour faire face à la rareté de l'eau et sécuriser l'alimentation en eau potable. La station de dessalement d'eau de mer de Cap Blanc devra sécuriser l'alimentation en eau potable dans la wilaya d'Oran et renforcer les capacités hydriques d'autres wilayas comme Aïn Temouchent, Relizane et Mascara. Un nouveau schéma hydrique sera adopté pour la wilaya, sitôt la station de Cap blanc entré en service. Cette station impactera de manière directe la région ouest de la wilaya d'Oran, les communes de la daïra d'Aïn El-Turck en l'occurrence, qui connaissent beaucoup de perturbations dans l'AEP, notamment au cours de la saison estivale, sans oublier que la région Est de la wilaya, dont les ressources sont partagées avec une partie de la région Ouest, sera impactée de manière indirecte. Ainsi, la région Est de la wilaya d'Oran aura, pour elle seule, les quotas de la station d'El Mactaâ et du système MAO (couloir Mostaganem-Arzew-Oran), alors que la région Ouest sera approvisionnée principalement par la nouvelle station de Cap Blanc.

L'apport de la nouvelle station devra sécuriser l'alimentation en eau postale dans la wilaya et mettra fin aux derniers points noirs de la distribution d'eau à Aïn El-Turck et au nouveau pôle urbain Ahmed Zabana, en plus de renforcer les capacités hydriques des wilayas voisines.

C'est un projet d'envergure en cours de construction. Les travaux ont débuté en 2022 et devrait être mise en service fin 2024. les travaux de réalisation des ouvrages de base (génie civil) tirent à leur fin et avoisinent les 100%, alors que le taux d'avancement des travaux de la superstructure se situe entre 60 et 70 %.

Le taux d'avancement global des travaux de ce projet confié à des filiales du groupe Sonatrach, à savoir Algerian Energy Company (AEC), appuyées par la société nationale de génie civil et du bâtiment (GCB) et l'Entreprise nationale des grands travaux pétroliers (ENGTP), est estimé à près de 25 %. le projet entrera prochainement dans la phase d'accueil et d'installation des équipements qui seront utilisés dans le dessalement de l'eau de mer .

IV.1 Définition de la station de dessalement cap blanc d'Oran :

La station de dessalement de Cap Blanc, avec une capacité de production de 300 000 m³ d'eau potable par jour, est située à Aïn El Kerma, commune de Beni Saf dans la wilaya d'Oran, La station est plantée à environ 12 kilomètres à l'ouest du centre-ville d'Aïn El Kerma, sur la côte méditerranéenne. Elle est accessible par la route nationale RN11, en direction de Béni Saf. Elle se trouve à proximité de l'aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella, est également située à quelques kilomètres de la plage de Cap Blanc, une plage populaire de la région.



figure IV .1. La station de dessalement de Cap Blac depuis Google Earth
Source :Google Earth

La station, occupe une superficie totale et de 12 Ha avec une superficie bâtie de 10.58 Ha, délimité comme suit :

- **A l'Ouest** : par un terrain agricole ;
- **A l'Est** : par un terrain agricole ;
- **Au nord** : par la mer méditerranéenne ;
- **Au sud** : par la montagne Djebel Eng El Djemel; La station de dessalement est située aux coordonnées GPS : 35.6855230, -0.9830772

IV.2 Etudes préliminaires :

2.1. Evaluation de la pluviométrie :

Dans la région du nord-ouest, les précipitations sont généralement importantes et irrégulières. Certaines années sont totalement humides tandis que d'autres comptent de violents orages produisant en quelques heures toutes les précipitations de l'année.

Pendant l'année 2022, les mois les plus pluvieux dans la région de Oran, sont Février et Novembre. Cependant, la moyenne mensuelle des précipitations est variable et irrégulière avec de périodes de sécheresse de Juin à Aout. Dans la région d'Oran, les mois les moins pluvieux, sont avril, juin et septembre avec des précipitations faibles et irrégulières.

Ce qui nous mène à conclure que la wilaya d'Oran connaît une sécheresse considérable ces dernières années et un manque hydrique qui nécessite une intervention.

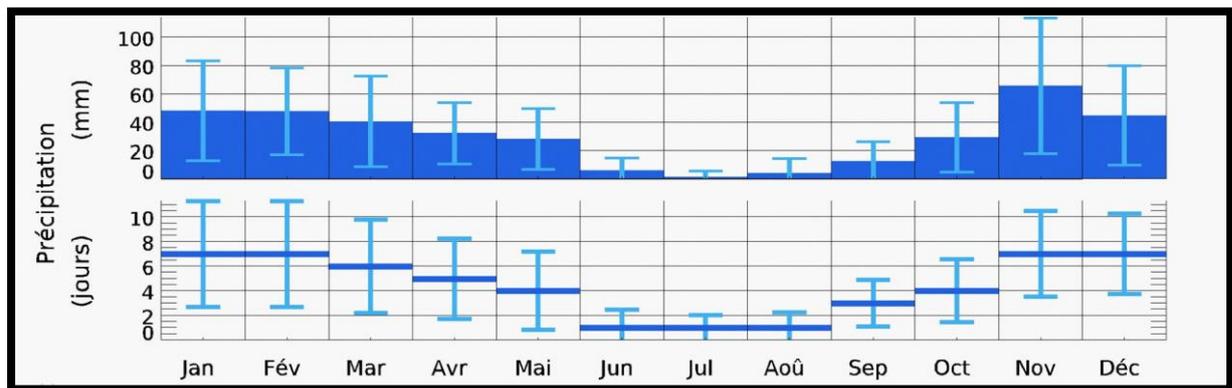


figure IV .2. Les quantités de précipitations dans la wilaya d'Oran durant l'année

Source : Entreprise GCB

IV.3 Évaluation de la population :

Afin d'évaluer les besoins en eau de la wilaya d'Oran, il est nécessaire d'étudier son évolution démographique.

La population totale de la wilaya d'Oran est de 1,468 million (2019) habitants.

Elle a connu une croissance constante au cours des dernières décennies, avec un taux de croissance annuel moyen d'environ 1,5% entre 2008 et 2019. La densité de population de la wilaya est de 1152 habitants par km², ce qui en fait l'une des wilayas les plus densément peuplées d'Algérie.

Et on ce qui concerne la population de la commune de Ain El Kerma : 7 513 hab (2009).

IV.4 Evaluation de la température :

La température de l'air peut influencer négativement les équipements d'une station de dessalement en augmentant la formation de tartre, la prolifération bactérienne, la consommation d'énergie et la corrosion. Elle peut également réduire l'efficacité des membranes d'osmose inverse et la production d'énergie.

Des mesures de contrôle de la température, comme la climatisation ou l'isolation, sont souvent nécessaires pour minimiser ces impacts et assurer un fonctionnement optimal de la station.

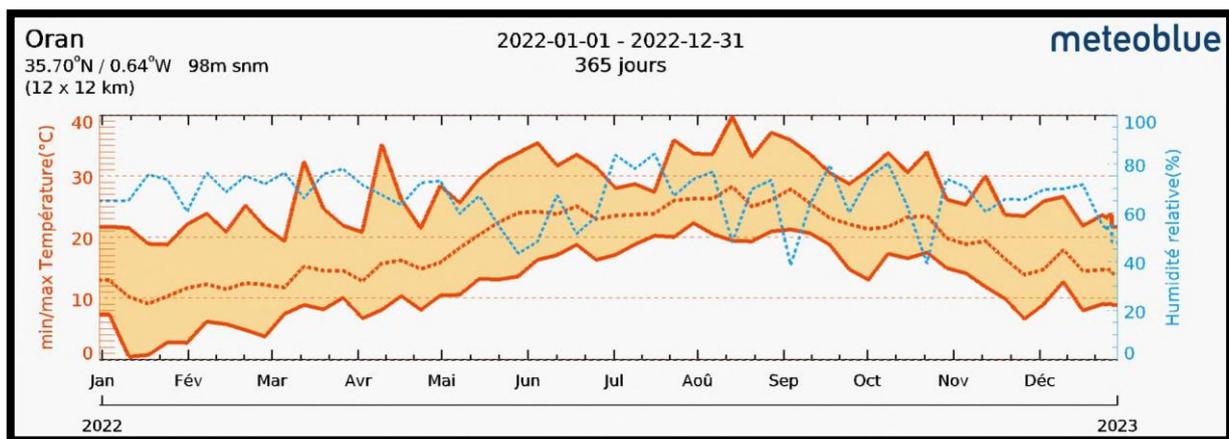


figure IV .3. Représentation de la température pendant une année dans la Wilaya d'Oran

Source :Entreprise GCB

IV.5 Prélèvement d'échantillons d'eau :

Des prélèvements d'échantillons d'eau de mer sont cruciales à la phase de planification et de conception d'une station de dessalement, car ils permettent de caractériser les propriétés chimiques et physiques de l'eau source et d'évaluer sa compatibilité avec les différentes technologies de dessalement.

La campagne de prélèvement d'eau et de sédiments marins pour analyses chimiques et biologiques au laboratoire a été effectuée durant le mois de Juillet 2022, au niveau de six (06) stations réparties entre les isobathes -12 m et – 22 m

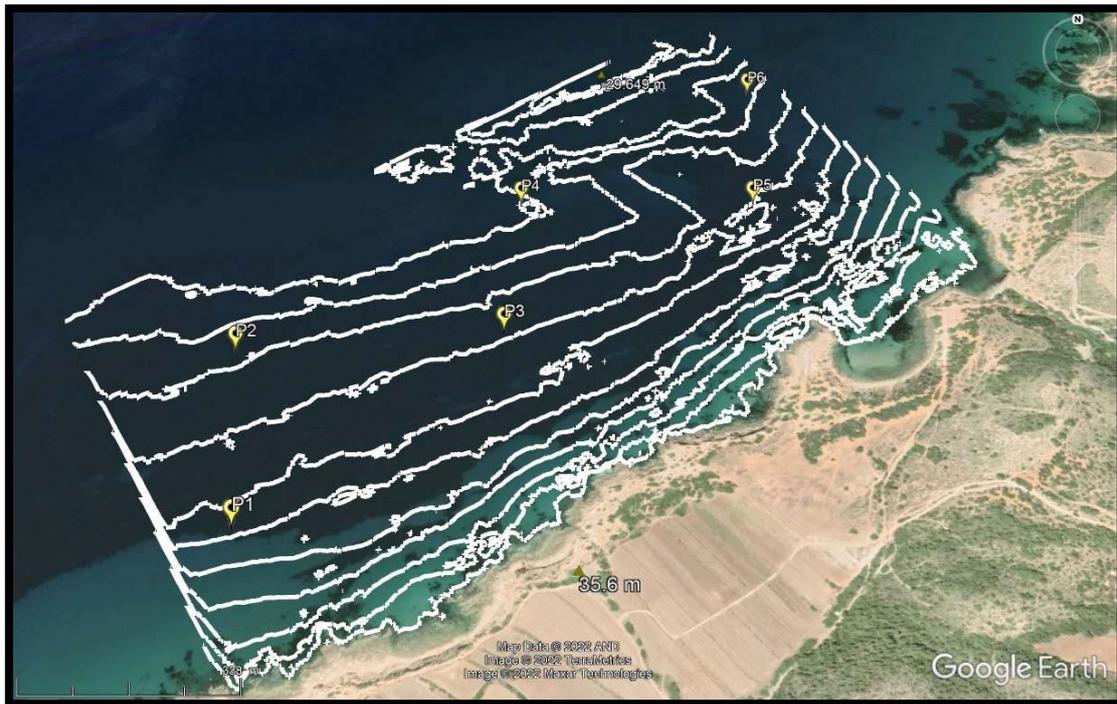


figure IV .4. Représentation des points de prélèvement d'échantillons d'eau
source :Entreprise GCB

Les prélèvements d'échantillons d'eau ont été effectués sur les différentes strates de la colonne d'eau (surface, intermédiaire et fond), à l'aide de la bouteille Niskin, tandis que les échantillons de sédiments ont été prélevés à l'aide la benne Van Veen :

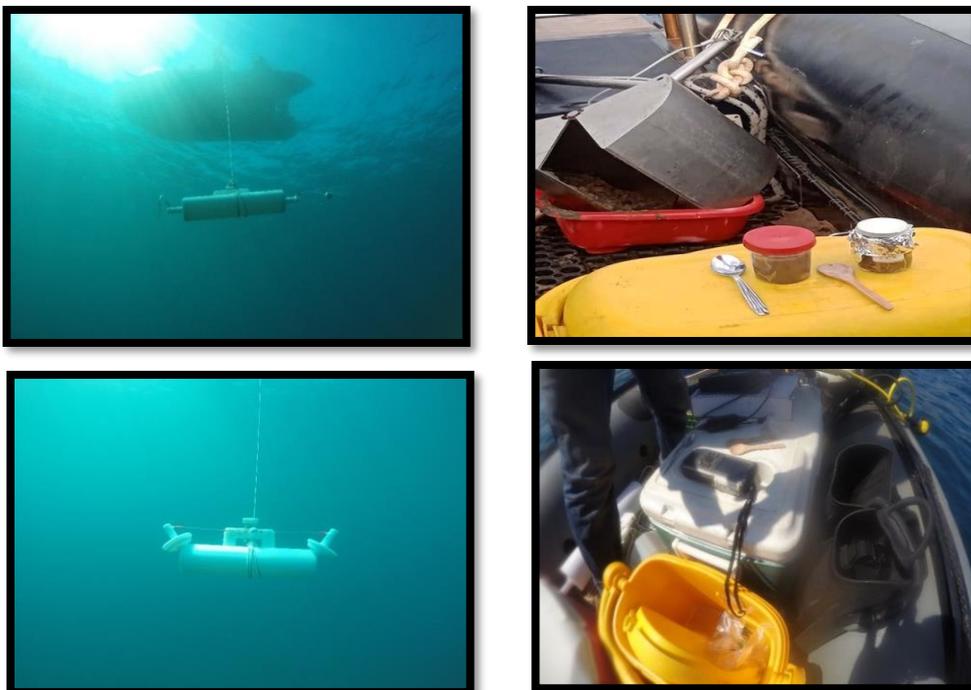


figure IV .5. Outils et méthode de prélèvement
Source : Entreprise GCB

Des mesures in-situ effectuées, au niveau des sites d'études sont présentées sur le Tableau pour les paramètres suivants :

- Température (T) ;
- Potentiel Hydrogène (pH) ;
- Salinité ;
- Oxygène Dissous ;
- Conductivité ;
- Turbidité.

Tableau IV.1 Mesures in-situ au niveau de la zone d'étude

N° Station		Profondeur (meters)	Turbidité (NTU)	T (°c)	S ‰	O ₂	pH	Conductivité (mS/cm)
ST 1	S	-1	0,59	24,2	38	8,62	8,17	57,4
	I	-6.5	0,45	24	37,5	8,70	8,17	56,6
	F	-12	0,45	23,5	37,7	9,8	8,16	56,6
ST 2	S	-1	0,53	24,2	37,5	8,9	8,17	56,5
	I	-8.5	0,60	23,5	37,6	8,88	8,16	56,6
	F	-18	0,58	23,1	37,5	10,02	8,14	56,5
ST 3	S	-1	0,52	24,2	37,9	8,85	8,15	56,5
	I	-8	0,50	24,0	37,9	8,88	8,12	56,7
	F	-15	0,48	23,4	37,7	9,65	8,12	56,7
ST 4	S	-1	0,59	24,5	37,5	8,75	8,15	56,8
	I	-11	0,70	24,1	37,6	9,10	8,15	56,6
	F	-21	0,71	23,7	37,5	9,46	8,13	57,1
ST 5	S	-1	0,59	23,7	38,4	9,10	8,18	57,5
	I	-8	0,56	23,3	37,6	9,17	8,17	56,8
	F	-15	0,64	23,1	37,6	10,06	8,18	56,7
ST 6	S	-1	0,43	25,2	37,4	8,72	8,17	56,8
	I	-10	0,46	24,7	37,4	8,94	8,15	56,5
	F	-19	0,49	24,7	37,5	8,98	8,15	56,6

I.1 S : Surface, I : Intermédiaire et F : Fond

Source : Entreprise GCB

IV.6 Analyse des données :

6.1. Température :

La température joue un rôle dans la solubilité des sels, la conductivité électrique du milieu et la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc. Les valeurs des températures pour l'ensemble des stations prospectées s'intègrent dans l'intervalle de température qui caractérise la mer méditerranéenne en cette période d'année.

6.2. Salinité :

La salinité des eaux de surface varie en fonction du rapport précipitation/évaporation. La valeur moyenne au niveau de la zone de prélèvement est de 37,65‰.

6.3. Oxygène dissout :

L'oxygène est un paramètre utile dans le diagnostic biologique de l'eau de mer, il varie inversement avec la pollution de l'eau. La valeur moyenne enregistrée au niveau de la zone de prélèvement est de 9,14 mg/l.

6.4. PH :

Le pH est considéré comme étant l'un des paramètres les plus importants de la qualité des eaux naturelles. Par ailleurs, Brisou et Denis, 1980 et Aminot et Kérouel, 1983, estiment quant à eux à 8,2 sa valeur moyenne pour l'eau de mer. La valeur moyenne enregistrée au niveau de la zone de prélèvement est de 8,15.

6.5. Conductivité :

Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 56,75 mS/cm au niveau de la zone de prélèvement, ce qui est en accord avec les valeurs de température et de salinité relevées au sein de la même zone.

6.6. Turbidité :

Selon le manuel de l'Américain Public Health Association de 1965. Les valeurs de turbidité dans la zone d'étude sont comprises dans l'intervalle [0,43 ; 0,71] exprimées en Unités de Turbidité Néphélométrique (NTU). La turbidité des eaux côtières, variable selon les lieux et les saisons, est de l'ordre de 0,5 à 5 NTU (Aminot, 1983), ce qui s'accorde avec les valeurs relevées au niveau de la zone de prélèvement.

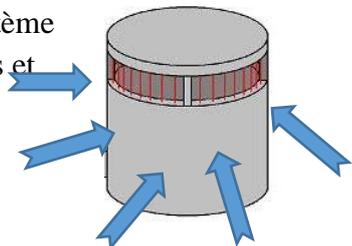
IV.7 Description détaillée de la station :

La station se compose de 3 parties importantes :

1. La chaîne de production d'eau qui se compose de :
 - Captage
 - Prétraitement
 - L'osmose inverse
 - La reminéralisation
 - Le pompage d'eau produite
2. le bâtiment administratif.
3. laboratoire d'analyse d'eau.

7.1. Prise d'eau de mer et station de pompage :

L'eau de mer est prélevée directement de la mer par des pompes et acheminée vers la station de pompage. Ce processus implique plusieurs étapes clés :

- **Tour de captage :** Une structure qui permet de collecter l'eau de mer et de la diriger vers les conduites d'amenée. Elle est équipée d'un système de dégrillage pour éliminer les débris flottants tels que les poissons et autres gros déchets comme le montre le schéma à droite.
- 
- Le schéma illustre une tour de captage cylindrique. À l'entrée supérieure, il y a un système de dégrillage représenté par une grille rouge. Plusieurs flèches bleues indiquent l'entrée d'eau de mer dans la tour. À la base de la tour, deux conduites d'amenée sont représentées par des flèches bleues pointant vers l'extérieur.
- **Conduites d'amenée :** Deux conduites parallèles en PEHD d'un diamètre DN 2500 PEHD x 2, et d'une longueur de 550 m transportent l'eau de mer captée vers l'ouvrage de réception.
 - **Bassin de captage :** L'eau de mer entre dans le bassin de captage situé à -7m du niveau de la mer, à un débit d'environ 674 000 m³/h. Elle est ensuite pompée vers le bac de réception pour la poursuite du traitement.
 - **Vannes d'isolement :** Deux vannes motorisées situées sur l'arrivée permettent d'isoler les conduites en cas de besoin.

- **Système de dessablage :** Un système de dessablage installé au niveau de l'arrivée de l'eau permet d'extraire le sable et autres particules sédimentaires, qui sont ensuite décantés dans une fosse dédiée.
- **Système de dégrillage :** Un système de dégrillage grossier élimine les gros débris tels que les poissons, suivi d'un système de dégrillage fin pour capturer les particules plus petites. Le bac de réception est divisé en trois compartiments, chacun équipé de ces deux types de grilles (grilles à barreaux) verticaux 90°.

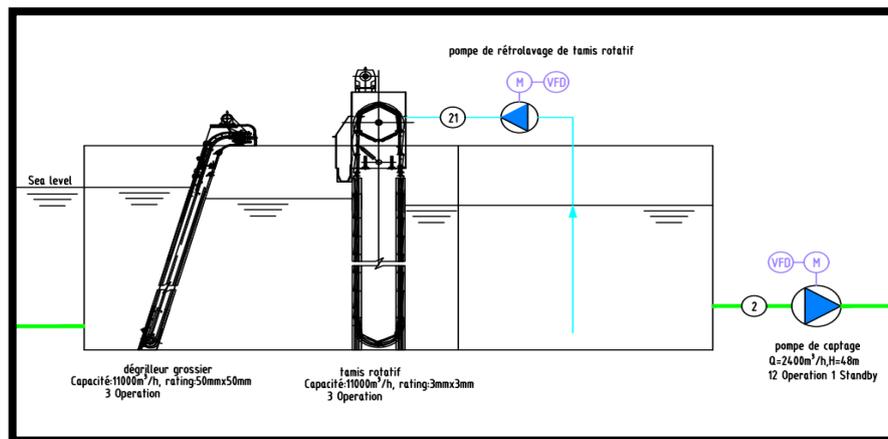


figure IV .6. Coupe d'un schéma du bassin de captage représentant le dégrilleur et le tamis rotatif

Source : Entreprise GCB

7.2. Bac d'eau de mer et station de pompage :

Le bac d'eau de mer et la station de pompage assurent le stockage et la distribution de l'eau de mer traitée vers les différentes étapes du processus de dessalement. Les éléments clés de ce système comprennent :

- **Bac d'eau de mer :** Le bac d'eau de mer stocke l'eau de mer prétraitée avant son pompage vers les unités de dessalement. Il est équipé de deux transmetteurs de niveau qui permettent de contrôler et de réguler le fonctionnement des pompes d'alimentation en eau brute.
- **Pompes d'échantillonnage :** Des pompes d'échantillonnage prélèvent de l'eau du bac pour alimenter les instruments de mesure et permettre le contrôle continu de la qualité de l'eau.
- **Pompes d'eau motrices :** Ces pompes assurent le transport de l'eau de javel utilisée pour la désinfection des deux tours de captage.

- **Pompes d'alimentation d'eau potable :** Neuf pompes à eau de mer (8 en service et 1 en secours) assurent l'alimentation en eau potable des installations.

7.3. Prétraitement :

- **Coagulation :** des bacs de coagulation neutralisent les charges des particules pour les déstabiliser. Un agitateur mécanique assure le mélange avec un temps de séjour de 2min.
- **Floculation :** des bacs de floculation regroupent les particules déstabilisées en floccs plus gros grâce à un polymère (floculant) et un agitateur lent avec un temps de séjour de 24h.
- **Décantation lamellaire :** des décanteurs lamellaires séparent les floccs de l'eau par gravité. Un racleur de boues évacue les sédiments vers une fosse d'extraction.
- **Filtration sur sable :**
 - Deux lignes de filtres à sable horizontaux sous pression assurent une filtration fine de l'eau avant l'osmose inverse.
 - La vitesse nominale de filtration est de 5,5 - 6,50 m/h.
 - Le lavage à contre-courant des filtres s'effectue à l'aide de saumure stockée dans une bache.
- **Filtration sur cartouche :**
 - Des filtres à cartouche protègent les membranes d'osmose inverse des particules fines résiduelles après la filtration sur sable.
- **Osmose inverse :**
 - L'eau prétraitée et décolorée est pompée vers l'unité d'osmose inverse d'eau de mer (SWRO) pour produire une eau dessalée avec une salinité de 57 à 178 mg/l.
 - La pression de l'eau est augmentée par des pompes haute pression avant son passage dans les membranes.
 - Le flux d'alimentation est divisé en deux : 45% d'eau produite (perméat) et 55% d'eau rejetée (saumure), c'est ce qu'on appelle le taux de conversion.
 - L'unité d'osmose inverse comprend des pompes haute pression qui pressurisent l'eau d'alimentation à environ 60 bars, des tubes de pression contenant les membranes, un système de récupération d'énergie et des pompes de surpression.
- **Modules d'osmose inverse :**
 - L'eau sous pression alimente les tubes de pression RO, où environ 45% traverse les membranes pour produire de l'eau douce. Le reste est collecté sous forme de saumure.
 - La perte de charge à travers les membranes est de 1,5 à 2 bars.
 - Un système de récupération d'énergie réutilise l'énergie du concentré pour alimenter une partie de l'eau d'alimentation des membranes.
 - Le perméat de l'osmose SWRO est collecté dans le réservoir de rinçage.
- **Échangeur de pression (PX):**
 - L'échangeur de pression transfère l'énergie de la saumure à l'eau d'alimentation RO avec une efficacité de 95% à 97%.

- Il permet de réduire la taille des pompes haute pression et de récupérer plus de 90% de l'énergie de la saumure.
- **Réservoir de perméat/rinçage :**
Une partie de l'eau produite par les unités d'osmose inverse est stockée dans un réservoir en PRV³ pour le rinçage des unités et l'alimentation de la station de nettoyage chimique des membranes.

7.4. Système de reminéralisation :

La reminéralisation ajuste l'indice de saturation calcique (LSI) du perméat d'osmose inverse pour obtenir une eau neutre, ni corrosive ni entartrante. Cela implique l'ajustement de la dureté et de l'alcalinité de l'eau en dissolvant de la calcite (calcaire) et en injectant de l'acide ou du CO₂.

Cellule de calcite :

Le flux de perméat sortant des racks d'osmose inverse est divisé en deux. Une partie est mélangée ultérieurement avec l'eau reminéralisée, tandis que l'autre partie est dosée en CO₂ et introduite dans des cellules de calcite.

Réservoirs d'eau produite :

Deux réservoirs rectangulaires en béton armé stockent l'eau traitée avant sa distribution. Un revêtement époxy protège les parois contre l'agressivité de l'eau.

Pompes d'eau produite :

Des pompes assurent le pompage vers le réseau de distribution.

Pompes d'eau potable :

Deux pompes (1 en service et 1 en secours) alimentent le réseau d'eau potable.

Système de rejet :

Bâche de neutralisation :

Elle reçoit les eaux de lavage des filtres à sable et les eaux usées du nettoyage chimique des membranes. La soude caustique et l'acide chlorhydrique neutralisent le pH de l'eau.

Bâche de rejet :

Elle reçoit les eaux de saumure excédentaires de la bâche de saumure. Elle assure l'évacuation des rejets vers la conduite d'évacuation. Des systèmes de dosage d'acide et de soude caustique sont également présents.

Chaîne de traitement des boues :

Elle Traite les eaux de lavage des filtres à sable et des boues du décanteur lamellaire, ces eaux sont regroupées dans une bâche puis pompées vers deux décanteurs lamellaires. Les eaux claires rejoignent la bâche de neutralisation tandis que les boues sont envoyées vers deux épaisseurs. L'eau claire des épaisseurs rejoint la bâche de neutralisation et la boue épaisse est pompée vers des centrifugeuses pour augmenter sa siccité. La boue déshydratée est collectée et le drainage renvoyé vers la bâche de neutralisation.

Conclusion :

Les compartiments d'une station de dessalement d'eau de mer illustrent un processus ingénieux et sophistiqué qui permet de transformer une ressource abondante mais impropre à la consommation en une eau précieuse et vitale consommable par les populations. Chaque filière joue un rôle essentiel dans ce défi, garantissant la production d'une eau potable de qualité dans le respect de l'environnement.

Chapitre V:
**Dimensionnement de la chaine de
post traitement**

Introduction :

Le post-traitement d'une station de dessalement est crucial pour rendre l'eau produite potable et conforme aux normes de qualité. Il consiste à reminéraliser l'eau pour la rendre moins agressive, à ajuster son pH, à la désinfecter pour éliminer les micro-organismes, à la filtrer pour éliminer les impuretés résiduelles, et à la stocker et la distribuer dans des conditions optimales.

Un dimensionnement adéquat du post-traitement est crucial pour garantir une eau potable conforme aux normes, un fonctionnement optimal de la station, une rentabilité à long terme et une protection de l'environnement. Il influence directement la qualité de l'eau, la performance de l'installation, la viabilité du projet et la préservation des écosystèmes aquatiques.

V.1 Qualité de l'eau produite par le système de reminéralisation :

Selon les exigences, en se basant sur les analyses de l'eau brut et en ayant un système de reminéralisation bien conçu, les caractéristiques de l'eau après reminéralisation doivent être les suivantes :

- Débit $\geq 12500 \text{ m}^3/\text{h}$
- Alcalinité $\geq 60 \text{ mg/L}$
- TDS $\leq 300 \text{ mg/L}$
- Dureté $80\sim 150 \text{ mg/L}$
- Boron $\leq 1.3 \text{ mg/L}$
- pH $7.0\sim 8.5$
- LSI $0\sim 0.4$
- Ca^{2+} 32mg/L

V.2 Paramètres de conception :

Il est important avant tout calcul hydraulique de connaître les paramètres essentiels à la conception d'un ouvrage de reminéralisation qui sont entre autre :

Tableau V.1 Paramètres de conception

Vitesse de passage (m/h)	12
Temps de contact (min)	15
Flux de retro-lavage a l'air ($L/m^2 \cdot s$)	15
Durée de lavage à contrecourant (min)	5
Intensité de retro-lavage de l'eau ($L/m^2 \cdot s$)	12
Durée de retro-lavage a l'eau (min)	15

Source : élaboré par l'étudiante depuis les données de l'entreprise GCB

Les Cellules de calcite placés en parallèle. Comme ils ont la même hauteur, ils offrent la même contre-pression. Cela facilite la conception hydraulique du collecteur d'entrée et assure une distribution uniforme et constante de l'eau dans les différents réservoirs.

Les Cellules de calcite fonctionnent par gravité avec une faible perte de charge, de sorte qu'ils peuvent fonctionner directement avec la pression de sortie des SKID d'osmose inverse.

Dans le procédé, des contacteurs à flux ascendant de hauteur de lit de calcite constante sont créés par les moyens suivants :

l'alimentation en calcite granulé en continu, sous l'eau, et directement sur le lit de calcite par un système d'alimentation en calcite (entonnoir en pvc) comme le montre le schéma ci dessous

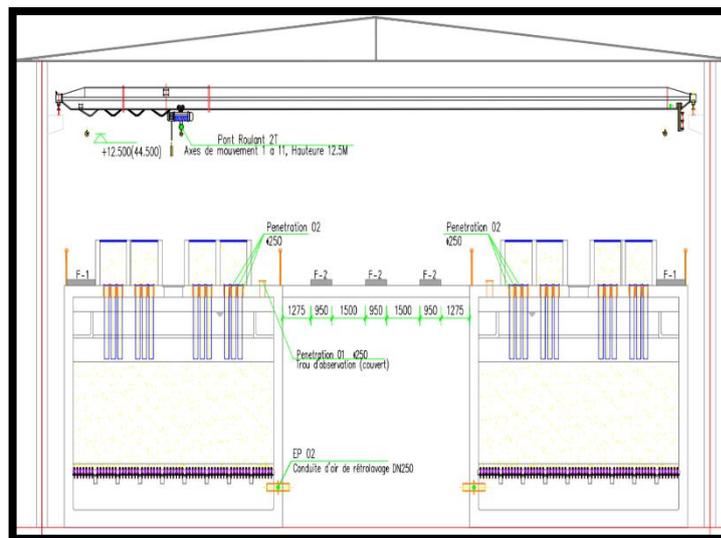


figure V .1. Coupe d'un schéma de lit de calcite

Source : entreprise GCB

Dans ce type de système, l'eau produite par l'osmose inverse, dépourvue de minéraux essentiels, est injectée dans la partie inférieure d'un réacteur rempli de calcite. Contrairement à un flux descendant traditionnel, l'eau s'élève à travers le lit, favorisant ainsi un meilleur mélange avec la calcite et réduisant les pertes de charge. Ce mouvement ascendant permet également de limiter la sédimentation des particules, évitant ainsi le colmatage du lit.

Pour maintenir l'efficacité du lit de calcite, un lavage à contre-courant est régulièrement effectué. Ce procédé consiste à faire circuler l'eau en sens inverse du flux principal, c'est-à-dire de haut en bas. Cette opération permet d'éliminer les impuretés accumulées sur le lit et de régénérer le matériau, garantissant ainsi une qualité constante de l'eau traitée.

Avantages de ce système

Ce système présente plusieurs avantages par rapport à un système traditionnel :

- **Haute efficacité de reminéralisation :** Le flux ascendant et le lavage à contre-courant optimisent les échanges entre l'eau et la calcite, assurant une reminéralisation efficace.
- **Longue durée de vie du lit de calcite :** Le lavage régulier permet de prolonger la durée de vie du lit en réduisant l'encrassement.

- **Réduction des coûts de maintenance** : Une maintenance moins fréquente est nécessaire grâce à l'efficacité du système.
- **Flexibilité d'exploitation** : Ce système peut être adapté à différents débits et qualités d'eau.

Selon les exigences, l'alcalinité doit être supérieure à 60 mg/L (as $CaCO_3$), tandis que la dureté doit être comprise entre 80 et 150 mg/L, cela signifie que la concentration du $CaCO_3$ ne doit pas être inférieure à 80 mg/L.

D'après l'expérience de HWTT (Hangzhou Water Treatment Technology) dans les systèmes d'eau reminéralisée, une dureté excessive entraînera un mauvais goût de l'eau potable. Le calcul est donc basé sur une dureté adéquate de 80 mg/L comme donnée d'entrée.

V.3 Calculs de dimensionnement des réservoirs à reminéralisation :

On a comme données d'entrées :

- Débit de l'eau produite à la sortie de l'osmose inverse $Q=13750 \text{ m}^3/\text{h}$
- Vitesse de passage $U=12 \text{ m/h}$
- Temps de contact $T=15 \text{ min}$

Selon les données précédentes : débit d'eau entrant, normes exigées ainsi que la configuration du système de reminéralisation (espace disponible) on a opté pour un nombre de réservoirs optimal de $N=24$ réservoirs plus un réservoir en standby.

- Superficie de chaque réservoir :

$$S=Q/(U*N)$$

$$S=13750/12*24$$

$$S=48 \text{ m}^2$$

On se basant sur le résultat précédent, on prend les dimensions de longueur et largeur de la section du réservoir comme suit :

$$\text{Longueur } L=9 \text{ m}$$

$$\text{Largeur } W=5 \text{ m}$$

- La surface de la section du réservoir est donc :

$$S' = L * W$$

$$S' = 45 \text{ m}^2$$

- Vitesse réelle de passage :

$$U_0 = Q / \left(\frac{N}{S'} \right)$$

$$U_0 = 12,73 \text{ m/h}$$

- Vitesse de passage max :

$$U' = Q / S' / (N - N')$$

$$U' = 13,29 \text{ m/h}$$

- Calcul de la hauteur du lit :

$$H = T * U$$

$$H = 3 \text{ m}$$

Donc on prend la hauteur $H' = 3,5 \text{ m}$

- Calcul du temps de contact avec le lit :

$$T_0 = H' / U_0$$

$$T_0 = 16,49 \text{ min}$$

V.4 Sélection de l'équipement pour le process du système de reminéralisation :

- Pour le rétro-lavage :

Tableau V.2 Données du retro lavage

Intensité du contre lavage a l'eau ($L/(m^2 \cdot s)$)	U_1	12
Débit de lavage à contrecourant (m^3/h)	$Q_1 = U_2 * S$	1944

- Pour le rinçage à l'air

Tableau V.3 Données du rinçage à l'air

Flux de la purge d'air ($L/(m^2 \cdot s)$)	U_2	15
Débit d'air m^3/min	$Q_2 = U_2 * S$	40,5

V.5 Granulométrie et caractéristiques du lit de calcite :

Dans cette étude on a opté pour la calcite comme matériaux de reminéralisation ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau V.4 Caractéristiques de la calcite

	Diamètre(mm)	Hauteur(mm)	Densité(kg/m^3)	Pureté%	Poids(Ton)
Calcite	2-4	3500	1500	95	236,3

5.1. Impact de la taille des grains de calcite sur la profondeur du lit :

Il est important de noter que la taille des grains de calcite a un impact sur la profondeur nécessaire du lit de calcite. En particulier, si les grains de calcite sont plus grands que 2 mm, la profondeur de la zone de contact du lit doit être augmentée.

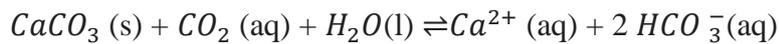
Par exemple, si des grains de calcite de 3 mm sont utilisés au lieu de 2,5 mm, la profondeur de la zone de contact du lit de calcite devra être augmentée d'environ 30%. De même, si la taille des grains de calcite est réduite de 2,5 mm à 2,0 mm, la hauteur requise de la zone de contact du lit pourra être réduite d'environ 25%. Cependant, une réduction supplémentaire de la taille des grains à 1,5 mm ou moins aura un impact moindre sur la profondeur nécessaire du lit de calcite. Ainsi, la taille optimale des grains de calcite se situe généralement entre 1,5 et 2,0 mm pour atteindre la profondeur de lit appropriée. Il est important de prendre en compte cette considération lors de la conception du lit de calcite afin d'assurer une performance optimale du système de reminéralisation.

V.6 Calcul du process du système de reminéralisation :

6.1. Consommation de calcite :

La dureté de l'eau produite est de 80mg/L, la concentration du Ca^{2+} sera donc de 32mg/L et la masse molaire du carbonate de calcium et du calcium est respectivement : 100 mol/L et 40mol/L.

Donc Selon l'équation suivante :



$$100 \qquad \qquad \qquad 40$$

$$X \qquad \qquad \qquad 32$$

On déduit donc que la concentration de carbonate de calcium consommée est :

$$X_{max} = 32 * 100/40$$

$$X_{max} = 80 mg/L$$

Ainsi la calcite consommée est :

$$M_{max} = Q * X_{max}/\eta$$

η : la pureté en %

$$M_{max} = 1157,9 kg/h$$

6.2. Calcul du stockage de calcite

Compte tenu des conditions de transport, il est recommandé que la durée de stockage (T1) de la calcite ne dépasse pas les 30 jours.

Donc le volume de stockage minimum :

$$V1 = M(max) * T1 * 24 / \rho$$

$$V1 = 555,79 m^3$$

Le stockage de la calcite pour chaque réservoir reminéralisé :

$$V' = V1/N$$

$$V' = 23,16 m^3$$

6.3. Consommation du dioxyde de carbone :

De la même manière que le calcul de la consommation de la calcite

La masse molaire du CO_2 est 44 g/mol :

6.5. Stockage du dioxyde de carbone :

Il est recommandé d'installer deux réservoirs de stockage du CO_2 pour une semaine de capacité totale de l'installation.

Le volume minimal du réservoir de stockage de CO_2 est :

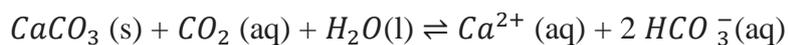
$$V_{CO_2} = M_{max} * 24 * 7 / \rho / \zeta / 2$$

$$V_{CO_2} = 44 \text{ m}^3$$

ζ : solubilité en %

6.6. Vérification du PH de l'eau produite :

On a selon l'équation suivante :



40	61
32	X

$$X_{max} = 32 \times 2 \times 61 / 40 = 96 \text{ mg/L}$$

Calcul de la molarité du CO_2 libre :

$$\begin{aligned} n_{CO_2} (\text{max}) &= M(\text{max}) \times (1 - \zeta) / 44 / Q \\ &= 0,0000978 \text{ mol/L} \\ &= 4,3 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$pH = 6.35 + \log[HCO_3^-] / [CO_2]$$

$$pH = 7,7$$

6.7. Calcul de la période de lavage à contrecourant :

Normalement, les réservoirs de reminéralisation doivent être lavés à contre-courant, lorsque l'impureté de la calcite est supérieure à 20% du calcite, on a comme données :

- Hauteur de calcite (H) = 3,5 m
- Surface de lit de calcite (S) = 45 m²
- Proportion d'impuretés (σ) = 20%
- Consommation de calcite (M) = 1157,895 kg/h
- Pureté de calcite (τ) = 95%
- Densité d'empilement de calcite (ρ) = 1500 kg/m³

La période de backwash(T) est donc :

$$T = \frac{H \cdot S \cdot \sigma \cdot \rho}{(1 - \tau) \cdot M}$$

$$= 816 \text{ h}$$

$$= 34 \text{ day}$$

6.8. Calcul du taux de récupération du réservoir de reminéralisation :

la période de backwash(T) 34 jours :

- Débit d'eau du lavage à contre-courant (Q1) = 1944 m³/h Durée (t1) 15 min
- Débit d'air du lavage à contre-courant (Q2) = 41 m³/min Durée (t2) 5 min
- Débit du rinçage à contre-courant (Q3) = 1052 m³/h Durée (t3) 5 min

Taux de récupération (RRT)

$$RRT = \frac{(T - t_1 - t_2 - t_3) \cdot Q_3 - Q_1 \cdot t_1}{T \cdot Q_3}$$

$$RRT = 99,88\%$$

6.9. Calcul de l'index de Langelier :

L'indice de Langelier est un outil essentiel qui permet d'évaluer la tendance d'une eau à former des dépôts (tartre) ou à être corrosive envers les matériaux. C'est un paramètre qui joue un rôle crucial pour garantir la qualité et la durabilité des équipements, des conduites et surtout la santé humaine.

On doit d'abord calculer l'indice de Langelier de l'eau juste à la sortie du lit de calcite

On a comme données d'entrée :

Température (°C)	:	min 14	/	max 30
TDS (mg/L)	:	min 236	/	max 391
PH	:	7,7		
Dureté Calcique TH (mg/L)	:	80		
Alcalinité TAC (mg/L)	:	80		

En se basant sur le tableau suivant :

Tableau V.5 Paramètres de calcul du PH de saturation

TDS (mg/L)	TDS F	Temp.	TF	Dureté Calcique (mg/L)	CF	Alkalinité	AF
100	0,1	14	2,23	30	1,06	30	1,48
150	0,11	17	2,16	40	1,20	40	1,60
200	0,13	20	2,09	50	1,30	50	1,70
300	0,14	23	2,03	60	1,38	60	1,78
400	0,16	26	1,96	70	1,45	70	1,85
600	0,18	29	1,90	80	1,51	80	1,90
800	0,19	30	1,88	90	1,56	90	1,95

TDSF: Total dissolved solid factor TF: Temperature factor

CF : Calcium hardness factor AF: Alkalinity factor

Source : entreprise GCB

Et à l'aide des équations suivantes :

- Langelier Index (LSI) = pH – pHs
- pHs = 9.3 + TDSF + TF - CF – AF

on obtient les valeurs adéquates de LSI pour une eau potable à des températures de 14° et 30° :

- LSI valeur min = -0,421
- LSI valeur max = -0,086

On remarque que même si en température maximale T=30° (une température pas très commune) l'eau reste toujours corrosive ce qui n'est pas avantageux.

L'exigence de LSI dans l'eau du produit final est de 0~0,4, de sorte que le pH final de l'eau du produit doit être contrôlé à 7,8~8,2. L'hydroxyde de sodium *Na OH* (de qualité alimentaire) est choisi pour contrôler le pH de l'eau du produit. De plus, la valeur du pH obtenue de 7,7 est inférieure aux normes exigés, Un pH autour de 8,2 est optimal car il correspond souvent à une zone de stabilité où l'eau est moins susceptible de provoquer des problèmes de corrosion ou d'entartrage.

V.7 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.

7.1. 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 libre dissous.



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

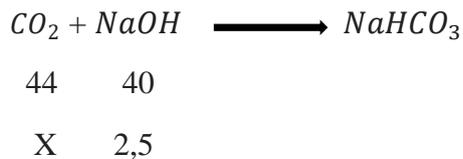
La quantité de CO₂ libre calculée précédemment : CO₂ libre = 4,3 mg/l

Donc la quantité de NaOH requise pour tout neutraliser : $\text{NaOH} = 4,3 \text{ mg/l}$

7.2. Le pourcentage de CO_2 libre réagi :

Ce pourcentage indique la proportion de CO_2 libre qui doit réagir avec le NaOH ajouté. En effet, uniquement une partie du CO_2 libre doit être neutralisée pour rester dans la plage du pH exigée et assurer la stabilité de l'eau.

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



La valeur de 2,5 est adéquate est choisie par expérience .

On trouve $X = 2,75 \text{ mg/l}$

Le pourcentage est calculé en divisant la quantité de CO_2 qui réagit avec le dosage de NaOH par la quantité totale de CO_2 libre, puis en multipliant par 100 pour obtenir un pourcentage.

Ce qui nous donne :

$$\text{CO}_2\% = \left(\frac{\text{CO}_2 \text{ libre réagit}}{\text{quantité totale de CO}_2 \text{ libre}} \right) \times 100$$

$$\text{CO}_2\% = 64\%$$

7.3. Calcul HCO_3^- produit par l'ajout de Na(OH) :

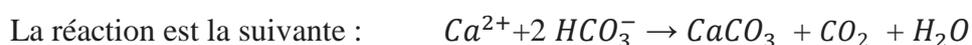
Pour calculer la quantité de HCO_3^- produite par l'ajout de NaOH, nous devons utiliser l'équation chimique de la réaction de neutralisation précédente.

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.

$$\text{HCO}_3^- \text{ produite (mg/l)} = \frac{C_{\text{NaOH}} \times 61}{40} = 4 \text{ mg/l}$$

7.4. 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 .



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^- × masse molaire de $CaCO_3$

Masse de $CaCO_3$ produit = $\frac{HCO_3^- \text{ produit par l'ajout de Na(OH)}}{\text{masse molaire du } HCO_3^-}$ × masse molaire de $CaCO_3$

Masse de $CaCO_3$ produit = $(4/61) \times 100 = 6,55 \text{ mg/l}$

7.5. 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 64% du CO_2 libre initial, il reste 36% mg/L de CO_2 non réagi dans l'eau ce qui équivaut 1,55 mg/l.

7.5.1. Calcul du TDS final :

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

TDS finale = TDS après lit calcite + $[HCO_3^-]$ produit + $[Na^+]$ produit.

Pour 2 valeurs de température, on obtient 2 valeurs de TDS :

$TDS_{14^\circ} = 241 \text{ mg/l}$

$TDS_{30^\circ} = 396 \text{ mg/l}$

7.5.2. Calcul de l'alcalinité finale :

Elle correspond à l'alcalinité après passage par le lit de calcite, additionnée du $CaCO_3$ produit par l'ajout de NaOH. Ce qui nous donne une valeur de 86,25

Tableau V.6 Les Paramètres de l'eau Après Traitement et Ajustement du pH

Paramètres	Unités	valeur
CO_2 libre	mg/l	4,3
Na(OH) nécessaire pour tout CO_2 libre	mg/l	3,9
Dosage de Na(OH)	mg/l	2,5
% de CO_2 libre réagi	%	64%
HCO_3^- produit par l'ajout de Na(OH)	mg/l	4

HCO ₃ ⁻ finale	mg/l	99,16
CaCO ₃ produit	mg/l	6,55
Na ⁺ produit	mg/l	1,50
Na ⁺ finale	Mg/l	38,3
CO ₂ libre restant	mg/l	1,55
TDS finale	mg/l	à 14° : 241 à 30° : 396
pH		8,15
Dureté totale	Ppm de CaCO ₃	80
alcalinité	Ppm de CaCO ₃	86,25
pHs		à 14° : 8,28 à 30° : 8

Avec les résultats obtenus à partir du tableau ci-dessus :

L'indice de Langelier a :

- 14° LSI = Ph - Ph_s = - 0,12
- 30° LSI = Ph - Ph_s = 0,15

Ces résultats suggèrent que la reminéralisation de l'eau a été réalisée de manière à obtenir une eau relativement stable, mais avec de légères tendances à évoluer vers des états légèrement corrosifs ou entartrant en fonction de la température. La variation de l'IL en fonction de la température est classique. En effet, la solubilité du CO₂ diminue avec l'augmentation de la température, ce qui peut favoriser la précipitation de carbonates et donc l'entartrage.

Les valeurs d'IL obtenues sont encourageantes et témoignent d'une bonne maîtrise du processus de reminéralisation, ce qui n'empêche pas une surveillance régulière de la qualité de l'eau pour garantir la pérennité des installations.

Remarque : pour ajuster le LSI en cas de déséquilibre, il faut soit :

- Injecter du CO₂ afin d'augmenter le PH et l'indice de Langelier .
- Ajout de la chaux afin de diminuer l'indice de Langelier .

V.8 Estimations de coût de la calcite :

Un prix estimatif sera attribué à la calcite par tonne, car en vue de la nature du projet qui est en cours de réalisation, plusieurs facteurs influencent considérablement le prix de ce type de produit notamment :

- **Fluctuations du marché :** Le prix des matières premières, comme la calcite, est soumis à des variations constantes en fonction de l'offre et de la demande, des coûts de production, des politiques gouvernementales et des événements géopolitiques.
- **Qualité spécifique :** La pureté de 95% et le diamètre de 2 mm sont des spécifications techniques précises. Même de petites variations dans ces paramètres peuvent entraîner des différences de prix significatives.
- **Quantité achetée :** Les prix sont généralement négociés en fonction des volumes achetés. Les gros acheteurs tel que des entreprises de dessalement peuvent bénéficier de réductions.
- **Fournisseur :** Chaque fournisseur a sa propre structure de coûts et sa propre marge bénéficiaire. Les prix peuvent varier d'un fournisseur à l'autre.
- **Frais supplémentaires :** Outre le prix de la calcite elle-même, il faut prendre en compte les frais de transport, les taxes, les éventuels frais de douane et les marges des distributeurs.

Consommation de la calcite par heure 1157,9 kg = 1,15 Tonnes

Consommation de la calcite par jours 1,15 × 24 = 27,78 Tonnes

Prix de la calcite consommée par mois = prix unitaire par Tonne × quantité consommée

Prix unitaire de la calcite = 5 800 DA/Tonne (prix d'achats selon le fournisseur de la station d'El Marsa : Aout 2024)

$$Prix_{journalier} = 5\,800 \times 27,78$$

$$Prix_{journalier} = 161\,124 \text{ DA}$$

V.9 Dimensionnement du réservoir de stockage et de la station de pompage :

Afin de déterminer le volume nécessaire à attribuer au réservoir de stockage, il faut d'abord fixer le temps de rétention de ce dernier, c'est le temps nécessaire durant lequel l'eau doit être stockée dans le réservoir avant d'être pompée en aval dans le réseau de distribution. Ce temps peut varier d'une station à une autre, dans notre cas l'eau est destinée à être distribuée dans les plus brefs délais donc on fixera un temps de rétention de 1,2 heures ce qui nous permettra de stocker le volume suivant :

$$V = \frac{300\,000}{24} \times 1,2 = 15\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Donc cette station aura un réservoir de 15 000 m³/h de volume qui offrira une autonomie de 1h et 12min .

Le réservoir de stockage est compartimenté en plusieurs sections : 2 compartiments dans notre cas, pour assurer une gestion optimale de la qualité de l'eau, limiter les risques de contamination, et optimiser la distribution en fonction des besoins. Cette compartimentation facilite également la maintenance, permettant d'intervenir sur un compartiment sans affecter l'ensemble du système, et améliore la surveillance des niveaux d'eau. En somme, elle contribue à une gestion sécurisée et efficace de l'eau stockée.

Les dimensions de hauteur et de largeur du bassin de stockage dépendent du plan de masse, en vue des contraintes d'espace dans le terrain, on fixera une surface ne dépassant pas les $3000m^3$ soit une longueur et une largeur de respectivement : $L= 60m$; $l=50m$

Ce qui va nous laisser une hauteur adéquate de $h=5m$, on doit aussi rajouter environ 1m de hauteur de sécurité au réservoir.

Afin de s'assurer que la hauteur du réservoir vérifie la condition d'aspiration minimale des pompes, on doit dimensionner la station de pompage.

9.1. Dimensionnement de la station de pompage :

Le choix d'une pompe se fait à partir d'un catalogue des pompes centrifuges (annexe) en utilisant deux paramètres hydraulique à savoir le débit de refoulement Q et la hauteur Manométrique totale HMT.

Le débit de refoulement c'est la moitié du débit produit à savoir $150\ 000m^3/h$ car on a deux compartiments identiques .

Avant de faire le choix des pompes il faut :

9.1.1. Calcul la hauteur manométrique totale Hmt :

Elle correspond à la pression que devra fournir la pompe au fluide entre le point d'aspiration Et de refoulement augmentée des pertes de charges.

Autrement dit elle représente l'énergie totale que la pompe doit communiquer au fluide pour Le déplacer d'un point bas vers un point haut. Elle est exprimée en mètres de colonnes d'eau.

$$HMT = H_g + \Delta H_a + \Delta H_r$$

$$HMT = H_g + \Delta H_t$$

$$\Delta H_t = \Delta H_a + \Delta H_r$$

Où :

HMT : la hauteur manométrique totale en m.C.E.

H_g : la hauteur géométrique en m.C.E.

ΔH_a : la perte de charge d'aspiration m.C.E.

ΔH_r : la perte de charge de refoulement m.C.E.

ΔH_t : la perte de charge totale du circuit en m.C.E.

La hauteur géométrique

La hauteur géométrique H_g représente la distance sur la verticale

Entre le niveau du liquide du point d'aspiration et le niveau maximum de l'eau dans le réservoir, en se basant sur le plan de masse la hauteur géométrique est égale à $H_g = 20\text{m}$

Les pertes de charge :

La notion de pertes de charge est relative aux pertes d'énergie pendant l'écoulement de l'eau

Dans les conduites et les accessoires des installations hydrauliques. Il y'a les pertes linéaires

Relatives à la longueur des conduites et singulières, par frottement dans les différentes

Singularités et accessoires tels que les coudes, les vannes, les convergents, les clapets etc....

Les pertes de charge linéaires de refoulement :

Elles se produisent tout le long d'une canalisation, ils ne dépendent que du linéaire des

Canalisations. Ces pertes sont calculées par la relation de Darcy- Weisbach donnée ci-dessous :

$$\Delta H_l = \frac{\lambda * L * V^2}{D * 2 * g}$$

Où :

ΔH_l : la perte de charge linéaire en m.C.E

λ : le coefficient de perte de charge ou facteur de résistance qui dépend du nombre de

Reynolds et de la rugosité relative (ϵ/D)

L : la longueur de la conduite en m.

D : le diamètre de la canalisation en m

g : l'accélération de la pesanteur en m/s^2

V : la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite en m/s

Les pertes de charge singulières de refoulement :

Ce sont des pertes d'énergie qui se produisent dans les singularités tels que : les tés, les coudes, les vannes, divergent, ect....., elles sont estimées à 15% des pertes de charge linéaire ce qui fait :

$$\Delta H_{totale} = 1,5 \Delta H_{lineaire}$$

Détermination de coefficient de perte de charge linéaire λ :

Pour déterminer le coefficient de résistance hydraulique λ en utilise l'équation suivante

$$\lambda = \left[-2 \log \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]$$

Avec :

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ (conduite en PEHD)}$$

Détermination du régime d'écoulement

Le régime d'écoulement est déterminé par la relation de Reynolds :

$$Re = \frac{V * D}{\vartheta}$$

Avec :

V : vitesse de l'écoulement

D : diamètre de la conduite

ϑ : viscosité cinématique = $10^{-6} m^2/s$ à $20^\circ C$

Pour calculer le diamètre économique on utilise la formule de Brest et Bonin :

Sachant que :

$$Q = 150\,000 \text{ m}^3/h = 1,74 \text{ m}^3/s$$

Donc :

$$D_{min} = \sqrt{Q} = 1,97 \text{ m}$$

$$D_{max} = 1,5 \sqrt{Q} = 1,05 \text{ m}$$

Donc le diamètre de la conduite de refoulement sera comprise entre $1,97 \text{ m}$ et $1,05 \text{ m}$ sachant que le diamètre doit aussi vérifier la condition de vitesse de refoulement comprise entre :

$$V_{ref} [2 - 3] \text{ m/s}$$

En choisissant un diamètre normalisé de 1000 mm avec une épaisseur de : $e = 38,2 \text{ mm}$ on aura le diamètre intérieur égal à :

$$D_{int} = 1000 - 2 * 38,2 = 923,6 \text{ mm}$$

On calcule la vitesse à partir de cette valeur :

$$V = \frac{Q(m^3/s)}{S(m^2)}$$

$$V = 2,59 \text{ m/s}$$

Cette vitesse est adéquate car elle appartient à l'intervalle de vitesses de refoulement.

On a maintenant le diamètre, on calcule le nombre de Reynolds pour obtenir une valeur de :

$$Re = 2\,392\,124$$

On calculera par la suite la valeur du coefficient de perte de charge λ , en ayant une longueur de conduite de $L = 200 \text{ m}$:

$$\lambda = 0,014$$

Ce qui nous permet de calculer la perte de charge linéaire :

$$\Delta H_{\text{linéaire}} = 10,37 \text{ mce}$$

On aura donc la valeur des pertes de charge totales

$$\Delta H_{\text{totale}} = 1,5 \Delta H_{\text{linéaire}} = 11,92$$

Alors :

$$\text{HMT} = H_g + \Delta H_t$$

$$\text{HMT} = 20 + 11,92$$

$$\text{HMT} = 31,92 \text{ m.c.e}$$

9.2. Le choix de la pompe

Le choix d'une pompe se fait à partir d'un catalogue des pompes centrifuges (annexe 2) en

Utilisant deux paramètres hydraulique à savoir le débit de refoulement Q et la hauteur

Manométrique totale HMT.

D'après le catalogue des pompes centrifuge, la pompe choisie pour notre circuit de pompage a les caractéristiques suivantes :

- Pompe centrifuge multicellulaire model : A42-200 SO .
- Le débit de refoulement Q égal à 1042 m³/h.
- La hauteur manométrique totale Hmt égale à 31 m.C.E
- Le NPSH requis égal à 4m.C.E

La pompe choisie peut refouler un débit qui peut atteindre les 1042 m³/h et elle a un point de meilleur fonctionnement dans un débit optimal de 964.2 m³/h , donc pour refouler un débit égal a 150 000 m³/h soit 6250 m³/s avec une HMT de 31metres on aura besoin de :

6 pompes +1 en réserve

Car : 6*1042=6252 m³/s ce qui va parfaitement avec la valeur requise .

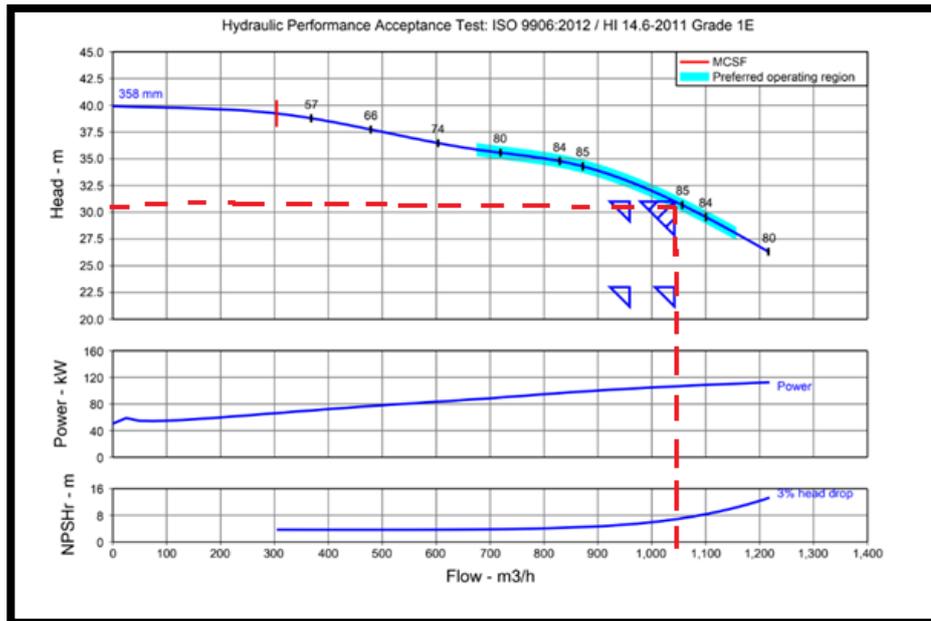


figure V .3. Graphique qui montre plage de bon fonctionnement de la pompe choisie .

Source :site de pompes KSB

Le point de fonctionnement de la pompe est obtenu par l'intersection de la courbe Caractéristique de refoulement de la pompe (HQ) avec la caractéristique de la courbe (C) en bleu. On a pas pris en considération les pertes de charges à l'aspiration du fait qu'elles sont faibles, donc on les a négligées.

Ce point nous permet de connaître les conditions optimales de fonctionnement de notre pompe, surtout du point rentabilité. Autrement il nous permet de savoir si notre pompe travaille dans une plage de rendement acceptable ou non.

Cette détermination s'effectue facilement en traçant sur le même graphique la courbe caractéristique de la conduite, notée (C) et la courbe (HQ) caractéristique de la pompe. on remarque que les paramètres choisis concordent avec la plage de bon fonctionnement de la pompe , De plus , si on fait une projection sur le graphe du NPSHrequis on obtient une valeur de hauteur minimale d'aspiration de 4m ce qui va parfaitement avec la hauteur choisie qui est de 5metres .

Pour rappel, le NPSH requis désigne le NPSH minimal disponible que doit avoir la pompe industrielle sous peine de cavitation. C'est la hauteur minimale de l'eau (supposé à sa température d'ébullition), nécessaire au-dessus de l'aspiration pour empêcher la cavitation, pour une meilleure protection des pompes.

V.10 Calcul de la dose de chlorure de sodium nécessaire à la désinfection :

Pour désinfecter l'eau dans un bassin de stockage à l'aide de chlorure de sodium dosé à 5 %, plusieurs étapes de calcul sont nécessaires. La quantité de chlorure de sodium dépend de la concentration finale souhaitée en désinfectant dans l'eau.

Déterminer la concentration de désinfection souhaitée :

Pour la désinfection de l'eau, des concentrations typiques de chlore actif (sous forme de chlore ou hypochlorite de sodium) dans les stations de traitement varient généralement de 0,2 à 5 mg/L selon la qualité de l'eau et le besoin la concentration la plus courantes est de 0,5 mg/L.

Calculer la quantité de solution de chlorure de sodium nécessaire :

Supposons qu'une concentration de désinfection de 0,5 mg/L de chlore est nécessaire. Le volume du bassin est de 15 000 m³, ce qui équivaut à 15 000 000 L. Si vous voulez obtenir

0,5 mg/L de chlore actif dans le bassin, vous devez ajouter :

$$m_{cl} = C * V$$

C : Concentration du désinfectant en mg/L

V : Volume de l'eau à désinfecter en L

$$m_{cl} = 7,5 \times 10^6 \text{ mg}$$

$$m_{cl} = 7,5 \text{ Kg}$$

Il faut Adapter cette quantité à une solution de chlorure de sodium à 5 % : Si la solution de chlorure de sodium est à 5 %, cela signifie qu'elle contient 5 % de chlore actif en masse (5 g de chlore actif par 100 g de solution). Donc, pour obtenir 7,5 kg de chlore actif, il Nous faudra :

$$m_{NaCl} = \frac{m_{cl} \times 100}{5}$$

$$m_{NaCl} = 150 \text{ kg}$$

Cela signifie qu'il vous faudra 150 kg de solution de chlorure de sodium à 5 % pour désinfecter le bassin de 15 000 m³ à une concentration de 0,5 mg/L de chlore actif.

Conclusion :

Cette étude nous a mené à l'obtention des résultats suivants :

- Le nombre des réservoirs de reminéralisation est de 24 PCS.
- Consommation maximale de CO₂ est de 537.778kg/h.
- 02 réservoirs de stockage CO₂ sont prévus, avec un volume de 40m³
- La consommation maximale de la calcite est de 1157.9 kg/h
- La valeur du pH de l'eau produite est de 8,1 ;
- Le débit de la pompe de lavage à contre-courant est de 2138 m³/h
- Le débit du souffleur de lavage à contre-courant est de 45 m³/min
- La période de lavage à contrecourant des réservoirs de remineralisation est de chaque 34j.
- Récupération du réservoir de reminéralisation est de 99.87%
- Le LSI d'eau produite est de -0,12/0,15 et le pH finale est contrôlé à 8,15 et appartient à la plage 8~8.2.
- Frais journaliers de la calcite =161 124DA
- On a un réservoir de stockage de dimensions 60×50×5m³ contenant 2 compartiments
- On a choisi 2 stations de pompages avec chacune un nombre de pompes de 6+1 pompes qui pompes 1042 m³/h chacune.
- Il nous faut 150 kg de solution de chlorure de sodium à 5 % pour désinfecter le bassin de 15 000 m³ à une concentration de 0,5 mg/L de chlore actif

Conclusion générale :

Dans le cadre du dimensionnement de la chaîne de post-traitement de la station de dessalement de Cap Blanc à Oran d'une capacité de production de 300 000m³/j, objet de notre étude, s'inscrit une démarche globale d'optimisation de la production d'eau potable avec une qualité optimale destinée à la consommation humaine. Ce travail a permis de mettre en évidence les enjeux majeurs liés à ce type de projet qui est la reminéralisation de l'eau du permeal avant sa distribution aux consommateurs, notamment la nécessité de concilier les exigences de qualité de l'eau potable avec les contraintes économiques et environnementales. Les résultats obtenus à l'issue de cette étude montrent que le dimensionnement d'une telle chaîne est un processus qui requiert une approche multidisciplinaire. Les principaux enseignements tirés de cette étude peuvent être résumés comme suit :

L'importance de la caractérisation de l'eau dessalée : Une connaissance précise de la composition de l'eau dessalée est indispensable pour dimensionner les unités de traitement, notamment le Ph, conductivité, oxygène dissout, salinité, température et turbidité, ces paramètres sont indispensables pour passer à l'étape suivante.

Le Choix des procédés : Le choix des procédés de traitement doit être adapté aux caractéristiques de l'eau cités précédemment et aux objectifs de qualité, dans notre étude, le choix du procédé de traitement par lit de calcite a été effectué en vue de sa disponibilité et son cout relativement bas, ainsi que son efficacité, la calcite adéquate choisie a un diamètre de 2mm et une pureté de 95%, et avec les calculs effectués on a trouvé une hauteur du lit de 3,5m.

Le Dimensionnement des équipements : Le dimensionnement des équipements doit être optimisé pour garantir un fonctionnement efficace et économique de la chaîne de traitement, dans notre projet, on a dimensionné les réservoirs de calcite et on a trouvé qu'un nombre optimal de 24 réservoirs d'une superficie de 45m² chacun, respectait les contraintes d'espace avec une section de 9m de longueur et 5m de largeur .On a notamment calculé la consommation de la calcite qui nous mène à trouver un volume de stockage adéquat de 555,9m³et sans oublier un volume de stockage de dioxyde de carbone de 44m³ .

Surveillance et contrôle : La mise en place d'un système de surveillance et de contrôle est essentielle pour assurer la qualité de l'eau produite à long terme, ainsi, le lavage à contrecourant qui assure le nettoyage du lit doit être effectué chaque 30j afin d'éviter le colmatage et la dégradation du lit .Enfin, nos calculs ont révélé que l'eau après passage par l'ouvrage de lit de calcite avait un PH de 7,7 donc il a été ajusté par ajout de NaOH ce qui l'a fait augmenter jusqu'à 8,15, de ce fait on a obtenu un indice de Langelier qui varie entre -0,12 et 0,15 ,ces deux paramètres indispensables à vérifier pour garantir une qualité optimale de l'eau étaient dans les normes ce qui prouve de l'efficacité du dimensionnement proposé avec dosage de 100% du permeal.

En conclusion, cette étude a permis de définir les bases d'un dimensionnement optimal de la chaîne de post-traitement de la station de dessalement de Cap Blanc à Oran. Les résultats obtenus constituent une référence précieuse pour la réalisation de ce projet et pourront être

adaptés à d'autres projets similaires avec des perspectives de recherche futures qui pourraient porter sur l'optimisation énergétique des procédés de traitement, l'évaluation de l'impact environnemental des rejets, ou encore le développement de nouveaux matériaux et procédés pour améliorer la qualité de l'eau produite , à titre d'exemple l'ajout de magnésium dans l'eau reminéralisé en Algérie , cette pratique n'est pas courante mais recommandée en vue des bienfaits de ce dernier sur l'organisme , car en effet une remineralisation avec de la calcite uniquement va enrichir l'eau en calcium et bicarbonates seulement , ce qui ne remplit pas l'apport essentiel en magnesium du corps humain.

Bibliographie :

- [1] « 2,4-D Technical Fact Sheet ».
- [2] « 10 fabricants de systèmes d'osmose inverse en 2024 | Metoree ».
- [3] « Brèves Marines N°235 - Les usines de dessalement, nouveaux enjeux géopolitiques | Ministère des Armées ».
- [4] « Deep Dive into Oceanography ».
- [5] « Desalination Engineering - Planning and Design (PDFDrive) - Google Docs ».
- [6] N. Voutchkov, Desalination engineering. Planning and design. New York: McGraw-Hill, 2013.
- [7] K. Ahmed, B. Mohamed, et U. S. Dahleb, « DESSALEMENT D'EAU DE MER : OPTION INCONTOURNABLE ».
- [8] « Dessalement de l'eau de mer », Techniques de l'Ingénieur.
- [9] « Directive - 98/83 - EN - EUR-Lex ».
- [10] admin, « Dissoudre le calcaire dans les canalisations : astuces pratiques », EBI Envirotech.
- [11] « Drinking-water quality guidelines ».
- [12] « E. coli can thrive in the environment. Why should water managers care? », Global Water Forum.
- [13] G. E. Dévora-Isiordia et al., « Evaluation of Concentration Polarization Due to the Effect of Feed Water Temperature Change on Reverse Osmosis Membranes », Membranes, vol. 13, n° 1, Art. n° 1, janv. 2023, doi: 10.3390/membranes13010003.
- [14] « Principle of operation of the pressure exchanger as energy... », ResearchGate.
- [15] « Historique du dessalement, situation actuelle et perspectives de développement - RO AGUA Water Treatment Solutions ».
- [16] « Infographie: L'Arabie saoudite investit massivement dans le dessalement de l'eau », Statista Daily Data.
- [17] « La dessalinisation, une solution ? | Alternatives Economiques ».
- [18] « La nappe de l'Albien, le trésor caché de l'Algérie et son atout stratégique pour l'avenir | Algérie Part ».
- [19] « La station de dessalement de Cap Blanc à Oran : un projet stratégique pour sécuriser l'alimentation en eau dans la région ».
- [20] admin-lk, « Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres », Encyclopédie de l'énergie. [21] « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres | CultureSciences-Chimie ».
- [22] « Membrane osmose 2540 ».
- [23] « Memoire Magister Moudjeb - Copie | Télécharger gratuitement PDF | Osmose | Eau », Scribd.
- [24] « MFE CORRIGEE.docx », Google Docs.
- [25] C. S. Neary, « NEUTRALISATION ET REMINERALISATION DE L'EAU POTABLE AVANT DISTRIBUTION », 2007.

- [26] S. Abdelaziz, « Notre «mer souterraine» en danger », Le blog de algerie-infos.
- [27] « Océans connectés | 3.7°C, c'est la Température moyenne de l'océan | Océans Connectés ».
- [28] « Oran: station de dessalement d'eau de mer de Cap Blanc : avancement appréciable - Actualité : EL Moudjahid ».
- [29] « OSMOSE INVERSE », wtinternational.
- [30] « Quelle est la composition chimique de l'eau de mer ? »
- [31] « Récupération d'Energie d'Eau de Mer Par Osmose Inverse », PA-FR-Live.
- [32] « Reminéralisation au CO2 - traitement des eaux usées | Air Liquide France Industrie - Fournisseur de gaz industriels ».
- [33] « SGG Algérie ». [37] H. Kahina, « Sous la direction de M. A. MAZIGHI ».
- [34] « Stress hydrique | Actualités Eau pour Tous », <https://eaupourtous.utilities.management/>.

