



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option: Réutilisation des eaux non conventionnelles

THEME :

**ETUDE DE LA POSSIBILITE D'AMELIORATION DES
PERFORMANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE
BOUSMAIL WILAYA DE TIPAZA**

Présenté par :

BOUMESSAOUD ROMAISSA

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Mr DJELLAB Mohamed	Professeur	Président
Mme BETATACHE Hayet	M.C.B	Examineur
Mme MEDJDOUB LEULMI Sonia	M.A.B	Examineur
Mr TOUIL Youcef	M.C.B	Promoteur
Mr BELMILOUD M'hammed	Dr ANDE	Invité

Session Octobre 2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus sincère à Dieu Tout-Puissant, source de force, de patience et de sérénité, qui m'a permis d'accomplir ce travail et de franchir cette étape importante de mon parcours.

Ce mémoire est bien plus qu'un aboutissement académique ; il est le fruit d'un cheminement où l'accompagnement, les conseils et le soutien de plusieurs personnes ont joué un rôle essentiel.

*J'adresse mes remerciements les plus respectueux à **Mr. TOUIL Youcef**, mon encadrant, pour la qualité de son suivi, la pertinence de ses orientations et la confiance qu'il m'a accordée. Son engagement et sa disponibilité ont été d'une grande valeur dans la réalisation de ce travail.*

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, véritables piliers de mon existence. Leur soutien indéfectible, leurs sacrifices silencieux et leur amour constant ont été la plus grande source d'inspiration et de motivation tout au long de mon cheminement académique.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique, dont le savoir, le professionnalisme et le dévouement ont contribué à forger en moi l'esprit d'ingénieur et l'amour du métier.

*Mes remerciements vont aussi à **Mr. DJOUABI Brahim**, ingénieur en génie des procédés et chef de projet à la station de dessalement de Bou Ismail, pour son aide précieuse, sa générosité et la clarté de ses conseils techniques.*

Je suis honorée enfin, par l'attention que portent les membres du jury à mon travail, et leur exprime ma profonde gratitude pour l'intérêt et le temps qu'ils consacreront à son évaluation.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur soutien, leurs encouragements ou simplement leur présence bienveillante, je dis merci, du fond du cœur.

Dédicaces

À chacun son étoile, à chacun son éclat...

Ce travail est l'écrin où brillent les lumières de celles et ceux qui ont marqué ma vie et contribué, de près ou de loin, à faire de moi ce que je suis aujourd'hui.

À l'héroïne de ma vie, celle qui m'a donné la vie et m'a élevée avec tant d'amour, ma mère. Merci pour ton soutien inconditionnel, ta patience infinie et ta foi sans faille en moi. Tu es et resteras mon guide et mon inspiration.

À l'exemple de ma vie, mon père, dont les sacrifices et les souffrances n'ont toujours eu qu'un seul but : mon bonheur. Ta force et ton courage sont ma plus grande fierté. Merci de m'avoir transmis tes valeurs, ton sens du devoir et ta persévérance, qui resteront à jamais mon héritage.

À ma sœur Noudjoud et à mes frères Yassine et Raïf, vous êtes ma joie, ma raison de sourire et mon plus grand trésor. Je vous aime plus que tout.

À mes oncles Ali et Mohammed, pour leur amour immense et leur soutien constant. Vous êtes mes repères et les ailes de mon inspiration. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes tantes Fatiha et Fatima, pour leur présence réconfortante, qui a éclairé mes pas même dans les moments sombres. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir accompagnée avec tant de tendresse et de générosité.

À Kawthar, ma sœur de cœur, pour ton amour et ton soutien indéfectible. Merci d'avoir été ma confidente et ma thérapeute dans les instants les plus difficiles. Malgré la distance, tu as été ma lumière dans les ténèbres et un pilier dans mes épreuves. Je t'en serai éternellement reconnaissante.

À mes chères amies Karima, Anfel et Chaïma. Merci pour les moments précieux, les rires et les souvenirs inoubliables que nous avons partagés. Vous avez rendu cette aventure plus belle et plus légère.

À ma cousine Hadjer, ma complice adorée : je t'aime profondément.

Et enfin, à moi-même, pour avoir tenu bon malgré les tempêtes et pour avoir trouvé la force de continuer. Parce qu'il est juste aussi de se reconnaître.

Romaissa

ملخص :

يُعدّ تحلية مياه البحر بتقنية التناضح العكسي حلاً أساسياً لمواجهة العجز في الموارد المائية الصالحة للشرب في الجزائر. وتسهم محطة بوسماعيل بولاية تيبازة في هذا المجهود الوطني، غير أنّها تواجه بعض التحديات المرتبطة باستقرار الإنتاج والقيود الطاقوية. يهدف هذا العمل إلى تحليل أداء المحطة ودراسة إمكانية تحسين مردودها، حيث أظهرت النتائج أنّ نوعية المياه المنتجة تبقى مطابقة للمعايير الجزائرية. كما بيّن تحليل الأداء الهيدروليكي وجود هامش للتحسين مرتبطة بالظروف التشغيلية. وأخيراً، أوضحت المحاكاة وفق سيناريوهات مختلفة أنّ زيادة معدل الاسترجاع تسمح برفع حجم الإنتاج، شريطة أن يكون هذا المعدل متوافقاً مع درجة الحرارة، بما يضمن تحسين أداء المحطة مع المحافظة على سلامة التجهيزات.

الكلمات المفتاحية : تحلية مياه البحر، التناضح العكسي، محطة بوسماعيل، نوعية المياه، الاداء، التحسين

Résumé :

Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse constitue aujourd'hui une solution incontournable pour répondre au déficit en ressources en eau potable en Algérie. La station de Bousmaïl de la wilaya de Tipaza contribue à cet effort national, mais demeure confrontée à certaines limites liées à la stabilité de sa production et aux contraintes énergétiques. L'objectif de ce travail a été d'analyser le fonctionnement de la station et d'examiner les possibilités d'amélioration de ses performances. Les résultats de l'étude montrent que la qualité de l'eau produite reste conforme aux normes algériennes. Par ailleurs, l'analyse du fonctionnement hydraulique met en évidence des marges d'optimisation associées aux conditions opératoires. Enfin, les simulations réalisées selon différents scénarios indiquent que l'augmentation du taux de conversion permet d'accroître la production, à condition que celui-ci soit adapté à la température, de manière à optimiser les performances de la station tout en préservant l'intégrité des équipements.

Mots-clés : Dessalement, Osmose inverse, Station de Bousmaïl, Qualité de l'eau, Performances, Optimisation.

Abstract :

Seawater desalination through reverse osmosis has become an essential solution to address the shortage of drinking water resources in Algeria. The Bousmaïl desalination plant in the Tipaza province contributes to this national effort, but it still faces certain challenges related to production stability and energy constraints. The purpose of this work was to analyze the operation of the plant and to explore possible improvements in its performance. The results show that the quality of the produced water remains in compliance with Algerian standards. Moreover, the hydraulic performance analysis highlights optimization opportunities associated with operational conditions. Finally, simulations carried out under different scenarios indicate that increasing the recovery rate enhances production, provided that it remains consistent with temperature variations, thus ensuring both optimal performance and the protection of equipment.

Keywords: Seawater desalination, Reverse osmosis, Bousmaïl plant, Water quality, Performance, Optimization.

TABLE DE MATIERE :

INTRODUCTION GENERALE :	1
CHAPITRE 1 : LES RESSOURCES EN EAU ET LE DEVELOPPEMENT DU DESSALEMENT EN ALGERIE	2
I.1. INTRODUCTION :	2
I.2. LA SITUATION HYDRIQUE A L'ECHELLE MONDIALE :	2
I.3. LES RESSOURCES EN EAU EN ALGERIE :	3
I.3.1. Une pression hydrique multifacteurs :	3
I.3.2. Disponibilité en eau renouvelable :	3
I.3.3. Répartition géographique et sectorielle :	4
I.4. LE DEVELOPPEMENT DU DESSALEMENT EN ALGERIE :	4
I.4.1. Historique du dessalement en Algérie :	4
I.4.2. Politique nationale et plan de développement :	4
I.4.3. Les stations de dessalement en service (2025) :	5
I.4.4 Contribution du dessalement au système d'AEP :	5
I.4.5 Limites et défis du dessalement en Algérie :	6
I.5. CONCLUSION :	6
CHAPITRE II : PROCEDE D'OSMOSE INVERSE DANS LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER	7
II.1. INTRODUCTION :	7
II.2. PRINCIPE DE L'OSMOSE ET DE L'OSMOSE INVERSE :	7
II.3. PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UNE UNITE D'OSMOSE INVERSE :	8
II.3.1. PRESSION OSMOTIQUE : [10]	8
II.3.2. Taux de conversion (Recovery rate) :	9
II.3.3. Taux de rétention (ou taux de rejet) :	9
II.3.4. Pression transmembranaire (PTM) :	10
II.3.5. Flux transmembranaire (ou flux de perméat) :	10
II.4. LES MEMBRANES D'OSMOSE INVERSE :	11
II.4.1. Les types des membranes d'osmose inverse : [10]	12
II.4.2. LES MODULES D'OSMOSE INVERSE : [16]	12
II.4.2.1. Module plan (ou à plaques) :	12
II.4.2.2. Module tubulaire :	13
II.4.2.3. Module spiralé (ou spiral-wound) :	14
II.4.2.4. Module à fibres creuses :	14
II.4.3. Les problématiques de fonctionnement des membranes :	15
II.4.4. Nettoyage des membranes :	16
II.4.4.1. Principe du nettoyage :	16
II.4.4.2. Fréquence de nettoyage :	17
II.5. POMPAGE A HAUTE PRESSION :	17
II.5.1. Caractéristiques techniques des pompes haute pression :	17

II.5.2. Types de pompes utilisées :	18
II.5.3. Consommation énergétique et optimisation :	18
II.6. TECHNOLOGIES DE RECUPERATION D'ENERGIE :	19
II.6.1. Dispositifs indirects :	19
II.6.1.1. Turbopompe :	19
II.6.1.2. Turbine Pelton :	19
II.6.2. Dispositifs directs :	20
II.6.2.1. ERI (Energy Recovery Inc. – Pressure Exchanger, PX) :	20
II.6.2.2. DWEER (Dual Work Exchange Energy Recovery) :	21
II.7. CONCLUSION :	21

CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA REGION ET DE LA STATION.....22

III.1. INTRODUCTION :	22
III.2. PRESENTATION DE LA REGION BOUSMAÏL – WILAYA DE TIPAZA :	22
III.2.1. Situation géographique :	22
III.2.2. Relief et caractéristiques physiques :	22
III.2.3. Climat :	22
III.2.4. Système d'approvisionnement en eau potable de la commune de Bousmail:	23
III.2.5. Estimation de l'évolution des besoins actuels :	23
III.3. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA STATION DE BOU ISMAÏL :	25
III.4. DESCRIPTION DE LA STATION DE BOU ISMAIL :	25
III.4.1. Captage de l'eau de mer :	26
III.4.2. Le prétraitement :	27
III.4.2.1. Décantation lamellaire :	27
III.4.2.2. Pompage de l'eau décantée :	28
III.4.2.3. Filtration multicouche :	29
III.4.2.4. La microfiltration :	30
III.4.2.5. Dosage d'hypochlorite de sodium :	31
III.4.2.6. Correction du pH et ajout de dispersant :	32
III.4.2.7. Neutralisation du chlore par bisulfite de sodium :	33
III.4.3. Pompage haute pression :	33
III.4.4. Osmose inverse (OI) :	34
III.4.4.1. Les membranes d'osmose inverse :	36
III.4.4.2. Récupération d'énergie :	36
III.4.5. Post traitement :	37
III.4.5.1. Reminéralisation :	38
III.4.5.2. Désinfection finale (chloration) :	39
III.4.5.3. Stockage et pompage de l'eau traitée :	39
III.5. CONCLUSION :	40

CHAPITRE IV : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE ET DE LA QUALITE DE L'EAU A LA STATION DE DESSALEMENT DE BOUSMAÏL 41

IV.1. INTRODUCTION :	41
----------------------	----

IV.2. METHODOLOGIE DE SUIVI :	41
IV.2.1. Collecte des données et période de mesure :	41
IV.2.2. Points de prélèvement retenus :	42
IV.2.3. Paramètres étudiés :	42
IV.2.3.1. Paramètres physico-chimiques :	42
IV.2.3.2. Paramètres hydrauliques :	42
IV.2.4. Traitement des données :	43
IV.3. PRESENTATION STATISTIQUE DES DONNEES MESUREES :	43
IV.3.1. Paramètres physico-chimiques :	43
IV.3.1.1. pH :	43
IV.3.1.2. Turbidité :	44
IV.3.1.3. Conductivité :	46
IV.3.1.4. Température :	48
IV.3.1.5. Chlore libre dans l'eau traitée après désinfection :	49
IV.3.2. Paramètres hydrauliques :	49
IV.3.2.1. Pression de fonctionnement :	49
IV.3.2.2. Le débit :	50
IV.3.2.2.1. Analyse de la production de la station de Bousmail :	50
IV.3.2.2.2. Causes de la perturbation de la production :	51
IV.3.2.2.3. Les effets des micro-coupures électriques :	52
IV.4. SOLUTIONS GENERALES POUR AMELIORER LA PERFORMANCE ET LA CONTINUITE DE PRODUCTION :	52
IV.5. CONCLUSION :	53

CHAPITRE V : OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DE LA STATION DE BOUSMAIL 54

V.1. INTRODUCTION :	54
V.2. DONNEES DE BASE DE LA STATION DE BOU ISMAÏL :	54
V.2.1. Conditions environnementales :	54
V.2.2. Qualité de l'eau d'alimentation :	55
V.2.3. Exigences de la qualité du perméat :	55
V.2.4. Configuration du système d'osmose inverse :	56
V.2.5. Système de pompage et récupération d'énergie :	57
V.3. PRESENTATION DU LOGICIEL IMS-DESIGN :	57
V.3.1. Le logiciel IMS-Design :	57
V.3.4 Les principaux onglets du logiciel IMSDesign :	59
V.4. UTILISATION DE LA SIMULATION DU LOGICIEL POUR LE DIMENSIONNEMENT ET LE CONTROLE DU FONCTIONNEMENT :	60
V.4.1. Première interface :	60
V.4.2. La membrane utilisée dans IMSDesign :	61
V.4.3. Deuxième interface :	61
V.4.4. Les résultats de calcul de simulation:	62
VI.4.5. Post traitement :	64

V.4.6. Pompage haute pression :	67
V.4.7. Échangeur de Pression PX (ERD) :	68
V.5. SIMULATION DE L'UNITÉ D'OSMOSE INVERSE A TAUX DE CONVERSION VARIABLE ET TEMPERATURE CROISSANTE :	70
V.5.1. Simulation des performances de l'unité d'osmose inverse en période hivernale (analyses minimales, 14–17 °C) :	71
V.5.2. Simulation des performances de l'unité d'osmose inverse pour la période intermédiaire (analyses moyennes, 18–24 °C) :	72
V.5.3. Simulation des performances de l'unité d'osmose inverse pour la période estivale (analyses maximales, 25–29 °C) :	73
V.6. AMELIORATION DES PERFORMANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT :	75
V.6.1. Estimation de l'amélioration de la production en fonction du taux de conversion : ..	76
V.6.2. Qualité de l'eau produite :	76
V.6.3. Estimation de l'augmentation de la consommation énergétique :	77
V.7 CONCLUSION :	79
CONCLUSION GENERALE :	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	82
ANNEXES :	83

LISTE DES FIGURES :

FIGURE I.1 : pourcentage de personnes sous differentes categories de stress hydrique (wri, 2023).....	3
FIGURE I.2 : Évolution de la capacite installee des stations de dessalement en algerie (tigrine et al., 2018 via researchgate).....	5
FIGURE II.1 : Osmose directe et osmose inverse (polymem, 2024).....	7
FIGURE II.2 : Classification des membranes d'osmose inverse (metaiche.m, 2014).....	11
FIGURE II.3 : Module plan (john wiley & sons, 2004)	13
FIGURE II.4 : Schema de principe d'un module tubulaire (mehdi, m. (2006))	13
FIGURE II.5 : Module spiralé (a revolution in water treatment and desalination,2023)	14
FIGURE II.6 : Module a fibre creuse (nader frikha, 2009).....	15
FIGURE II.7 : Schema des differents mecanismes de colmatage (colloid.ch, 2022).....	16
FIGURE II.8 : Pompes a haute pression (belin.cd, 2024).....	18
FIGURE II.9 : Schema de la recuperation energetique par turbopompe (encyclopedie de l'énergie,2016)	19
FIGURE II.10 : Systeme de recuperation energetique par la turbine pelton (aes arabia, 2018).....	20
FIGURE II.11 : Systeme de recuperation energetique par l'echangeur eri (energy recovery inc., 2023).....	20
FIGURE II.12 : Systeme de recuperation energetique par l'echangeur dweer (stover, r. l, 2005)	21
FIGURE III.1 : Situation geographique de la station de dessalement bou ismail (google earth).....	25
FIGURE III.2 : Pompes d'amorçage au niveau de captage	26
FIGURE III.3 : Decanteur 1 et 2 vue de haut (elabore par l'étudiante)	28
FIGURE III.4 : Vue proche de filtre a sable	29
FIGURE III.5 : Filtres a sable	29
FIGURE III.6 : Filtres a cartouches 5 microns	30
FIGURE III.7 : Coupe d'un filtre a cartouches	30
FIGURE III.8 : L'unité de microfiltration	31
FIGURE III.9 : Cuve de stockage de (naclo)	32
FIGURE III.10 : Pompes doseuses a membrane pneumatique	32
FIGURE III.11 : 4 Pompes doceuses + 1 secours	33
FIGURE III.12 : Systeme de pompage haute pression	34

FIGURE III.13 : Unite de ro	35
FIGURE III.14 : Un rack de ro (membranes spiralees)	35
FIGURE III.15 : Systeme de recuperation d'energie	37
FIGURE III.16 : ER pressure exchanger.....	37
FIGURE IV.17 : Systeme dosage de lait de chaux	38
FIGURE III.18 : Bassin de stockage d'eau traitee et dosage naclo	39
FIGURE III.19 : Bassin de saumure	40
FIGURE V.1 : Interface du logiciel ims-design.....	57
FIGURE V.2 : Fenêtre des différents onglets de logiciel.....	59
FIGURE V.3 : L'Interface de l'étape d'analyse par ims-design.....	60
FIGURE V.4 : La 2eme partie de l'étape d'analyse par ims-design.....	61
FIGURE V.5 : L'interface de l'étape de dimensionnement.....	62
FIGURE V.6 : Les conditions de simulation	63
FIGURE V.7 : Les principaux resultats obtenus a l'issue de la simulation	63
FIGURE V.8 : L'interface des exigences chimiques	64
FIGURE V.9 : L'interface de post traitement	65
FIGURE V.10 : Configuration du systeme d'oi avec la remineralisation et la chloration finale	65
FIGURE V.11 : Resultats de la simulation de pompage.....	68
FIGURE V.12 : Resultats de calcul avec echangeur de pression.....	69
FIGURE V.13 : Resultats de la simulation de pompage avec ERD	69
FIGURE V.14 : Resultats de calcul pour la periode hivernale a 14°C.	71
FIGURE V.15 : Variation de la pression d'alimentation en fonction de la température pour différents taux de conversion (période hivernale).....	71
FIGURE V.16 : Résultats de calcul de la période intermédiaire à 18 °C.....	72
FIGURE V.17 : Variation de la pression d'alimentation en fonction de la temperature pour différents taux de conversion (periode intermediaire)	73
FIGURE V.18 : Resultats de calcul de la periode estivale a 25 °c	74
FIGURE V.19 : Variation de la pression d'alimentation en fonction de la température pour différents taux de conversion (période estivale).....	74

LISTE DES TABLEAUX :

TABLEAU III.1: Besoins en eau des équipements.....	24
TABLEAU III.2 : Besoins en eau industrielles.....	24
TABLEAU IV.1 : Valeurs statistiques du ph de l'eau brute et l'eau decantee.....	43
TABLEAU IV.2 : Évolution mensuelle du ph de l'eau traitée (nov. 2022 – avr. 2023)	44
TABLEAU IV.3 : Évolution mensuelle de la turbidité de l'eau brute.....	45
TABLEAU IV.4 : Évolution mensuelle de la turbidité de l'eau decantee	45
TABLEAU IV.5 : Évolution mensuelle de la conductivité de l'eau brute et de l'eau decantee a 25 °c.....	47
TABLEAU IV.6 : Évolution mensuelle de la conductivité de l'eau traitée a 25 °c.....	47
TABLEAU IV.7 : Variations mensuelles de la température de l'eau brute.....	48
TABLEAU IV.8 : Les concentrations du chlore libre dans l'eau traitée	49
TABLEAU IV.9 : Phenomenes lies aux micro-coupures electriques et leurs consequences ..	52
TABLEAU V.1 : Tableau des conditions environnementales de la station.....	54
TABLEAU V.2 : Tableau de qualité physico-chimique de l'eau d'alimentation.....	55
TABLEAU V.3 : Tableau des exigences de la qualité du permeat.....	56
TABLEAU V.4 : Tableau de configuration du système d'osmose inverse	56
TABLEAU V.5 : Caracteristiques du système de pompage et de recuperation d'énergie	57
TABLEAU V.6 : Les caracteristiques techniques de la membrane swc4 max.....	61
TABLEAU V.7 : Les resultats des parametres de traitement de l'eau par osmose inverse	66
TABLEAU V.8 : Les resultats de la qualité de l'eau a différentes étapes du processus de traitement.....	67
TABLEAU V.9 : Caracteristiques des pompes haute pression de la station de bou ismaïl.....	67
TABLEAU V.10 : Évaluation du gain relatif de production en fonction de la température et du taux de conversion.....	75

Liste des planches :

PLANCHE 01 : Plan de masse

PLANCHE 02 : Plan filtration et osmose inverse ligne 1

PLANCHE 03 : Diagramme de fonctionnement

PLANCHE 04 : Vue détaillée de la conduite de rejet

Introduction générale

Introduction générale :

L'eau douce constitue une ressource essentielle à la vie et au développement socio-économique. Cependant, sa disponibilité connaît une diminution progressive sous l'effet combiné de la croissance démographique, du développement industriel et du changement climatique. Dans ce contexte, les pays situés en zones arides et semi-arides, tels que l'Algérie, se trouvent confrontés à un déséquilibre croissant entre la demande et l'offre en eau potable. Pour faire face à ce défi, le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse s'est imposé comme une solution stratégique, permettant de mobiliser une ressource abondante mais naturellement non exploitable en l'état.

Au cours des deux dernières décennies, l'Algérie a engagé un vaste programme de construction de stations de dessalement de l'eau de mer, réparties le long du littoral, afin de sécuriser l'approvisionnement en eau des grandes agglomérations. Parmi ces infrastructures figure la station de dessalement de Bou Ismaïl, mise en service pour contribuer de manière significative à l'alimentation en eau potable de la région. Malgré son efficacité, cette station est soumise à diverses contraintes d'exploitation, telles que les variations saisonnières de la qualité de l'eau brute, la consommation énergétique liée au procédé, ainsi que les interruptions dues aux coupures électriques, qui peuvent affecter la continuité et la performance de la production.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette problématique et vise à analyser le fonctionnement de la station de Bou Ismaïl, tout en explorant les possibilités d'amélioration de ses performances. Pour ce faire, il a été structuré en plusieurs chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre est consacré aux ressources en eau en Algérie et à l'évolution du dessalement dans le pays.
- Le deuxième chapitre décrit en détail le procédé d'osmose inverse, son principe de fonctionnement et ses différents paramètres importants.
- Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la région et de la station de Bou Ismaïl, depuis le captage de l'eau jusqu'au rejet.
- Le quatrième chapitre analyse le fonctionnement hydraulique de la station ainsi que la qualité de l'eau de mer traitée, sur la base de données collectées sur une période de six mois.
- Enfin, le cinquième chapitre propose une optimisation du fonctionnement de la station, à travers des simulations menées sous IMSDesign, permettant d'évaluer les gains potentiels en termes de production et d'identifier les impacts énergétiques liés à l'augmentation du taux de conversion.

Chapitre I :
Les ressources en eau et le
développement du
dessalement en Algérie

Chapitre 1 : Les ressources en eau et le développement du dessalement en Algérie

I.1.Introduction :

L'eau douce constitue une ressource vitale pour le développement humain, économique et environnemental. Cependant, elle devient de plus en plus rare sous l'effet du changement climatique, de la croissance démographique et de la pression croissante sur les milieux naturels. Cette situation est particulièrement critique dans les zones arides et semi-arides où la disponibilité en eau renouvelable par habitant est faible [1].

L'Algérie, située en grande partie dans une région sèche, subit depuis plusieurs décennies un stress hydrique structurel lié à la répartition irrégulière des précipitations, à la surexploitation des nappes et aux pertes dans les réseaux. Pour y faire face, le pays a engagé une politique de diversification des ressources, notamment par le dessalement de l'eau de mer, devenu un pilier stratégique de la sécurité hydrique nationale.

En 2025, l'Algérie compte 19 stations de dessalement en service, totalisant une capacité installée de plus de 2,6 millions m³/j, indépendamment des conditions climatiques [2].

I.2. La situation hydrique à l'échelle mondiale :

L'eau couvre environ 71 % de la surface de la Terre, mais seulement une très faible fraction est directement accessible et utilisable par l'homme. En effet, environ 97,5 % de l'eau présente sur la planète est salée, et seulement 2,5 % est de l'eau douce. Sur cette part, près de 70 % est emprisonnée sous forme de glace ou de neige permanente, et près de 30 % se trouve dans les nappes souterraines profondes. Moins de 1 % est disponible sous forme d'eaux de surface (lacs, rivières, sols humides), constituant la principale source pour l'usage domestique, agricole et industriel.

La répartition de l'eau douce est extrêmement inégale entre les régions du monde. Certains pays comme le Canada, le Brésil ou la Russie disposent de réserves importantes, tandis que d'autres, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie centrale, sont confrontés à une pénurie chronique. Cette situation est aggravée par la croissance démographique, l'urbanisation rapide, la pollution des ressources et les effets du changement climatique. Selon les projections des Nations Unies, environ 4 milliards de personnes pourraient vivre sous stress hydrique sévère d'ici 2050.

L'agriculture est de loin le secteur le plus consommateur d'eau à l'échelle mondiale, représentant environ 70 % de la demande totale. Viennent ensuite l'industrie (20 %) et les usages domestiques (10 %). Dans certains pays en développement, ces proportions peuvent varier, l'agriculture représentant jusqu'à 90 % des prélèvements.

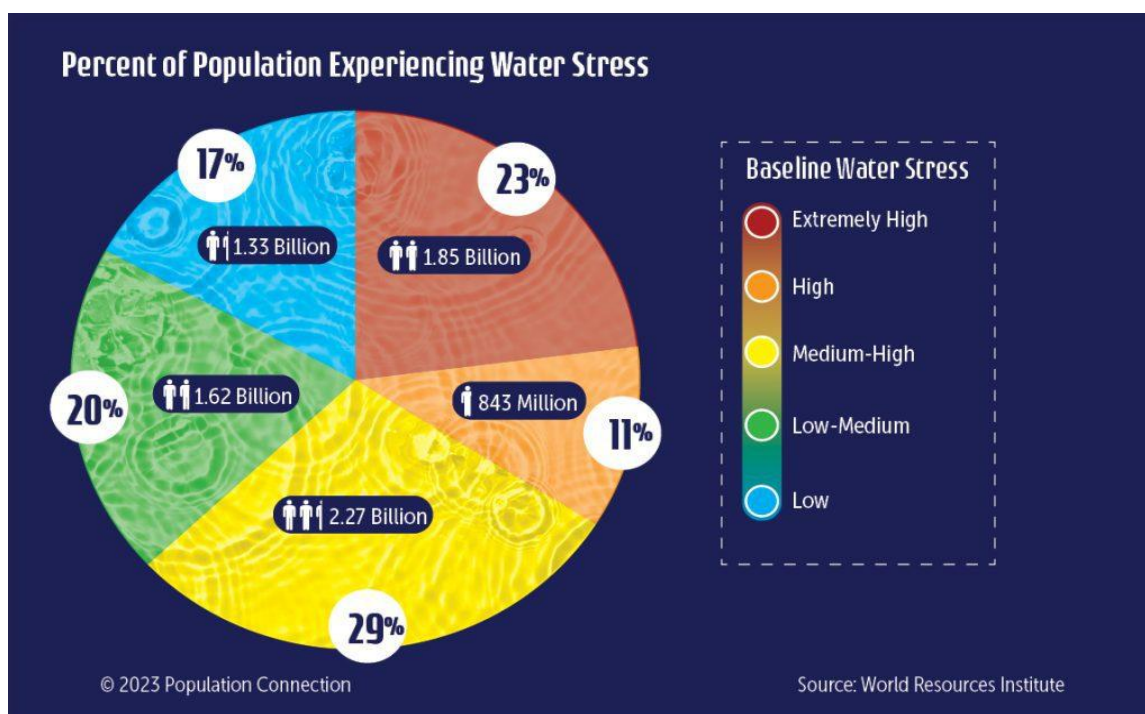


Figure I.1 : Pourcentage de personnes sous différentes catégories de stress hydrique (WRI, 2023)

Face à ces déséquilibres et aux pressions croissantes, de nombreuses régions du monde se tournent vers des stratégies de gestion intégrée de l'eau, incluant la réutilisation des eaux usées, l'optimisation des usages, et le développement de ressources alternatives comme le dessalement de l'eau de mer.

I.3. Les ressources en eau en Algérie :

Après avoir abordé la situation mondiale, il est pertinent d'examiner le cas spécifique de l'Algérie, un pays marqué par une disponibilité en eau limitée, une répartition inégale des ressources et une pression croissante sur les réserves existantes.

I.3.1. Une pression hydrique multifacteurs :

L'Algérie connaît une pression hydrique importante résultant de conditions climatiques arides et semi-arides, accentuées par la croissance démographique et le développement socio-économique. Les précipitations varient fortement selon les régions : elles dépassent rarement 700 mm/an sur le littoral et chutent à moins de 100 mm/an dans le Sud saharien. Cette irrégularité, combinée à la variabilité spatiale des ressources, complique la planification et la gestion durable de l'eau.

I.3.2. Disponibilité en eau renouvelable :

Les ressources hydriques renouvelables sont estimées à environ 11,3 milliards de m³/an, réparties entre 7 milliards de m³ d'eaux de surface et 4,3 milliards de m³ d'eaux souterraines. La disponibilité par habitant reste inférieure à 300 m³/an, un niveau bien en dessous du seuil de

pénurie fixé par la FAO (1 000 m³/an), plaçant le pays dans une situation structurelle de stress hydrique sévère. [3]

I.3.3. Répartition géographique et sectorielle :

Les ressources en eau sont concentrées majoritairement dans le nord du pays, notamment dans les bassins du Cheliff, de la Tafna, du Constantinois et du Sahara septentrional. Les zones sahariennes, quant à elles, dépendent essentiellement des nappes fossiles. L'agriculture demeure le principal secteur consommateur (environ 60 à 65 % des volumes mobilisés), suivie par l'alimentation en eau potable (près de 25 %) et l'industrie (10 à 15 %). Cette forte sollicitation, souvent associée à des pratiques d'irrigation peu efficaces, a conduit à la surexploitation de plusieurs nappes, provoquant une baisse des niveaux piézométriques et une dégradation progressive de la qualité des eaux.

I.4. Le développement du dessalement en Algérie :

Face à la raréfaction des ressources conventionnelles et à la hausse continue des besoins, l'Algérie a progressivement adopté le dessalement de l'eau de mer comme solution stratégique pour renforcer la sécurité hydrique nationale.

I.4.1. Historique du dessalement en Algérie :

Bien que le concept de dessalement ait été envisagé dès la fin des années 1990, c'est au début des années 2000 que cette technologie a été intégrée dans la politique nationale de l'eau. Le Plan National de l'Eau (PNE), lancé en 2001, a constitué le point de départ d'un vaste programme visant à sécuriser l'approvisionnement des grandes villes côtières.

La mise en service, en 2008, de la station d'El Hamma (Alger) d'une capacité de 200 000 m³/jour a marqué une étape décisive. Par la suite, plusieurs installations ont vu le jour à Oran, Ténès, Mostaganem, Tlemcen et Tipaza, consolidant l'option du dessalement par osmose inverse, reconnue pour sa fiabilité et ses coûts d'exploitation maîtrisés.

Depuis 2021, dans un contexte de sécheresse persistante, l'État a relancé le programme de dessalement avec l'ambition de couvrir 60 % des besoins urbains en eau potable d'ici 2030. [4]

I.4.2. Politique nationale et plan de développement :

La politique nationale en matière de dessalement vise à diversifier les sources d'approvisionnement et à réduire la dépendance vis-à-vis des ressources de surface et souterraines. Les objectifs du PNE s'articulent autour de quatre axes :

- Assurer l'autonomie hydrique des grands centres urbains côtiers
- Diminuer la pression sur les nappes phréatiques
- Stabiliser les services d'alimentation en eau potable
- Renforcer la résilience face aux impacts du changement climatique.

Ce programme, piloté par le Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique, s'appuie sur des partenariats publics et privés (Sonatrach, Sonelgaz, Cosider, General Electric, Hyflux, Aqualia, etc.). [5]

I.4.3. Les stations de dessalement en service (2025) :

En 2025, l'Algérie compte plus de 19 stations de dessalement en exploitation, réparties sur l'ensemble du littoral méditerranéen, pour une capacité globale d'environ 3,7 millions de m³/jour. Ces infrastructures assurent désormais une part significative de l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations, contribuant à la sécurisation durable des ressources dans un contexte de vulnérabilité climatique croissante. [6]

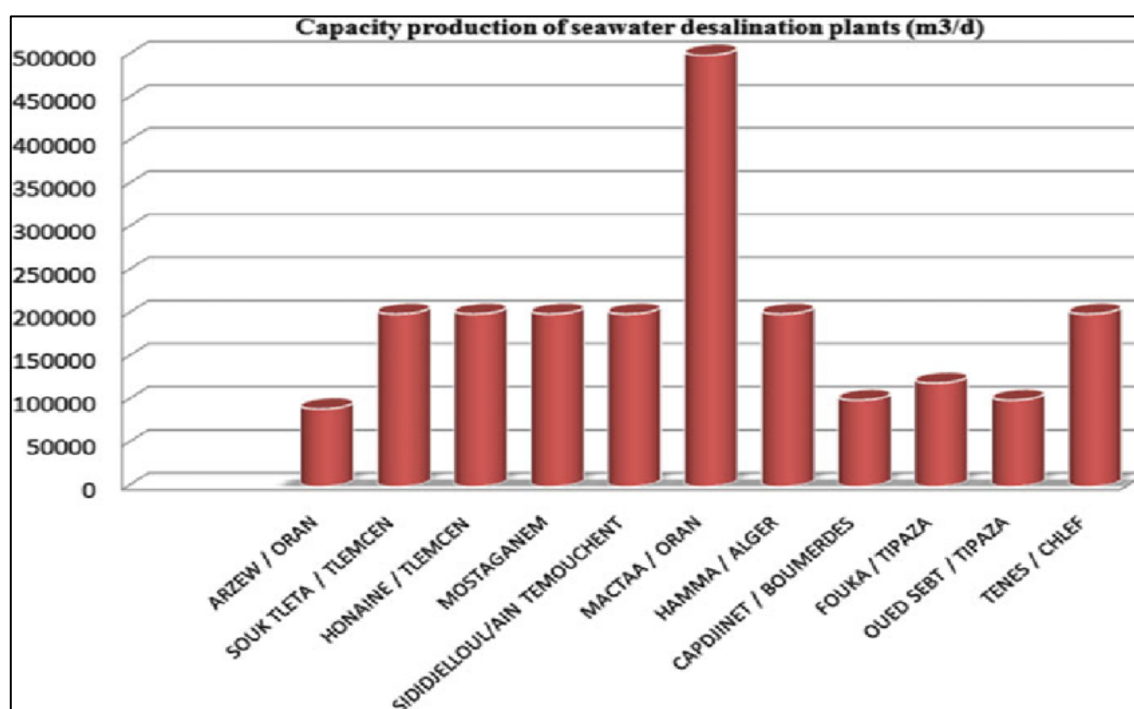


Figure I.2 : Évolution de la capacité installée des stations de dessalement en Algérie (Tigrine et al., 2018 via ResearchGate)

I.4.4 Contribution du dessalement au système d'AEP :

Le dessalement de l'eau de mer occupe aujourd'hui une place stratégique dans l'alimentation en eau potable des grandes villes côtières algériennes. Cette ressource non conventionnelle contribue à atténuer la pression sur les nappes phréatiques et les barrages, souvent surexploités.

Environ 90 % de l'eau dessalée est destinée à la consommation domestique, tandis que le reste alimente l'industrie et, dans une moindre mesure, certains projets agricoles pilotes. Dans plusieurs wilayas, comme Alger, Oran ou Tipaza, le dessalement assure jusqu'à 60 % des besoins quotidiens, garantissant une meilleure continuité du service même en période de sécheresse.

L'installation récente de stations monoblocs modulaires d'environ 10 000 m³/jour a renforcé la flexibilité du réseau et permis de répondre rapidement aux déficits locaux, intégrant le dessalement comme un pilier durable du système national d'AEP. [7]

I.4.5 Limites et défis du dessalement en Algérie :

Malgré son rôle essentiel dans la sécurisation de l'alimentation en eau, le dessalement en Algérie demeure confronté à plusieurs contraintes techniques, économiques et environnementales, qui conditionnent sa durabilité à long terme.

❖ Coût élevé de production :

Le dessalement reste une technologie onéreuse, avec un coût moyen compris entre 70 et 110 DA/m³. Cette dépense, supérieure à celle des ressources conventionnelles, pèse sur les finances publiques, en raison notamment de l'absence d'une tarification adaptée de l'eau.

❖ Dépendance énergétique :

Les stations à osmose inverse consomment en moyenne 3 à 4 kWh/m³, ce qui accentue la pression sur le réseau électrique national et entraîne des émissions indirectes de gaz à effet de serre, surtout lorsque l'énergie provient de sources fossiles. Cette dépendance rend également le secteur vulnérable aux fluctuations des prix de l'énergie. [8]

❖ Impacts environnementaux :

Le rejet des saumures concentrées et des produits chimiques utilisés dans le prétraitement (chlore, antiscalants, etc.) provoque une élévation locale de la salinité et perturbe les écosystèmes marins côtiers. Bien que des études d'impact soient prévues, leur application reste souvent partielle.

❖ Défis de maintenance et de gestion :

La gestion efficace des stations exige un personnel qualifié et une maintenance régulière. Certaines unités ont connu des arrêts prolongés dus à un manque d'entretien ou à la difficulté d'approvisionnement en pièces de rechange, affectant la continuité du service.

I.5. Conclusion :

Face à une raréfaction mondiale des ressources en eau, aggravée par le changement climatique et la croissance démographique, le dessalement de l'eau de mer s'est imposé comme une alternative stratégique à l'échelle internationale. En Algérie, où les ressources hydriques sont naturellement limitées et inégalement réparties, cette problématique est particulièrement aiguë. Pour y répondre, l'État a mis en œuvre une politique ambitieuse de dessalement depuis les années 2000, traduite par la construction progressive de stations à grande capacité et de stations monoblocs. Cette orientation a permis d'alléger la pression sur les nappes et les barrages tout en assurant un approvisionnement régulier en eau potable, surtout dans les zones côtières. Malgré les défis techniques, économiques et environnementaux, le dessalement demeure un pilier fondamental de la stratégie nationale de gestion de l'eau.

Chapitre II :
Procédé d'osmose inverse
dans le dessalement de l'eau
de mer

Chapitre II : Procédé d'osmose inverse dans le dessalement de l'eau de mer

II.1. Introduction :

L'osmose inverse est aujourd'hui la technique de dessalement la plus répandue, grâce à son rendement élevé et à la qualité de l'eau produite. Basée sur la séparation membranaire, elle consiste à appliquer une pression supérieure à la pression osmotique pour forcer l'eau salée à traverser une membrane semi-perméable, retenant ainsi les sels et impuretés.

Le dimensionnement d'une unité d'osmose inverse est une étape cruciale de la conception d'une station de dessalement. Il vise à déterminer les paramètres techniques permettant d'atteindre les objectifs de production et de qualité de l'eau, tout en garantissant la fiabilité et la durabilité du système. Cette étude repose sur l'analyse de facteurs tels que la qualité de l'eau d'alimentation, le débit de production, les performances des membranes, ainsi que les pressions et taux de récupération. Ce chapitre présente les bases théoriques nécessaires à la compréhension et au calcul des paramètres de fonctionnement d'un système d'osmose inverse.

II.2. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse :

L'osmose est un phénomène naturel de transfert d'eau à travers une membrane semi-perméable, allant du milieu le moins concentré vers le milieu le plus concentré, jusqu'à l'équilibre des pressions osmotiques. L'osmose inverse inverse ce processus naturel : en appliquant une pression supérieure à la pression osmotique, l'eau est contrainte de traverser la membrane dans le sens opposé, permettant ainsi de séparer l'eau pure des sels dissous. Ce principe constitue la base du dessalement moderne par membranes.

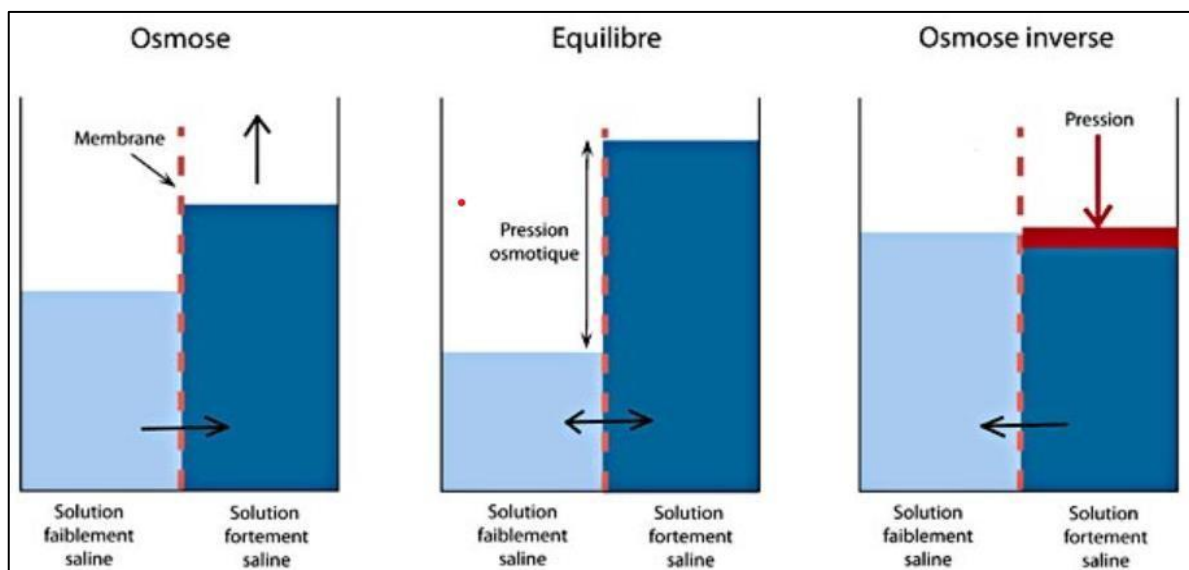


Figure II.1 : Osmose directe et osmose inverse (Polymem, 2024)

Lorsque l'on applique une pression P sur une solution concentrée, cela tend à réduire le flux d'eau traversant la membrane semi-perméable dans le sens naturel de l'osmose. Si cette pression atteint une valeur critique appelée pression osmotique (π), le transfert d'eau cesse complètement. En appliquant une pression supérieure à cette valeur, on inverse le sens du flux : c'est le principe de l'osmose inverse, où l'eau est contrainte de migrer de la solution concentrée vers la solution diluée, contre le gradient naturel de concentration. Ce phénomène est exploité pour purifier l'eau, notamment dans les procédés de dessalement. [9]

II.3. Paramètres caractéristiques d'une unité d'osmose inverse :

II.3.1. Pression osmotique : [10]

La pression osmotique constitue un paramètre fondamental dans l'étude et la conception des unités d'osmose inverse. Elle correspond à la pression minimale qu'il faut exercer sur une solution pour empêcher le passage du solvant à travers une membrane semi-perméable.

En première approximation, pour une solution diluée, on assimile le comportement des molécules dissoutes à celui d'un gaz parfait. La loi de Van't Hoff permet ainsi d'exprimer la pression osmotique :

$$\pi V = nRT$$

Avec :

- π : pression osmotique
- V : volume de la solution
- n : quantité de matière (mol)
- R : constante des gaz parfaits ($0,0821 \text{ bar} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
- T : température absolue (K)

Si le soluté est un électrolyte (par exemple le sel de cuisine), et se dissocie en plusieurs ions, il faut introduire un facteur de dissociation i , ce qui donne :

$$\pi = iCRT$$

Où :

- i : nombre d'ions produits par molécule dissociée
- C : concentration molaire (mol/L)
- R : constante des gaz
- T : température en Kelvin

Pour simplifier le calcul dans le cas de solutions salines, une approximation courante permet d'estimer la pression osmotique comme étant proportionnelle à la concentration en sel :

$$\pi \approx 0,7 \times C$$

avec :

- π : pression osmotique (en bar)
- C : concentration en sel (en g/L)

Cette relation permet de relier directement la salinité de l'eau de mer à la pression osmotique, facilitant ainsi les estimations de la pression minimale requise pour l'opération d'osmose inverse.

II.3.2. Taux de conversion (Recovery rate) :

Le taux de conversion, ou rendement de conversion, est un paramètre essentiel dans l'optimisation du fonctionnement d'une unité d'osmose inverse. Il exprime la proportion de l'eau d'alimentation transformée en perméat (eau douce).

Il est défini par la relation :

$$T = \frac{Q_p}{Q_a} \times 100$$

Avec :

- Q_p : débit du perméat (en m³/h)
- Q_a : débit d'alimentation de la membrane (en m³/h)
- T : taux de conversion (%)

Un taux de conversion élevé permet d'améliorer le rendement global de l'installation en augmentant la quantité d'eau produite et en réduisant le volume de concentrat rejeté. Cependant, il entraîne une hausse de la salinité du rejet, favorisant l'entartrage et la précipitation des minéraux sur les membranes. Dans le dessalement d'eau de mer, ce taux se situe généralement entre 30 et 50 %, en fonction de la salinité de l'eau brute, de la qualité du prétraitement, de la tolérance des membranes à l'entartrage et des considérations économiques et énergétiques. Le choix du taux optimal repose donc sur un compromis entre performance, fiabilité opérationnelle et coût global du procédé. [11]

II.3.3. Taux de rétention (ou taux de rejet) :

Le taux de rétention est un paramètre clé permettant d'évaluer la sélectivité des membranes d'osmose inverse. Il exprime la capacité de la membrane à retenir les sels dissous ou les impuretés contenues dans l'eau d'alimentation.

Il se définit par la relation :

$$R(\%) = 1 - \frac{C_p}{C_e} \times 100$$

Avec :

- R : taux de rétention (%)
- C_p : concentration en solides dissous dans le perméat (g/L)

Chapitre II : Procédé d'osmose inverse dans le dessalement de l'eau de mer

- C_e : concentration en solides dissous dans l'eau d'alimentation (l'eau brute) (g/L)

Lorsque la mesure de la concentration en sels n'est pas disponible, le taux de rétention peut être déterminé à partir de la conductivité :

$$R (\%) = 1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_e} \times 100$$

Avec :

- σ_p : conductivité du perméat ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- σ_e : conductivité de l'eau d'alimentation ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- R : taux de rétention (%)

En pratique, les membranes modernes d'osmose inverse affichent des taux de rétention compris entre **95 % et 99,8 %**, selon leur technologie et la qualité de l'eau traitée. [12]

II.3.4. Pression transmembranaire (PTM) :

La pression transmembranaire (PTM) est la force motrice essentielle qui gouverne le passage de l'eau à travers la membrane d'osmose inverse. Elle représente la différence de pression appliquée entre le côté alimentation et le côté perméat, corrigée par la pression du concentrat.

La PTM est exprimée par la relation suivante :

$$PTM = \frac{P_{\text{alimentation}} + P_{\text{concentration}}}{2} - P_{\text{perméat}}$$

Où :

- $P_{\text{alimentation}}$: pression mesurée à l'entrée du module (bar)
- $P_{\text{concentrat}}$: pression mesurée à la sortie du concentrat (bar)
- $P_{\text{perméat}}$: pression du perméat (bar).

Une PTM optimale doit être maintenue pour assurer un flux de perméat efficace. Une valeur trop faible limite la production d'eau, tandis qu'une valeur trop élevée peut accélérer le colmatage, les dépôts de tartre et réduire la durée de vie de la membrane.

Le suivi de l'évolution de la PTM dans le temps est un indicateur essentiel pour la maintenance préventive des membranes, car une hausse significative traduit généralement un encrassement ou un colmatage progressif. [13]

II.3.5. Flux transmembranaire (ou flux de perméat) :

Le flux transmembranaire correspond au débit d'eau produite par unité de surface de membrane. Il constitue un indicateur direct de la performance d'un module d'osmose inverse et permet d'évaluer l'efficacité du processus de séparation.

Le flux de perméat est donné par la relation suivante :

$$J = \frac{Q_p}{A_m}$$

Où :

- **J** : flux de perméat ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
- **Q_p** : débit volumique de perméat produit ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)
- **A_m** : surface active de la membrane (m^2)

La valeur du flux dépend de plusieurs paramètres, notamment la pression transmembranaire appliquée, la température, la salinité de l'eau d'alimentation et l'état d'encrassement de la membrane. Un flux trop élevé peut induire un risque accru de colmatage et de polarisation de concentration, tandis qu'un flux trop faible traduit généralement une perte de performance liée à l'usure ou au dépôt de particules. [14]

II.4. Les membranes d'osmose inverse :

Les membranes constituent l'élément central du procédé d'osmose inverse. Leur rôle est de séparer les sels dissous et autres impuretés de l'eau, tout en permettant le passage sélectif des molécules d'eau. Les performances d'une installation de dessalement dépendent directement du type de membrane choisi, de ses caractéristiques structurales et de son intégration dans un module. Une membrane d'osmose inverse est généralement constituée de plusieurs couches polymériques : une couche dense active, souvent en polyamide, responsable de la sélectivité ionique, supportée par une couche microporeuse assurant la résistance mécanique. La combinaison de ces propriétés permet d'atteindre un haut taux de rétention des sels (souvent supérieur à 98 %) tout en maintenant un flux d'eau satisfaisant. [15]

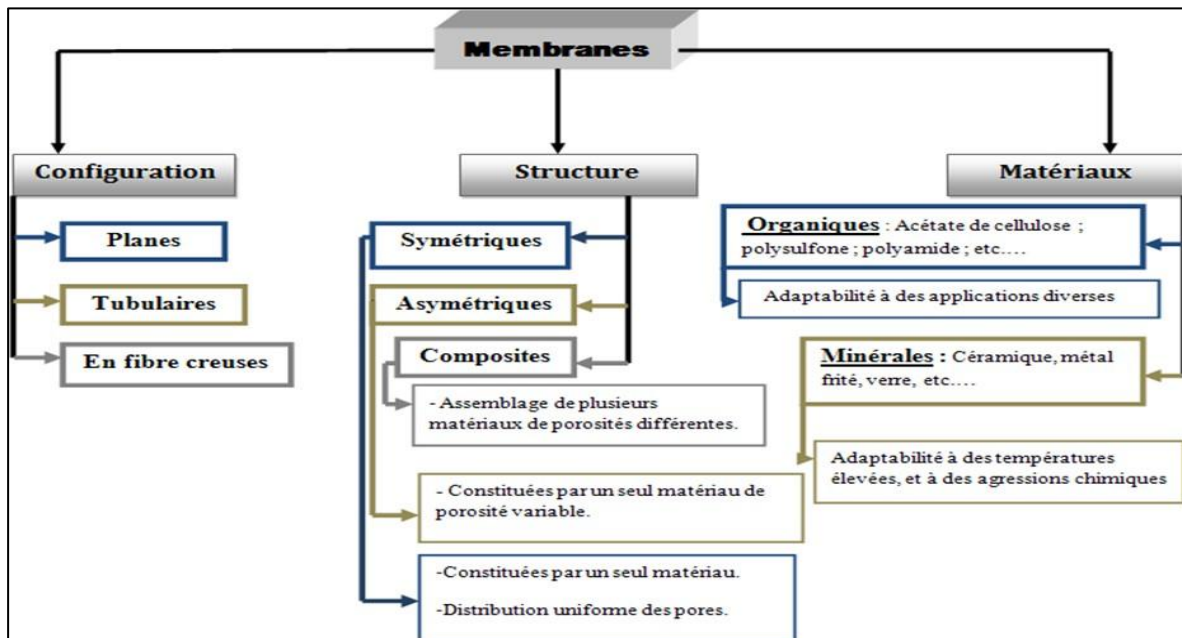


Figure II.2 : Classification des membranes d'osmose inverse (METAICHE.M, 2014)

II.4.1. Les types des membranes d'osmose inverse : [10]

Les membranes utilisées dans le dessalement par osmose inverse constituent l'élément essentiel du procédé. Elles sont semi-perméables et permettent le passage de l'eau tout en retenant la majorité des sels dissous. Les caractéristiques d'une membrane influencent directement le rendement, la sélectivité et la durée de vie de l'unité.

On distingue principalement les types de membranes suivants :

- **Membranes en acétate de cellulose (CA)** : ce sont les premières membranes utilisées industriellement. Elles présentent une bonne résistance au chlore, mais leur plage de fonctionnement en pH et température est limitée. Leur taux de rétention est généralement inférieur aux membranes composites modernes.
- **Membranes en polyamide aromatique (PA)** : largement utilisées aujourd'hui, elles offrent une excellente sélectivité et un flux élevé. Elles sont cependant sensibles aux oxydants (chlore libre), ce qui nécessite une protection en amont (antioxydants, neutralisation).
- **Membranes composites fines (TFC – Thin Film Composite)** : constituées de plusieurs couches (support microporeux, couche intermédiaire, couche active en polyamide). Elles allient une haute performance (forte rétention des sels > 99 %) et une large plage de conditions d'exploitation, mais leur sensibilité au chlore reste importante.

Ces membranes sont généralement fabriquées sous forme de films minces enroulés dans un support mécanique, destiné ensuite à être assemblé en module.

II.4.2. Les modules d'osmose inverse : [16]

Les membranes d'osmose inverse, sous forme de films minces, sont intégrées dans des modules assurant leur maintien, l'étanchéité et la circulation des flux d'alimentation, de perméat et de concentrat. Le choix du module dépend du débit souhaité, de la qualité de l'eau à traiter, du coût et de la facilité d'entretien. Plusieurs configurations de modules sont utilisées selon les besoins.

II.4.2.1. Module plan (ou à plaques) :

Les membranes d'osmose inverse sont disposées en modules, séparées par des entretoises et maintenues dans un cadre rigide formant des cellules où circule l'eau à traiter. L'eau brute s'écoule de manière turbulente entre les plaques, au contact des membranes semi-perméables. Une partie de cette eau traverse la membrane pour devenir le perméat, recueilli dans les compartiments collecteurs, tandis que le reste, plus concentré en sels est évacué en sortie sous forme de concentrat. (Voir figure II.3)

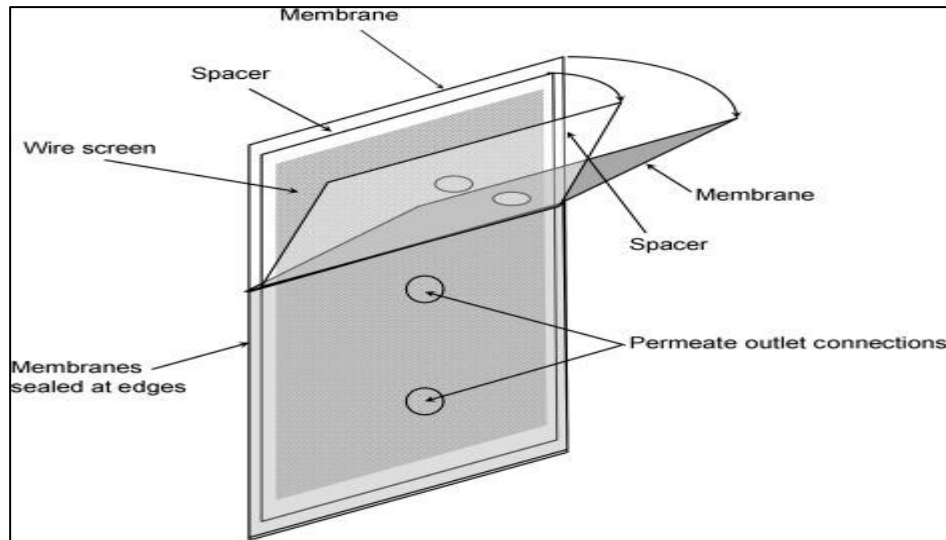


Figure II.3 : Module Plan (John Wiley & Sons, 2004)

II.4.2.2. Module tubulaire :

Le module tubulaire est constitué de membranes installées à l'intérieur de tubes poreux placés en parallèle dans un corps sous pression. L'eau brute circule à l'intérieur des tubes, où le perméat traverse la membrane pour être collecté à l'extérieur, tandis que le concentrat est évacué en sortie. Ce type de module convient particulièrement aux eaux fortement chargées, grâce à la possibilité de nettoyage mécanique des tubes, ce qui prolonge la durée de vie des membranes. Cependant, il présente des inconvénients tels qu'un coût élevé, un encombrement important et une surface membranaire relativement réduite.

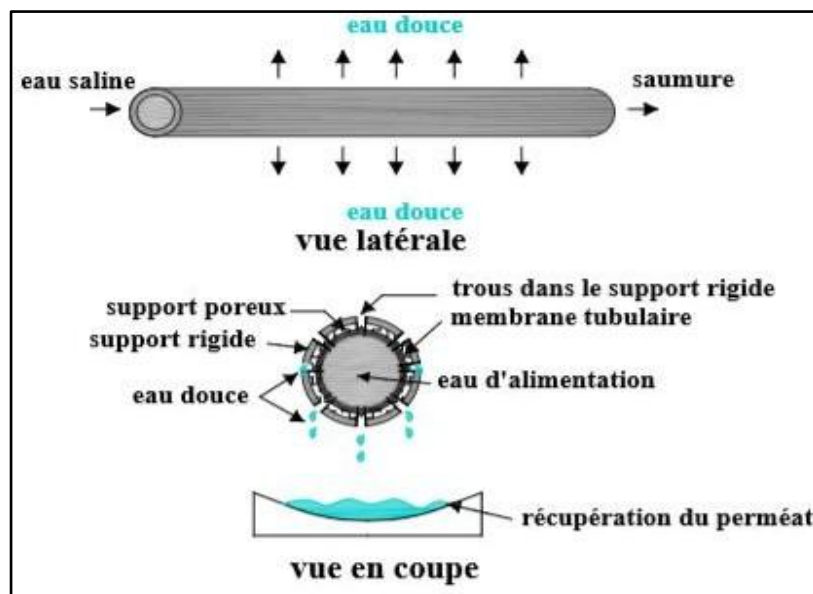


Figure II.4 : Schéma de principe d'un module tubulaire (Mehdi, M. (2006))

II.4.2.3. Module spiralé (ou spiral-wound) :

Le module spiralé est composé de membranes planes enroulées autour d'un tube collecteur central, séparées par des entretoises assurant la circulation de l'eau et un écoulement régulier. Ce design compact offre une grande surface membranaire pour un encombrement réduit. L'eau brute circule dans les canaux formés par les entretoises, le perméat traverse la membrane pour être collecté dans le tube central, tandis que le concentrat, plus salé, est évacué en sortie du module.

Les modules spiralés sont largement utilisés dans le dessalement par osmose inverse, car ils offrent un excellent compromis entre compacité, performance et coût. Leur surface membranaire élevée permet un traitement efficace de grandes quantités d'eau avec un encombrement limité. Cependant, ils sont moins adaptés aux eaux très chargées, car les matières en suspension peuvent provoquer un colmatage et nécessiter un prétraitement soigné.

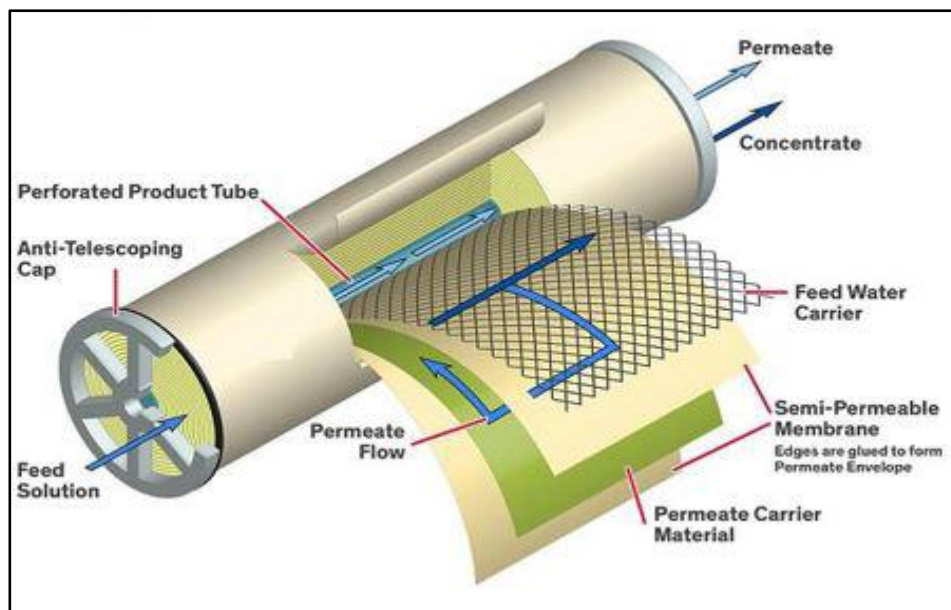


Figure II.5 : Module spiralé (A Revolution In Water Treatment And Desalination,2023)

II.4.2.4. Module à fibres creuses :

Les modules à fibres creuses sont composés de fines microcapillaires regroupées en faisceaux dans un boîtier sous pression, offrant une très grande surface membranaire dans un volume réduit. L'eau brute circule à l'intérieur ou à l'extérieur des fibres, le perméat traverse leurs parois pour être collecté, tandis que le concentrat est évacué en sortie. Ce type de module est très compact et performant, convient aux applications à fort débit, mais sa sensibilité au colmatage nécessite un prétraitement rigoureux de l'eau, limitant son usage aux eaux bien filtrées.

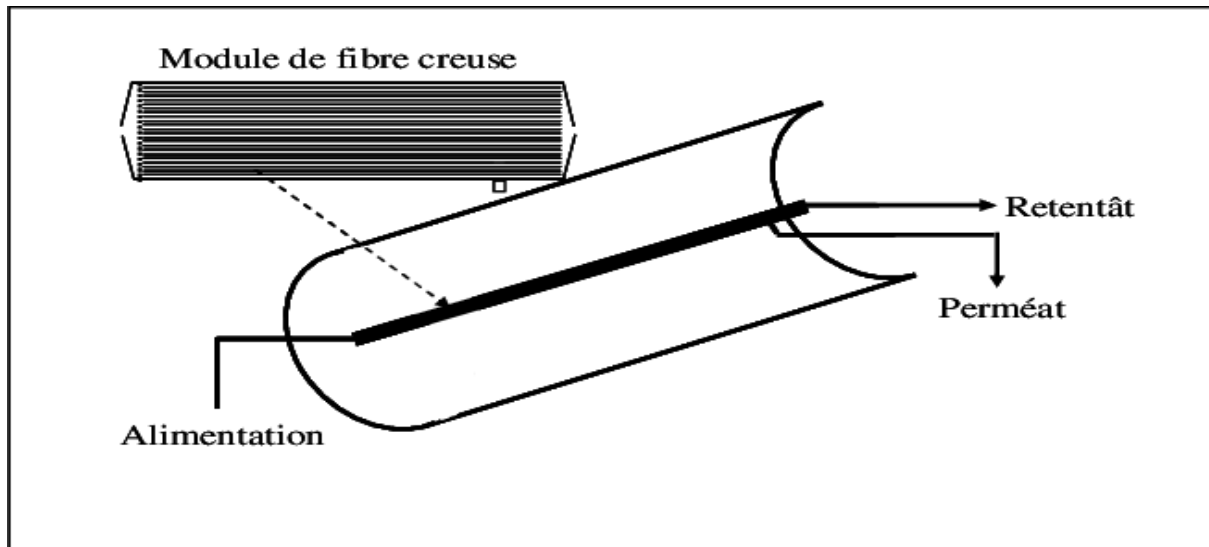


Figure II.6 : Module à fibre creuse (Nader Frikha, 2009)

Les différentes configurations de modules membranaires permettent d'adapter l'osmose inverse à divers types d'eaux et conditions d'exploitation. Les modules spiralés, compacts et efficaces, sont les plus utilisés pour le dessalement de l'eau de mer, tandis que les tubulaires sont mieux adaptés aux eaux chargées grâce à leur résistance au colmatage. Les fibres creuses offrent une grande surface dans un faible volume, idéales pour les eaux bien prétraitées, et les modules plans sont réservés à des applications spécifiques. Cette diversité assure une flexibilité optimale selon les besoins de traitement.

II.4.3. Les problématiques de fonctionnement des membranes :

Lors de leur exploitation, les membranes d'osmose inverse sont soumises à divers phénomènes qui réduisent progressivement leurs performances. Ces problèmes se traduisent principalement par une diminution du flux de perméat, une augmentation de la pression transmembranaire et une dégradation du taux de rétention en sels. Les principaux problèmes rencontrés sont :

- **Le colmatage (fouling) :** il résulte du dépôt progressif de matières en suspension, de matières organiques naturelles ou de particules colloïdales sur la surface de la membrane. Ce phénomène provoque une résistance supplémentaire au passage de l'eau et conduit à une chute du flux.
- **L'encrassement biologique (biofouling) :** il correspond à la prolifération de micro-organismes (bactéries, algues, champignons) qui forment un biofilm à la surface de la membrane. Le biofouling est difficile à éliminer et constitue l'un des principaux facteurs de dégradation irréversible des performances.
- **L'entartrage (scaling) :** il est dû à la précipitation de sels peu solubles (carbonates de calcium, sulfates de baryum, de calcium, etc.) lorsque leur concentration dépasse la solubilité dans l'eau d'alimentation. Ces dépôts minéraux obstruent les pores et entraînent une augmentation de la pression nécessaire pour maintenir le flux.
- **La dégradation chimique :** elle survient notamment en présence de chlore libre ou d'oxydants forts pouvant altérer la structure polymérique de la membrane (surtout celles en polyamide aromatique). Cela se traduit par une perte de sélectivité et une diminution du taux de rétention en sels.

- **La compaction** : phénomène physique lié à l'application prolongée d'une forte pression, qui entraîne un tassement irréversible de la matrice polymérique de la membrane. Cette compaction réduit la perméabilité et donc le flux de perméat.

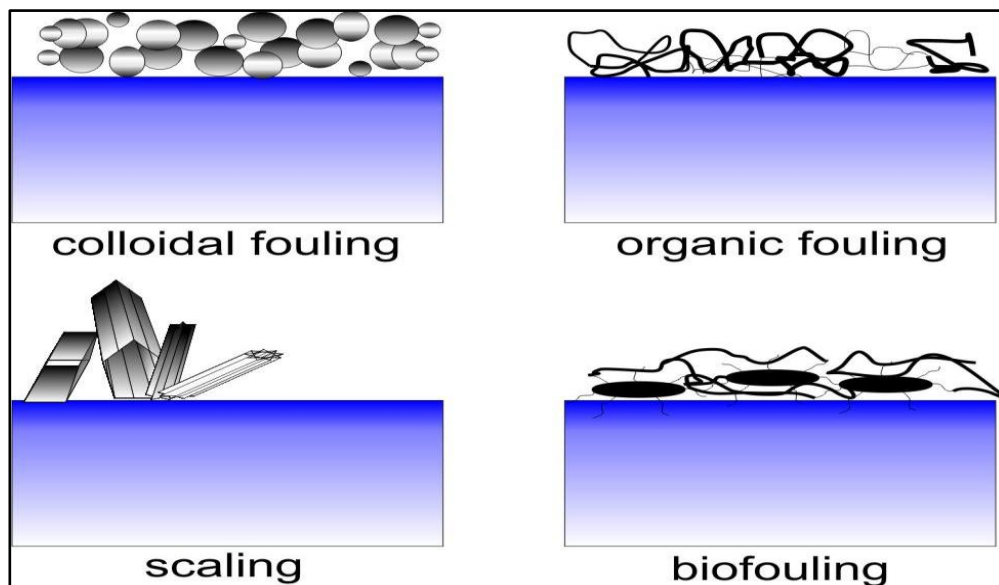


Figure II.7 : Schéma des différents mécanismes de colmatage (COLLOID.CH, 2022)

Ces différents problèmes nécessitent la mise en place de stratégies de prévention et de maintenance, telles qu'un prétraitement adapté de l'eau d'alimentation, un suivi rigoureux des paramètres de fonctionnement et des opérations régulières de nettoyage chimique (CIP).

II.4.4. Nettoyage des membranes :

Le maintien des performances et de la longévité des membranes d'osmose inverse dépend directement de la qualité des opérations de nettoyage et d'entretien mises en œuvre. Au cours de leur exploitation, les membranes subissent différents types d'encrassement (fouling) et d'incrustation (scaling), ce qui nécessite des nettoyages réguliers afin de rétablir leurs caractéristiques initiales.

II.4.4.1. Principe du nettoyage :

Le nettoyage des membranes repose sur la technique de CIP (Clean-In-Place), qui consiste à éliminer les dépôts accumulés à la surface active ou dans la structure interne des membranes. Il repose principalement sur l'utilisation de solutions chimiques adaptées à la nature des impuretés rencontrées :

- **Agents acides** : employés pour dissoudre les dépôts minéraux (carbonates de calcium, sulfates, hydroxydes métalliques).
- **Agents alcalins** : utilisés pour éliminer les matières organiques et détruire les biofilms microbiens.
- **Détergents spécifiques** : ajoutés, le cas échéant, pour accroître l'efficacité du lavage en synergie avec les acides ou les bases.

Le choix du produit chimique, de la concentration, du pH et de la durée du traitement est déterminé en fonction du type de colmatage diagnostiqué lors de l'exploitation.

II.4.4.2. Fréquence de nettoyage :

La fréquence du CIP est définie à partir du suivi régulier des indicateurs de performance de l'installation, notamment :

- L'augmentation de la perte de charge (ΔP) à travers les modules.
- La diminution progressive du taux de rejet des sels.
- La réduction du débit de perméat produit.

En pratique, un nettoyage est généralement recommandé lorsque la dégradation des performances atteint un seuil compris entre **10 et 15 %** par rapport aux conditions initiales de fonctionnement. [17]

II.5. Pompage à haute pression :

Le pompage à haute pression constitue le cœur énergétique du procédé d'osmose inverse. Son rôle principal est d'élever la pression de l'eau de mer bien au-delà de sa pression osmotique ($\approx 25\text{--}27$ bar pour une salinité moyenne de 35 g/L), jusqu'à des valeurs de **55–70 bar**, nécessaires au fonctionnement des membranes RO. Ces équipements représentent 40–50 % de la consommation énergétique totale de la station, ce qui en fait un poste crucial dans l'optimisation et la réduction des coûts d'exploitation. (Voir figure II.8).

II.5.1. Caractéristiques techniques des pompes haute pression :

Les pompes haute pression utilisées dans le dessalement sont généralement des pompes centrifuges multi-étagées spécialement conçues pour les conditions sévères d'opération. Leurs principales caractéristiques techniques sont :

- **Pression de refoulement** : généralement comprise entre **55 et 70 bar** pour l'eau de mer, ce qui correspond à la plage optimale pour le fonctionnement des membranes RO.
- **Débit nominal** : variable selon la capacité de la station, souvent de quelques centaines à plusieurs milliers de m³/h.
- **Rendement hydraulique** : supérieur à **85 %**, afin de minimiser les pertes énergétiques.
- **Type de construction** : pompes centrifuges multi-étagées, horizontales ou verticales, permettant d'atteindre de très hautes pressions de refoulement.
- **Matériaux** : corps de pompe et roue en aciers inoxydables duplex ou super-duplex, offrant une résistance élevée à la corrosion chlorurée et à la fatigue mécanique.
- **Système d'étanchéité** : garnitures mécaniques spéciales, conçues pour résister à la haute pression et à l'eau de mer.
- **Moteurs couplés** : moteurs électriques à haut rendement (souvent moteurs asynchrones IE3/IE4) dimensionnés pour un fonctionnement continu 24h/24.
- **Systèmes auxiliaires** : dispositifs de refroidissement, lubrification des paliers et surveillance en ligne (capteurs de vibration, température et pression).

Ces caractéristiques garantissent non seulement le bon fonctionnement du procédé de dessalement mais également la réduction de la consommation énergétique spécifique, qui représente plus de 40 % du coût global de production d'eau dessalée.



Figure II.8 : Pompes à haute pression (Belin.CD, 2024)

II.5.2. Types de pompes utilisées :

Deux grandes catégories de pompes sont utilisées dans les stations de dessalement :

- **Pompes centrifuges multistades :**
 - ✓ Les plus courantes dans les grandes stations (comme Bou Ismaïl).
 - ✓ Fonctionnent en ajoutant plusieurs roues (stages) en série pour atteindre la pression désirée.
 - ✓ Avantages : rendement élevé, débit important, maintenance plus facile.
- **Pompes à piston ou alternatives (moins fréquentes) :**
 - ✓ Utilisées dans les petites unités mobiles ou pilotes.
 - ✓ Capables de générer des pressions très élevées, mais avec des débits plus faibles.
 - ✓ Inconvénients : entretien fréquent et usure rapide des pièces en mouvement.

II.5.3. Consommation énergétique et optimisation :

La consommation énergétique des pompes à haute pression constitue un facteur clé du coût de production de l'eau dessalée, variant généralement entre 2,5 et 4,5 kWh/m³ dans les stations équipées de systèmes de récupération d'énergie. Cette valeur dépend du rendement hydraulique, du type de dispositif de récupération utilisé (ERI, DWEER, turbopompe, etc.) et des conditions de fonctionnement comme la température et la salinité de l'eau. Pour optimiser la performance énergétique, plusieurs stratégies sont mises en œuvre, notamment l'utilisation de convertisseurs de fréquence pour adapter la vitesse des pompes au débit et le couplage avec des systèmes de

récupération de pression de la saumure rejetée. Ces approches permettent de réduire les coûts d'exploitation tout en améliorant la durabilité des installations. [18]

II.6. Technologies de récupération d'énergie :

La récupération d'énergie est l'un des leviers majeurs pour améliorer l'efficacité énergétique des usines d'osmose inverse. Elle permet de réutiliser la pression contenue dans la saumure (rejet), qui sort généralement à une pression voisine de celle appliquée dans les modules membranaires (55–70 bar). Sans dispositifs de récupération, cette énergie serait totalement perdue.

Grâce à l'introduction de ces technologies, la consommation énergétique spécifique des usines modernes a pu être réduite à **2,5–3,5 kWh/m³**, contre **6–8 kWh/m³** pour les premières générations de stations. [19]

II.6.1. Dispositifs indirects :

Ces dispositifs utilisent un transfert mécanique d'énergie via une turbine ou une pompe hydraulique. Ils sont fiables mais présentent un rendement plus limité.

II.6.1.1. Turbopompe :

Une turbopompe est un dispositif hydraulique où la saumure sous pression alimente une turbine hydraulique solidaire de l'arbre d'une pompe. L'énergie mécanique récupérée est ainsi transmise au flux d'eau de mer, réduisant la charge de la pompe haute pression.

- ✓ Rendement typique : **70–80 %**
- ✓ Avantage : simplicité, robustesse mécanique
- ✓ Limite : dépend fortement du débit, sensible aux variations de charge

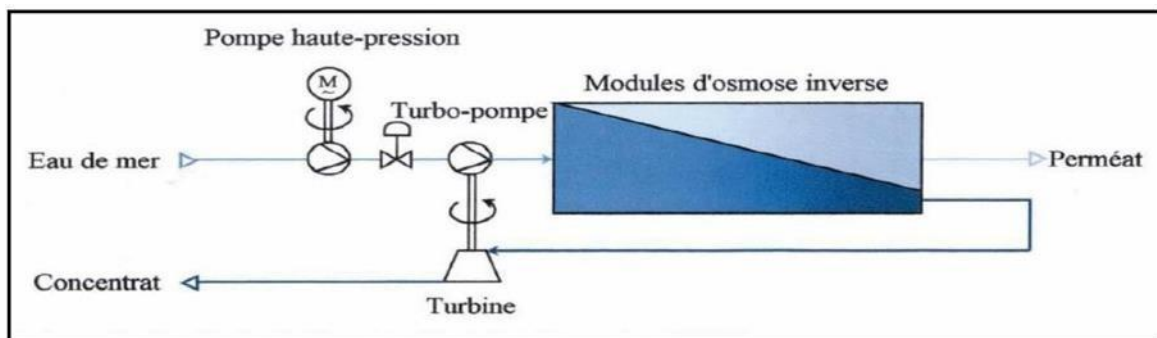


Figure II.9 : Schéma de la récupération énergétique par turbopompe (Encyclopédie de l'énergie, 2016)

II.6.1.2. Turbine Pelton :

Ce système utilise la saumure rejetée comme fluide moteur pour actionner une turbine Pelton. L'énergie mécanique produite est ensuite soit convertie en électricité, soit couplée mécaniquement à une pompe alimentant l'eau brute.

- ✓ Rendement typique : **75–85 %**
- ✓ Avantage : bonne efficacité pour de grands débits
- ✓ Limite : encombrement, coûts d'installation et pertes lors de la conversion d'énergie

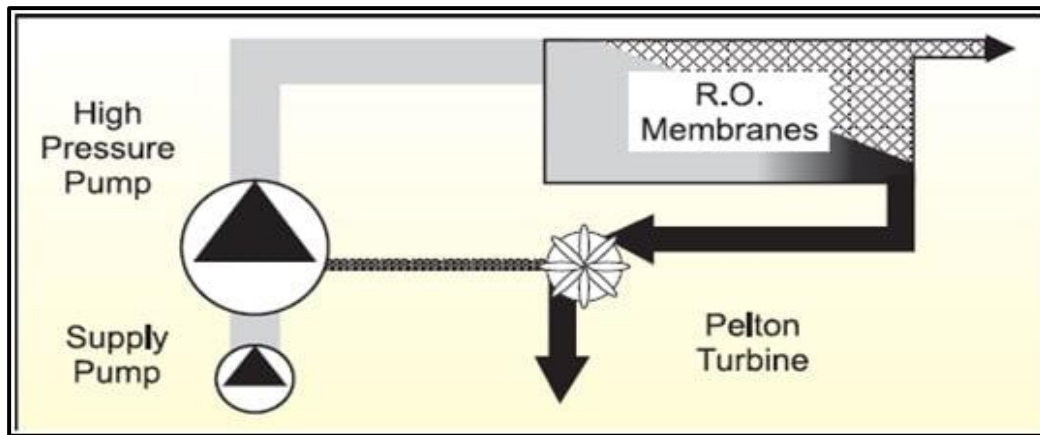


Figure II.10 : Système de récupération énergétique par la turbine Pelton (AES Arabia, 2018)

II.6.2. Dispositifs directs :

Ces systèmes assurent un transfert direct de la pression de la saumure vers le flux d'alimentation, ce qui évite les pertes liées aux conversions intermédiaires. Ils sont aujourd'hui les plus utilisés dans les grandes stations modernes.

II.6.2.1. ERI (Energy Recovery Inc. – Pressure Exchanger, PX) :

Le Pressure Exchanger (PX) est un dispositif constitué d'un cylindre rotatif en céramique comportant plusieurs canaux. Le concentrat à haute pression et l'eau d'alimentation à basse pression y circulent alternativement, permettant un échange direct de pression.

- ✓ Rendement typique : > 95 %
- ✓ Avantage : très faible consommation propre, compacité, haute fiabilité
- ✓ Limite : nécessite une alimentation stable, sensible à la qualité de l'eau (colmatage)

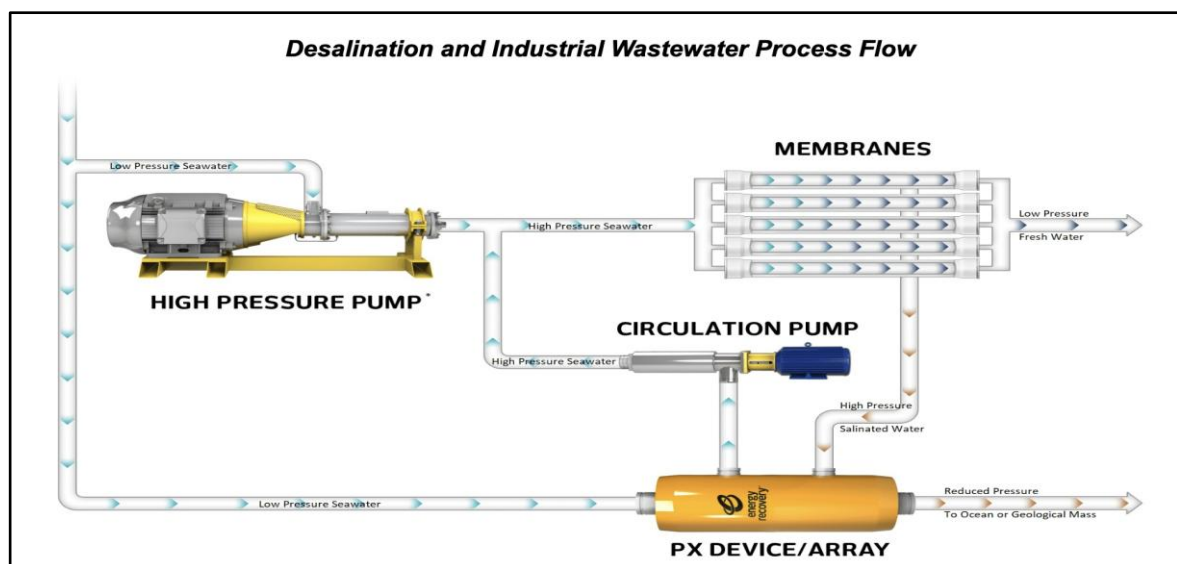


Figure II.11 : Système de récupération énergétique par l'échangeur ERI (Energy Recovery Inc., 2023)

II.6.2.2. DWEER (Dual Work Exchange Energy Recovery) :

Ce dispositif repose sur deux chambres à volume constant qui fonctionnent en alternance. La saumure à haute pression transfère sa pression à l'eau brute dans une chambre, pendant que l'autre chambre se recharge. Le cycle est répété en continu.

- ✓ Rendement typique : **90–95 %**
- ✓ Avantage : rendement élevé, conception hydraulique robuste
- ✓ Limite : conception plus complexe, maintenance plus exigeante que le PX

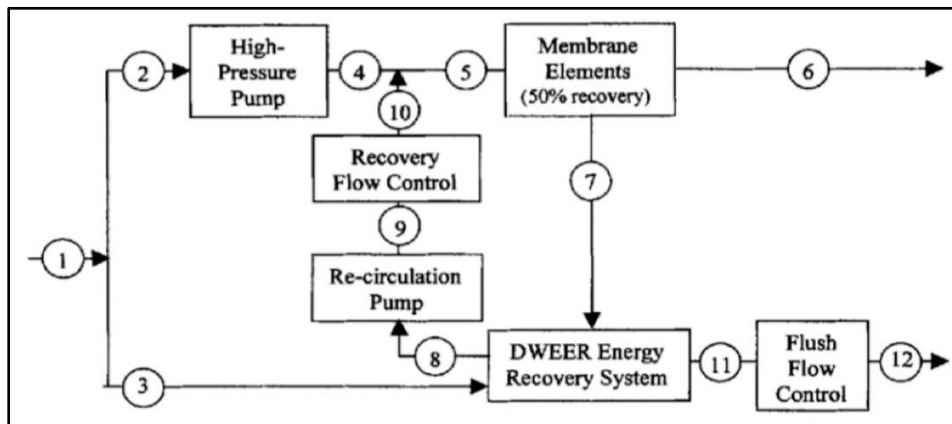


Figure II.12 : Système de récupération énergétique par l'échangeur DWEER (STOVER, R. L, 2005)

Les dispositifs de récupération d'énergie jouent un rôle central dans la réduction des coûts du dessalement. Les systèmes indirects (turbopompes, turbines Pelton) restent simples mais moins efficaces, tandis que les systèmes directs (PX, DWEER) dominent aujourd'hui grâce à leur rendement supérieur ($>90\%$) et leur contribution décisive à l'abaissement de la consommation énergétique spécifique à environ $2,5\text{--}3,0\text{ kWh/m}^3$.

II.7. Conclusion :

L'osmose inverse constitue l'étape centrale du dessalement, assurant une séparation efficace des sels dissous et permettant la production d'une eau répondant aux exigences de potabilité. À travers ce chapitre, nous avons mis en lumière le principe de fonctionnement du procédé, les propriétés essentielles des membranes, ainsi que l'importance des pompes à haute pression et des dispositifs de récupération d'énergie. L'efficacité de l'ensemble repose sur la synergie entre ces éléments, qui déterminent non seulement les performances techniques de la station, mais également son rendement énergétique et son coût de production. L'intégration de solutions d'optimisation, telles que le choix judicieux des membranes et l'utilisation de systèmes de récupération de pression, apparaît indispensable pour améliorer la compétitivité et réduire l'empreinte environnementale du dessalement. En somme, l'osmose inverse se présente comme une technologie fiable et performante, dont l'évolution continue contribue à renforcer la sécurité hydrique et à soutenir les objectifs de durabilité.

Chapitre III:

Présentation de la région et de la station

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

III.1. Introduction :

Ce chapitre présente la zone d'étude, à savoir la station de dessalement de Bou Ismaïl, située dans la wilaya de Tipaza. Cette installation joue un rôle important dans le renforcement de l'approvisionnement en eau potable dans une région où les ressources hydriques sont limitées. Dotée d'une capacité de production d'environ 10 000 m³ par jour, la station contribue principalement à couvrir les besoins en eau de la population de la commune de Bousmaïl, estimée à environ 74 000 habitants.

III.2. Présentation de la région Bousmaïl – Wilaya de Tipaza :

Avant d'aborder les aspects techniques liés à la station de dessalement, il est essentiel de présenter brièvement la région de Bousmaïl, son contexte géographique, physique et climatique, afin de mieux comprendre les conditions locales qui influencent la gestion et la production des ressources en eau.

III.2.1. Situation géographique :

La commune de Bousmaïl est située dans la wilaya de Tipaza, sur la côte nord de l'Algérie, à environ 35 km à l'ouest d'Alger. Elle appartient à la bande littorale du Tell central et bénéficie d'une position stratégique entre la capitale Alger et la ville de Tipaza. Sa proximité immédiate avec la mer Méditerranée lui confère un potentiel important dans les domaines du tourisme, de l'économie maritime et de la gestion des ressources en eau.

III.2.2. Relief et caractéristiques physiques :

Le relief de Bousmaïl est relativement plat à légèrement vallonné, avec des altitudes modérées. Cette configuration facilite l'aménagement urbain et le développement des infrastructures hydrauliques.

III.2.3. Climat :

Le climat est de type méditerranéen, marqué par deux saisons bien distinctes :

- Une saison froide et pluvieuse, d'octobre à mai
- Une saison chaude et sèche, de juin à septembre.

a) Pluviométrie

Les précipitations annuelles atteignent en moyenne 630 mm, réparties sur 99 jours de pluie. Elles présentent une forte variabilité saisonnière :

- Une croissance rapide de septembre à janvier
- Une diminution progressive de janvier à la mi-juin
- Des pluies rares à quasi nulles de mi-juin à septembre.

b) Températures

La température moyenne annuelle est de **17,55 °C**. Les extrêmes enregistrés varient entre **1,2 °C** (minimum absolu) et **42,6 °C** (maximum absolu), traduisant un contraste marqué entre les saisons.

III.2.4. Système d’approvisionnement en eau potable de la commune de Bousmail:

La commune de Bousmail est alimentée par un mix de ressources souterraines et d’eau dessalée, combinant forages et stations de dessalement afin de répondre à la croissance démographique et aux contraintes hydriques locales.

En 2025, elle bénéficie d’un mix de sources d’approvisionnement :

- **Forages locaux (Tekteka/Chaïba)** : eaux souterraines encore exploitées, représentant environ 32 % de la production totale au niveau de la wilaya.
- **Station de dessalement de Fouka 1** : apporte toujours près de 3000 m³/j à la commune.
- **Station de dessalement de Bousmail** : capacité de 10000 m³/j, actuellement en exploitation.
- **Station de dessalement de Fouka 2** : mise en service en 2025, contribuant à l’approvisionnement global de la wilaya de Tipaza, dont Bousmail bénéficie indirectement.

III.2.5. Estimation de l’évolution des besoins actuels :

Les besoins sont calculés par la formule suivante :

$$Q_{\text{moyj}} = \text{Dotation} * N_i$$

✓ **Besoins domestiques :**

D’après le recensement de 2020, la population de la commune de Bousmail était de 66000 habitants (Source APC Bousmail). En appliquant un taux d’accroissement annuel moyen 2.3 % sur une période de 5 ans, la population en 2025 est estimée à environ 74000 habitants. On fixe une dotation domestique pour cette année de 250 l/j/habitant.

$$Q_{\text{moyj}} = 250 * 74000 = 18500 \text{ m}^3/\text{j}$$

✓ **Besoins scolaires, administratifs et équipements publics :**

Tous les besoins et dotations sont résumés sur le tableau ci-dessous :

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

Tableau III.1: Besoins en eau des équipements

Equipements	Effectifs N_i	Dotation (l/j/unité)	Besoin journalier (m ³ /j)
24 Ecoles primaires	13440 élèves	20	268.8
10 CEM	5600 élèves	20	112
4 lycées	1344 élèves	20	26.88
Ecole national Maritime	11200 élèves	20	224
Centre d'étude et de recherche	224 élèves	20	4.48
Centre de recherche et d'analyse physico chimique (CRAPC)	5152 m ²	10	51.52
Centre d'excellence dans les métiers de la téléphonie	20160 m ²	10	201.6
8 Mosquées	56000 fidèles	5	280
Centres de santé	112000 m ²	10	1120
2 terrains de sport	5600 m ²	5	28
Gendarmerie	11200 m ²	5	56
Hôtel	1120 m ²	10	11.2
Protection civile	3920 m ²	10	39.2
Centres commerciaux	11200	10	112
Equipements Administratifs	11200 m ²	5	56

On trouve un besoin total des équipements de : $Q_{\text{moyj}} = 2591.68 \text{ m}^3/\text{j}$

✓ **Besoins industriels :**

Les besoins sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 : Besoins en eau industrielles

Activité	N_i	Dotation (l/j/unité)	Besoin journalier (m ³ /j)
Zone d'activité	336000 m ²	10	3360
Balawan céramique	-	-	2016
Industrie pharmaceutique Novapharme	-	-	1120

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

On trouve un besoin total pour le secteur industriel de :

$$Q_{\text{moyj}} = 6496 \text{ m}^3/\text{j}$$

Les besoins totaux en eau de la commune de Bousmail sont estimés en additionnant les besoins domestiques, industriels et ceux liés aux équipements collectifs, ce qui donne :

$$Q_{\text{moyj Total}} = 18500 + 6496 + 2591.68 = 27587.68 \text{ m}^3/\text{j}$$

III.3. Situation géographique de la station de Bou Ismaïl :

La station de dessalement est située dans la commune de Bousmaïl, relevant de la daïra de Bousmaïl, au sein de la wilaya de Tipaza, sur la côte nord de l'Algérie. Elle se trouve à environ 35 km à l'ouest d'Alger, au niveau de la baie de Bou Ismaïl, en bordure de la mer Méditerranée. Ses coordonnées géographiques sont d'environ 36°38' N et 2°42' E, ce qui lui permet un accès direct à l'eau de mer pour le captage, réduisant ainsi les besoins en infrastructure de transport.

La station est implantée en tête de baie, dans une zone côtière sensible, où l'on observe la présence de rejets domestiques et industriels, ce qui nécessite une gestion rigoureuse des effluents.

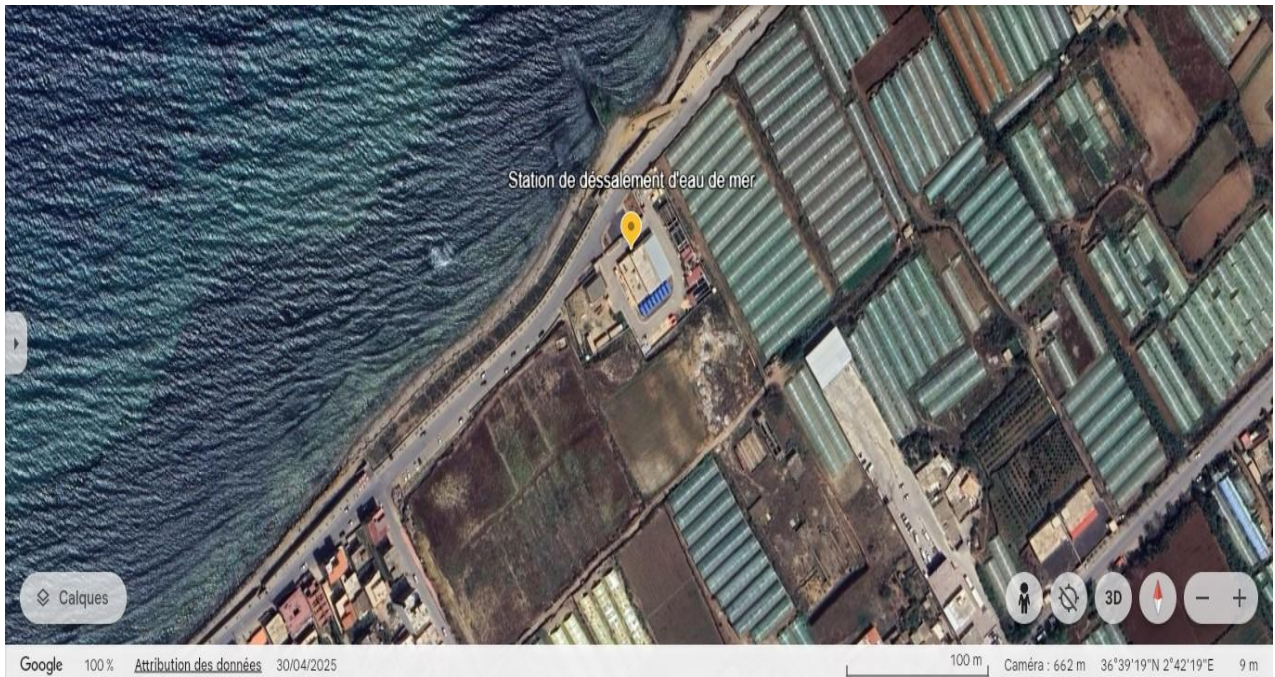


Figure III.1 : Situation géographique de la station de dessalement Bou ismail (Google Earth)

La baie de Bousmaïl s'étend sur environ 2 km de largeur et est bordée de zones urbaines et industrielles, ce qui rend stratégique la mise en place d'une station de dessalement pour assurer un approvisionnement sécurisé en eau douce.

III.4. Description de la station de Bou Ismail :

Le processus du dessalement d'eau de mer de la station de Bousmail se déroule en sept étapes principales :

1. Captage eau de mer
2. Décantation lamellaire

3. Filtration sable + cartouches
4. Dosage réactifs (pré-traitement)
5. Pompage HP + osmose inverse + récupération d'énergie
6. Reminéralisation + désinfection finale
7. Stockage et pompage d'eau traitée.

(Comme l'illustrent les planches 1 et 2, le plan de masse et de la station et le diagramme de fonctionnement permettent de visualiser les principales étapes du processus).

III.4.1. Captage de l'eau de mer :

L'eau de mer est prélevée à la source via un système de captage alimenté par 2 pompes verticales, chacune dimensionnée pour un débit de 500 m³/h sous une pression de service de 3,6 bars. Ces pompes assurent l'aspiration initiale de l'eau depuis l'environnement marin vers les étapes de prétraitement.

Chaque pompe est équipée de vannes d'isolement, qui permettent une mise à l'arrêt individuelle sans affecter le reste du système, ainsi que de clapets anti-retour conçus pour empêcher les reflux en cas d'arrêt. Le système comprend également des capteurs de pression pour le contrôle en continu, ainsi que d'autres dispositifs de sécurité intégrés au système d'automatisation afin de maintenir un fonctionnement stable et fiable, même en cas de variation du niveau marin ou de dysfonctionnement hydraulique.



Figure III.2 : Pompes d'amorçage au niveau de captage

Ce système de captage constitue la première barrière de fiabilité du processus de dessalement. Il assure la régularité du débit vers les unités de traitement en aval.

III.4.2. Le prétraitement :

Le prétraitement constitue une étape clé dans le procédé de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse. L'objectif principal de cette phase est de conditionner l'eau brute avant son passage à travers les membranes, en éliminant les matières en suspension, en réduisant la turbidité, et en limitant le potentiel de colmatage biologique, organique ou minéral des membranes.

Ce traitement préventif permet de préserver l'intégrité et la performance du système d'osmose inverse, tout en prolongeant la durée de vie des membranes et en réduisant les besoins en nettoyage chimique.

À la station de dessalement de Bou Ismaïl, le prétraitement repose sur une succession d'étapes physico-chimiques, à savoir :

- La décantation lamellaire, qui permet la séparation des particules lourdes par gravité,
- La filtration sur sable sous pression, destinée à piéger les particules fines,
- La microfiltration sur cartouches, assurant une rétention des impuretés les plus fines,
- Et enfin, le dosage de réactifs chimiques, notamment l'hypochlorite de sodium, le bisulfite de sodium, l'hydroxyde de sodium et les dispersants antitartre.

Ces traitements garantissent une eau d'alimentation répondant aux exigences de qualité nécessaires à un fonctionnement optimal du système d'osmose inverse, notamment un indice de colmatage (SDI) inférieur à 5.

III.4.2.1. Décantation lamellaire :

La première étape du prétraitement à la station de dessalement de Bou Ismaïl repose sur une décantation lamellaire, mise en œuvre à travers 2 décanteurs en béton armé, chacun conçu pour traiter un débit nominal de **468,6 m³/h**. Ces unités sont équipées de plaques inclinées (lamelles), positionnées selon un angle optimal permettant d'augmenter significativement la surface spécifique de décantation sans nécessiter une grande emprise au sol. Cette configuration favorise la sédimentation des particules solides en suspension par gravité, en réduisant leur temps de chute et en améliorant l'efficacité de séparation.

Chaque décanteur présente une hauteur de **4,52 m**, un volume utile de **205,66 m³**, et un temps de rétention hydraulique d'environ **26,33 min**, suffisant pour permettre la décantation des particules lourdes. Les boues qui se déposent au fond des décanteurs sont régulièrement évacuées grâce à un système automatique de purge.

Chaque décanteur est équipé de 4 vannes de vidange, situées à sa base, qui permettent de retirer les sédiments accumulés sans interrompre le fonctionnement de l'installation. Cette évacuation périodique est essentielle pour éviter tout encrassement du système, maintenir un bon rendement de décantation et garantir la qualité de l'eau en sortie vers les étapes suivantes.



Figure III.3 : Décanteur 1 et 2 vue de haut (élaboré par l'étudiante)

Bien que la conception de la station prévoie des installations pour une éventuelle étape de coagulation-floculation (réservoirs de produits chimiques et bassins de mélange), celles-ci ne sont pas exploitées actuellement, la décantation physique seule étant jugée suffisante pour assurer les performances de clarification requises.

III.4.2.2. Pompage de l'eau décantée :

L'eau décantée est collectée dans une bêche tampon en béton, qui joue un rôle d'équilibrage hydraulique entre la décantation lamellaire et la phase de filtration. Cette bêche permet de compenser les variations de débit et d'assurer une alimentation continue en aval. L'eau y est ensuite pompée vers les filtres à sable à l'aide de 4 pompes centrifuges, chacune capable de délivrer un débit de **250 m³/h** sous une pression de **4 bars**.

Le fonctionnement de ces pompes est piloté par des variateurs de fréquence, ce qui permet une régulation dynamique et précise du débit en fonction des conditions réelles d'exploitation et des besoins instantanés du système. Cette automatisation contribue à la stabilité hydraulique du procédé, tout en limitant les consommations énergétiques et les à-coups dans le réseau. Ce pompage intermédiaire assure ainsi une transition fluide et contrôlée entre les étapes de

clarification (décantation) et de filtration (sur sable), condition essentielle pour garantir une qualité d'eau constante avant la microfiltration.

III.4.2.3. Filtration multicouche :

La filtration multicouche constitue l'une des étapes majeures du prétraitement physique de l'eau de mer à la station de dessalement de Bou Ismail. Elle est assurée par **8** filtres fermés multicouches, fonctionnant sous pression, et contenant des médias granulaires constitués de **silex (sable siliceux)** en couche inférieure et d'**anthracite** en couche supérieure. Cette configuration bicouche permet une filtration en profondeur, favorisant la rétention progressive des particules de tailles variées.

Chaque filtre présente une surface de filtration de **12,5 m²**, avec un diamètre de **2,5 m**, et une vitesse de filtration $\leq 10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, assurant un bon compromis entre efficacité de rétention et pertes de charge modérées. Cette étape vise à piéger les particules fines résiduelles issues de la décantation lamellaire, telles que les floccs partiellement décantés, les matières organiques fines ou encore les algues microscopiques.

Le système est entièrement automatisé pour maintenir un fonctionnement stable et continu. Il est équipé d'un système de contre-lavage (**backwash**), qui s'enclenche périodiquement afin de régénérer le pouvoir filtrant des médias. Ce backwash combine :

- L'air comprimé (**750 Nm³/h à 0,5 bar**) pour décolmater les médias.
- Suivi d'un rinçage à l'eau à contre-courant (**250 m³/h à 2,02 bars**) pour évacuer les matières accumulées.

Une particularité notable de la station est l'utilisation, pour certains cycles, de la saumure issue de l'osmose inverse comme eau de lavage. Ce procédé de lavage osmotique antibactérien contribue à réduire la charge microbienne dans les filtres et à prolonger la durée de vie des médias filtrants.



Figure III.5 : Filtres à sable



Figure III.4 : Vue proche de filtre à sable

Cette étape intermédiaire est cruciale pour abaisser la turbidité de l'eau et garantir une qualité suffisante en vue des étapes suivantes de microfiltration sur cartouches et d'osmose inverse.

III.4.2.4. La microfiltration :

Après la filtration sur sable, l'eau subit une étape d'affinage à travers quatre filtres à cartouches, disposés en parallèle (un par ligne de traitement). Chaque filtre est équipé de 91 cartouches filtrantes en **PRFV** (plastique renforcé de fibre de verre) d'une longueur standard de **1 250 mm** et d'un seuil de filtration de 5 microns. Cette microfiltration permet de retenir les particules résiduelles très fines qui auraient pu passer les filtres à sable, notamment les colloïdes, les impuretés organiques non décantables et les floccs fragiles non captés.

Le débit unitaire de chaque filtre est d'environ **234 m³/h**, sous une pression de service stabilisée à **4 bars**, garantissant une circulation efficace sans perte de charge excessive. Cette étape est cruciale pour atteindre un indice de colmatage **SDI** (Silt Density Index) inférieur à 3, qui constitue un critère de qualité strict pour l'eau d'alimentation des membranes d'osmose inverse. Un SDI trop élevé indique une forte présence de particules susceptibles d'encrasser rapidement les membranes, entraînant une augmentation des pertes de charge, une baisse de rendement et une fréquence accrue des lavages chimiques. Ainsi, la microfiltration sur cartouches joue un rôle essentiel dans la protection et la durabilité du système d'osmose inverse, en réduisant le risque de colmatage physique et biologique.



Figure III.6 : Filtres à cartouches 5 microns



Figure III.7 : Coupe d'un filtre à cartouches



Figure III.8 : L'unité de microfiltration

L'étape de microfiltration garantit un indice SDI conforme aux spécifications de l'osmose inverse, protège les membranes contre le colmatage et prolonge la durée de vie globale du système.

III.4.2.5. Dosage d'hypochlorite de sodium :

Avant l'entrée dans les filtres à sable, une injection contrôlée d'hypochlorite de sodium (NaClO) est réalisée dans le but de désinfecter l'eau de mer brute. Ce traitement vise principalement à éliminer les micro-organismes présents dans l'eau (bactéries, algues, protozoaires), afin de prévenir tout risque de prolifération biologique dans les unités de prétraitement ou au niveau des membranes d'osmose inverse.

La dose appliquée est généralement de **1 ppm**, avec une limite maximale fixée à **3 ppm**. Le système de dosage comprend quatre pompes doseuses fonctionnelles et une en secours, couplées à une cuve de stockage en polyéthylène (PE) d'une capacité de **5 000 litres**, équipée de capteurs de niveau et de dispositifs d'alarme assurant un suivi en temps réel.

L'introduction du NaClO à ce stade permet de limiter le développement biologique, de protéger les filtres à sable contre le colmatage biologique (développement de Biofilms), et de réduire la charge organique biodégradable avant les étapes sensibles du procédé. Toutefois, la présence de chlore libre étant incompatible avec les membranes en polyamide, il est neutralisé en aval par l'injection de bisulfite de sodium avant l'osmose inverse.



Figure III.9 : Cuve de stockage de (NaClO)



Figure III.10 : Pompes doseuses à membrane pneumatique

Ces figures représentent les principaux équipements dédiés à la désinfection de l'eau brute par hypochlorite de sodium. La cuve de stockage assure la disponibilité du réactif, tandis que la pompe doseuse pneumatique permet son injection précise et contrôlée dans le flux d'alimentation.

III.4.2.6. Correction du pH et ajout de dispersant :

Afin de stabiliser le pH de l'eau de mer prétraitée et de limiter les risques d'incrustation au niveau des membranes d'osmose inverse, deux réactifs sont injectés en amont de cette étape : l'hydroxyde de sodium (**NaOH**) et un **dispersant antitartre**. L'ajustement du pH est essentiel, car une eau trop acide ou trop instable chimiquement peut endommager la surface active des membranes ou favoriser la précipitation de sels dissous. Le NaOH est injecté à une dose moyenne de **5 ppm** (avec une dose maximale tolérée de 10 ppm), par le biais de **4 pompes doseuses** en fonctionnement + **une de secours**, alimentées par une cuve de stockage de **4000 L**. (Voir Figure III.11).

En parallèle, un dispersant antitartre est également ajouté à raison de **0,7 ppm** en moyenne (jusqu'à 2 ppm selon les conditions de l'eau). Son rôle est de désactiver les ions responsables des dépôts minéraux (comme Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2) en les maintenant en solution, ce qui empêche leur cristallisation sur les membranes. Le système est équipé de **2 cuves de 1000 L** dédiées à ce produit, assurant une autonomie de fonctionnement suffisante. L'association de ces deux traitements permet de préserver la performance des modules d'osmose inverse, de réduire la fréquence des nettoyages chimiques (**CIP**) (Clean-In-Place), et d'augmenter la durée de vie opérationnelle des membranes.



Figure III.11 : 4 Pompes doseuses + 1 secours

III.4.2.7. Neutralisation du chlore par bisulfite de sodium :

Enfin, afin de protéger les membranes d'osmose inverse contre les effets oxydants du chlore libre, un dosage précis de bisulfite de sodium (NaHSO_3) est réalisé en aval de la filtration sur cartouches. Ce réactif réducteur est injecté dans le but de neutraliser totalement le chlore résiduel présent dans l'eau prétraitée, car même à très faible concentration, le chlore actif peut endommager irréversiblement les membranes en polyamide, en altérant leur structure chimique et en réduisant leur performance de rétention des sels. La dose moyenne de bisulfite appliquée est de **2,5 ppm**, avec une valeur maximale admissible de **7,5 ppm**, ajustée en fonction de la concentration réelle de chlore mesurée. L'installation de dosage comprend quatre pompes doseuses en fonctionnement, plus une en secours, associées à une cuve de stockage de **1000 L** en PE.

Pour garantir une neutralisation optimale sans surdosage, la régulation du bisulfite est automatisée grâce à un système de contrôle en ligne basé sur la mesure du potentiel redox. Ce paramètre permet de suivre en continu l'état d'oxydoréduction de l'eau et d'ajuster dynamiquement le débit d'injection, assurant ainsi un environnement parfaitement neutre et sans risque pour les membranes.

III.4.3. Pompage haute pression :

Pour franchir les membranes d'osmose inverse, l'eau de mer prétraitée doit être mise sous forte pression. Cette tâche est assurée par 4 groupes électropompes haute pression, chacun capable de

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

fournir un débit de **105 m³/h** à une pression différentielle de **61 bars**. Ces pompes sont de type centrifuge à axe horizontal, alimentées en **400 V**. La puissance du moteur est de **320 kW** par unité, avec un démarrage statique (soft starter) pour éviter les chocs hydrauliques et protéger l'installation électrique.

Chaque pompe est équipée de :

- **Capteurs de pression** avec transmetteurs analogiques (4–20 mA) en entrée et sortie
- **Pressostats de sécurité** (basse et haute pression) reliés au système de contrôle (PLC)
- **Clapets anti-retour**, vannes d'isolement et compensateurs de dilatation
- **Matériaux de construction** : acier inoxydable super duplex, hautement résistant à la corrosion saline

Ces équipements assurent une alimentation fiable, continue et régulée du système d'osmose inverse, qui est le cœur du procédé de dessalement.



Figure III.12 : Système de pompe haute pression

Cette figure illustre le système de pompe haute pression constitué de pompes centrifuges, dont le rôle est d'alimenter les racks d'osmose inverse en maintenant la pression nécessaire pour assurer le processus de dessalement.

III.4.4. Osmose inverse (OI) :

L'osmose inverse constitue l'étape centrale du processus de dessalement, assurant la séparation de l'eau douce et des sels dissous présents dans l'eau de mer. À la station de Bou Ismaïl, cette opération est réalisée à travers quatre lignes indépendantes, chacune équipée d'un rack d'osmose inverse. Chaque ligne comprend 21 tubes à pression (boîtiers) en PRFV, contenant chacun 8 membranes spirales en polyamide aromatique d'un diamètre de **200 mm**, soit 168 membranes par rack. (Voir Figure III.13)

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

L'eau d'alimentation, après avoir été pressurisée à environ **61 bars**, pénètre dans les membranes où elle est filtrée à l'échelle moléculaire. Seules les molécules d'eau franchissent la membrane, tandis que les sels, les ions et autres contaminants sont rejetés sous forme de saumure. Le débit d'alimentation de chaque ligne est de **235 m³/h**, et le débit moyen de perméat (eau traitée) est de **104 m³/h**, soit un taux de conversion de **45 %**, ce qui signifie qu'environ 45 % de l'eau d'entrée est transformée en eau douce, le reste étant rejeté comme concentrat.

Les performances des modules d'osmose sont suivies en temps réel grâce à un ensemble d'instruments de mesure installés :

- **Capteurs de pression** en entrée et en sortie de chaque rack
- **Capteurs de conductivité** sur les collecteurs de perméat, pour vérifier la qualité de l'eau dessalée (objectif < 400 ppm de sels)
- **Débitmètres électromagnétiques**, pour surveiller les volumes d'eau produits
- **Indicateurs de perte de charge**, pour détecter le colmatage ou le vieillissement des membranes

Enfin, le système est conçu pour un nettoyage chimique (**CIP**) périodique des membranes à l'aide d'une solution acide ou alcaline filtrée sur cartouches de **5 microns**, injectée à travers une pompe dédiée de **230 m³/h à 4 bars**, ce qui permet de maintenir la performance des membranes à long terme. À la station de dessalement de Bousmaïl, le déclenchement du nettoyage chimique des membranes est réalisé lorsque la perte de charge (différence de pression entre l'entrée et la sortie d'un rack d'OI) à travers les modules d'osmose inverse dépasse 20 % de la valeur initiale, seuil fixé afin de limiter le colmatage et de préserver la performance et la durée de vie des membranes. (le lavage prend de 6h à 10h).



Figure III.14 : Un rack de RO (membranes spiralées)



Figure III.13 : Unité de RO

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

Les figures montrent le rack d'osmose inverse composé de boîtiers sous pression contenant les membranes spiralées. Chaque rack assure la séparation de l'eau douce et de la saumure sous l'effet de la haute pression appliquée par les pompes HP.

(La planche 3 montre le procédé de la filtration et d'osmose inverse de la ligne 1 de la station).

III.4.4.1. Les membranes d'osmose inverse :

Les membranes utilisées à la station de Bou Ismaïl sont de type spiralé en polyamide aromatique (PA), avec un diamètre standard de **200 mm (8 pouces)**. Elles sont insérées dans des boîtiers en PRFV (plastique renforcé de fibres de verre), capables de résister aux pressions de service de l'osmose inverse. Ces membranes sont de la marque **DuPont-DOW FILMTEC**, modèle **SW30HRLE-400**.

Ces membranes se distinguent par :

- **Une capacité de rejet des sels > 99,7 %**, garantissant une eau dessalée conforme aux normes (< 400 mg/L de TDS).
- **Une configuration spiralée**, offrant une grande surface active pour un rendement élevé tout en limitant l'encombrement.
- **Des exigences strictes de prétraitement**, notamment un indice SDI inférieur à 5, afin de réduire les risques de colmatage biologique et minéral.
- **Une compatibilité avec le nettoyage en place (CIP)**, utilisant des solutions acides, alcalines ou dispersantes pour restaurer les performances après encrassement.
- **Une durée de vie moyenne de 3 à 5 ans**, selon la qualité du prétraitement et la fréquence des nettoyages.
- **Pression de service maximale : 83 bar (1200 psi)**
- **Débit de perméat nominal : 28 m³/j (7500 GPD)**

III.4.4.2. Récupération d'énergie :

L'un des points critiques dans une station d'osmose inverse est la consommation d'énergie, due à la haute pression nécessaire. Pour optimiser ce point, la station de Bou Ismaïl est équipée de systèmes de récupération d'énergie de type ERI (Energy Recovery Device).

➤ Caractéristiques des dispositifs ERI :

- **Type : échangeur de pression à chambre isobare**
- **Nombre par ligne : 2**
- **Débit géré par ERI : 63,6 m³/h**
- **Rendement énergétique : ≥ 95 %**

Le principe est simple : la saumure sous pression, issue du rejet de l'osmose, transmet son énergie à l'eau brute entrante à travers l'ERI. Cette énergie récupérée permet :

- De soulager les pompes haute pression,

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

- De réduire la taille des pompes booster (qui pressurisent l'eau avant entrée dans l'ERI),
- Et surtout de réduire la consommation énergétique globale de la station.

Les pompes booster associées (4 unités) assurent un débit de **126 m³/h à 3 bars**, avec démarrage via variateur de fréquence, permettant une régulation dynamique et efficace.



Figure III.15 : Système de récupération d'énergie



Figure III.16 : ER pressure exchanger

Représentation du système de récupération d'énergie installé sur chaque ligne d'osmose inverse. Les échangeurs de pression (ERI) réduisent considérablement la consommation électrique en réutilisant l'énergie de la saumure rejetée.

III.4.5. Post traitement :

Le post-traitement constitue une phase essentielle dans le procédé de dessalement par osmose inverse. En effet, l'eau produite à l'issue de l'osmose est très faiblement minéralisée, ce qui la rend chimiquement instable, corrosive et inadaptée à la consommation humaine directe. De plus, cette eau ne possède aucune barrière biologique résiduelle, ce qui impose une désinfection avant distribution.

Ainsi, le post-traitement a pour finalité de rééquilibrer les paramètres physico-chimiques de l'eau osmosée afin de la rendre conforme aux exigences de la potabilité. Il comprend principalement trois étapes successives :

- La reminéralisation, destinée à augmenter l'alcalinité de l'eau et à stabiliser son pH,
- La désinfection finale, assurée par injection contrôlée d'hypochlorite de sodium,
- Et enfin, le stockage suivi du pompage vers les réseaux de distribution.

Ces opérations permettent de garantir une qualité d'eau stable, sûre et conforme aux normes en vigueur, tout en assurant la pérennité des réseaux de transport et de stockage.

III.4.5.1. Reminéralisation :

L'eau osmosée est trop pure pour être distribuée sans correction. Elle est donc reminéralisée à l'aide de lait de chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Un silo de **45 m³** alimente une cuve de **1000 L**, et la solution est injectée via 2 + 1 pompes doseuses à un débit de **25 m³/h**. Le temps de rétention dans le saturateur est de 90 minutes et la dose moyenne est de **50 mg/L**. Cette correction chimique permet de **stabiliser l'eau** et de **réduire son pouvoir corrosif**, tout en apportant une dureté minimale nécessaire pour préserver les réseaux de distribution. L'augmentation de l'alcalinité permet également de former un film protecteur à l'intérieur des canalisations, limitant ainsi les phénomènes de corrosion interne.

Objectifs :

- Remonter le pH entre **7,5 et 8,5**
- Augmenter l'alcalinité
- Apporter une dureté résiduelle stable à l'eau



Figure IV.17 : Système dosage de lait de chaux

La figure présente le système de dosage du lait de chaux utilisé lors de l'étape de reminéralisation, pour ajuster le pH de l'eau osmosée et de lui conférer une dureté résiduelle conforme aux normes de potabilité.

II.4.5.2. Désinfection finale (chloration) :

Après reminéralisation, une chloration finale est réalisée pour garantir la qualité microbiologique de l'eau. Le produit utilisé est l'hypochlorite de sodium (**NaClO**). Elle joue le rôle de barrière sanitaire indispensable, en empêchant toute contamination secondaire dans les réseaux.

Le système de chloration assure une désinfection continue avec une dose de 1 ppm. Il comprend deux pompes principales et une de secours, deux cuves en PE de 500 L chacune, ainsi qu'un capteur de chlore libre en ligne pour le contrôle au niveau du réservoir.

III.4.5.3. Stockage et pompage de l'eau traitée :

L'eau traitée est stockée dans un réservoir de **70 m³**, construit en génie civil. Elle est ensuite pompée vers le réseau à l'aide de 3 pompes centrifuges (2 en service, 1 en secours), chacune avec un débit de **250 m³/h à 13,5 bars**. Ce stockage tampon permet de réguler le débit, d'absorber les variations de demande, et de garantir une alimentation continue en eau potable pour les populations concernées.

Éléments de sécurité : Vannes d'isolement, clapets anti-retour et joints de démontage.



Figure III.18 : Bassin de stockage d'eau traitée et dosage NaClO

Le bassin de stockage de l'eau dessalée, situé en aval des étapes de reminéralisation et de désinfection finale. Ce réservoir joue un rôle de tampon hydraulique entre la production continue de l'usine et les besoins variables du réseau de distribution. Il permet non seulement de garantir

Chapitre III : Présentation de la région et de la station

une réserve suffisante pour répondre aux fluctuations de la demande, mais aussi d'assurer la stabilité et la continuité de l'alimentation en eau potable.



Figure III.19 : Bassin de saumure

Le bassin de stockage et de rejet de la saumure produite par le procédé d'osmose inverse. Ce bassin reçoit le concentrat salin sous pression en sortie des membranes et assure sa régulation avant son rejet contrôlé vers le milieu marin. Il joue ainsi un rôle tampon permettant de sécuriser l'exploitation de la station et de limiter l'impact hydraulique sur l'émissaire de rejet en mer.

(La planche 4 présente la conduite de rejet de la station).

III.5. Conclusion :

En conclusion, la présentation de la station de dessalement de Bou Ismaïl a permis d'acquérir une vision d'ensemble sur son organisation, son fonctionnement et ses principaux équipements. Ce chapitre a mis en lumière l'importance de cette infrastructure dans l'approvisionnement en eau potable de la commune de Bousmaïl, à travers une chaîne de traitement qui va du captage de l'eau de mer jusqu'au pompage de l'eau traitée vers les réseaux de distribution.

L'analyse des différentes étapes du procédé, bien que succincte à ce stade, révèle déjà la complexité du système mis en place et son adaptation aux spécificités locales. Toutefois, au regard de la croissance démographique et de la pression croissante sur les ressources, il apparaît nécessaire d'envisager des perspectives d'extension ou de renforcement des capacités de production pour répondre durablement à la demande en eau de la région.

Chapitre IV :

Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

IV.1. Introduction :

Le bon fonctionnement d'une station de dessalement repose sur la maîtrise des paramètres hydrauliques et physico-chimiques de l'eau tout au long du procédé. L'analyse régulière de la qualité de l'eau aux différentes étapes de traitement permet non seulement d'évaluer l'efficacité du prétraitement et des membranes, mais aussi de vérifier la conformité de l'eau produite avec les normes de potabilité. Ces données jouent un rôle fondamental dans la conception, l'optimisation et le suivi des unités de dessalement, en particulier dans les systèmes à osmose inverse.

Dans le cadre de cette étude, une série de mesures a été réalisée sur une période de six mois au niveau de la station de dessalement de Bousmaïl. Les analyses ont porté sur les principaux paramètres physico-chimiques de l'eau, ainsi que sur certaines données hydrauliques (débit, pression), essentielles pour le dimensionnement ultérieur de l'unité d'osmose inverse.

Cette approche permet de suivre l'évolution des paramètres clés tout au long de la chaîne de traitement, tout en tenant compte de la stabilité du fonctionnement de la station en régime continu.

Le présent chapitre a pour objectif d'analyser ces données afin de quantifier les performances du prétraitement et du système membranaire ; évaluer la régularité des conditions hydrauliques et physico-chimiques ; mettre en évidence les tendances et variations mensuelles observées sur la période et poser les bases du dimensionnement technique de l'unité d'osmose inverse, qui sera développé dans le chapitre suivant.

IV.2. Méthodologie de suivi :

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques et hydrauliques de l'eau est une étape essentielle pour évaluer la performance d'une station de dessalement. Elle permet d'identifier les variations dans la qualité de l'eau, de contrôler l'efficacité des différentes étapes de traitement, et de fournir les bases nécessaires pour le dimensionnement de l'unité d'osmose inverse. La présente section décrit la stratégie de collecte, de traitement et d'analyse des données appliquée dans cette étude.

IV.2.1. Collecte des données et période de mesure :

Pour l'analyse des paramètres **physico-chimiques**, plusieurs visites ont été effectuées à la station de dessalement de Bousmaïl afin de collecter les données nécessaires. Les relevés ont été réalisés quotidiennement sur une période de six mois d'exploitation, couvrant les mois de novembre et décembre 2022, ainsi que janvier, février, mars et avril 2023, soit un total de 181 jours d'observation. Cette durée permet d'observer les variations de la qualité de l'eau sur une plage temporelle significative, incluant des conditions climatiques hivernales et de début de printemps. Les mesures, issues soit de capteurs en ligne, soit d'analyses de laboratoire selon le paramètre considéré, garantissent une bonne fiabilité des résultats. L'ensemble des données a ensuite été organisé par mois pour chaque type d'eau. Pour chaque paramètre étudié, les valeurs mensuelles ont été traitées statistiquement afin d'en extraire les indicateurs suivants : moyenne, minimum,

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

maximum et écart-type. Cette organisation facilite l'analyse temporelle et la comparaison entre les différentes étapes de traitement.

Concernant l'étude des **débits et de la production**, l'analyse a porté sur trois périodes distinctes : décembre 2022 – janvier 2023 (62 jours), mars – avril 2023 (61 jours) et mars – avril 2025 (61 jours), soit un total de 184 jours d'observation. Les données collectées présentent des discontinuités liées à la disponibilité variable des enregistrements, mais elles demeurent représentatives du fonctionnement global de la station.

IV.2.2. Points de prélèvement retenus :

Parmi les différents emplacements de mesure disponibles dans la station, trois points clés ont été retenus pour l'analyse :

- **Eau brute** : il s'agit de l'eau de mer captée en amont de toute unité de traitement. Son analyse permet de caractériser les conditions initiales du traitement.
- **Eau décantée** : cette eau a subi les étapes de prétraitement physique et physico-chimique, notamment la coagulation-floculation suivie de la décantation lamellaire. Elle constitue l'eau alimentant les unités de filtration.
- **Eau traitée** : il s'agit de l'eau produite par l'unité d'osmose inverse, après post-traitement (reminéralisation, désinfection). Bien qu'aucune heure de prélèvement ne soit précisée, les données sont considérées comme représentatives du fonctionnement continu de la station.

Ce choix permet d'évaluer l'évolution des paramètres de qualité à travers les principaux traitements appliqués à l'eau.

IV.2.3. Paramètres étudiés :

Les paramètres étudiés sont regroupés en deux catégories : physico-chimiques et hydrauliques. Chacun de ces paramètres est brièvement défini ci-dessous :

IV.2.3.1. Paramètres physico-chimiques :

- **pH** : indicateur du caractère acide ou basique de l'eau ; plage optimale pour les membranes entre 6 et 8,5.
- **Turbidité (NTU)** : reflète la présence de particules en suspension ; doit rester faible pour protéger les membranes.
- **Conductivité (mS/cm)** : directement liée à la concentration en sels dissous (TDS) et à la salinité de l'eau.
- **Température (°C)** : influence la viscosité, la solubilité des gaz et le rendement membranaire.
- **Chlore libre (ppm)** : utilisé pour la désinfection, mais doit être éliminé avant l'OI afin d'éviter la dégradation des membranes.

IV.2.3.2. Paramètres hydrauliques :

- **Débit (m³/h)** : mesure la capacité de traitement et le bon fonctionnement des pompes.
- **Pression (bar)** : force motrice de la séparation membranaire, mais constitue également un facteur énergétique majeur.

IV.2.4. Traitement des données :

Afin d'obtenir une analyse claire et synthétique des résultats, les données ont été regroupées par mois pour chaque paramètre et pour chaque type d'eau (brute, décantée, traitée).

Pour chaque série de mesures mensuelles, les indicateurs statistiques suivants ont été calculés :

- **La moyenne mensuelle** : représente la tendance générale du paramètre au cours du mois.
- **Le minimum et le maximum** : permettent de cerner l'intervalle de variation du paramètre.
- **L'écart-type** : mesure la dispersion des valeurs autour de la moyenne. Un écart-type faible indique une bonne stabilité du paramètre.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux synthétiques, avec un tableau par paramètre et par type d'eau. Cette organisation facilite l'analyse comparative et la détection d'éventuelles irrégularités dans le fonctionnement du système.

IV.3. Présentation statistique des données mesurées :

Cette présentation vise à dégager les tendances mensuelles, à évaluer la stabilité du fonctionnement de la station et à apprécier l'efficacité du prétraitement ainsi que la qualité finale de l'eau dessalée.

IV.3.1. Paramètres physico-chimiques :

IV.3.1.1. pH :

Le pH est un paramètre clé du traitement de l'eau, influençant la coagulation, la solubilité des sels et l'efficacité des membranes d'osmose inverse. En dessalement, il doit être maintenu dans une plage optimale (6 à 8,5) afin d'assurer la stabilité chimique, l'efficacité des réactifs et la protection des membranes. Des écarts importants peuvent altérer leurs performances ou accélérer leur encrassement.

a) pH de l'eau brute et de l'eau décantée :

Les mesures effectuées sur une période de six mois montrent que le pH de l'eau brute et de l'eau décantée demeure pratiquement identique. Le tableau ci-dessous présente les valeurs mensuelles observées.

Tableau IV.1 : Valeurs statistiques du pH de l'eau brute et l'eau décantée.

Mois	Ph (Moyenne)	pH (Min)	pH (Max)	pH (Écart-type)
Du mois Novembre 2022 jusqu'à Avril 2023	8.15	8.1	8.2	0.05

Analyse des résultats :

Les mesures du pH de l'eau brute et de l'eau décantée sur une période de six mois révèlent une stabilité remarquable, témoignant de l'absence d'altération tout au long du prétraitement. Cette

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

constance s'explique par le fait que le procédé mis en œuvre à la station ne comporte aucune étape de coagulation ni de floculation chimique. Avec un pH naturellement légèrement alcalin (8,0–8,3), la qualité de la ressource et la fiabilité des conditions d'exploitation sont confirmées. Une telle stabilité constitue un avantage pour l'osmose inverse, car elle réduit les besoins en ajustement chimique en amont des membranes, limite les risques d'encrassement ou de dégradation des modules, et facilite le contrôle du procédé.

b) pH de l'eau traitée :

En sortie du système d'osmose inverse, l'eau dessalée est pratiquement exempte de sels minéraux et présente donc un pH naturellement instable. Pour cette raison, un post-traitement de reminéralisation est appliqué afin de corriger son équilibre chimique et garantir sa conformité aux normes de potabilité. L'analyse suivante porte sur les valeurs mensuelles du pH de l'eau traitée, permettant d'évaluer la qualité finale de l'eau produite et l'efficacité du processus de neutralisation.

Tableau IV.2 : Évolution mensuelle du pH de l'eau traitée (nov. 2022 – avr. 2023)

Mois	pH (Moyenne)	pH (Min)	pH (Max)	pH (Écart-type)
Novembre 2022	7.44	7.21	7.8	0.11
Décembre 2022	7.28	7.01	7.42	0.13
Janvier 2023	7.33	7.06	7.5	0.09
Février 2023	7.34	7.08	7.8	0.15
Mars 2023	7.44	7.17	7.82	0.10
Avril 2023	7.53	7.29	8.00	0.14

Analyse des résultats :

Les résultats obtenus révèlent une variation du pH de l'eau traitée comprise entre 7,28 et 7,53 durant la période de novembre 2022 à avril 2023, des valeurs conformes aux recommandations de l'OMS (6,5–8,5). Toutefois, les écarts-types observés, situés entre 0,09 et 0,15, mettent en évidence une légère instabilité du pH en sortie du système. Cette variabilité s'explique principalement par la faible minéralisation du perméat produit par osmose inverse et par les fluctuations d'efficacité du post-traitement de reminéralisation. Néanmoins, les valeurs obtenues demeurent globalement satisfaisantes pour la consommation humaine. Une optimisation du processus de reminéralisation permettrait toutefois d'améliorer la stabilité du pH et d'assurer une meilleure protection du réseau de distribution ainsi qu'une conformité durable aux exigences sanitaires et organoleptiques.

IV.3.1.2. Turbidité :

La turbidité, exprimée en NTU, reflète la présence de particules en suspension dans l'eau et constitue un paramètre essentiel de sa qualité. Une turbidité élevée peut encrasser les membranes, réduire l'efficacité de la désinfection et altérer la qualité de l'eau. Dans les stations de dessalement, elle doit être abaissée à moins de 0,5 NTU avant l'osmose inverse. À Bousmaïl, l'installation s'arrête automatiquement lorsque la turbidité de l'eau brute atteint 20 NTU, afin de prévenir tout risque de colmatage.

a) Turbidité de l'eau brute :

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

La turbidité de l'eau brute représente le niveau de matières en suspension présentes dans l'eau de mer captée avant tout traitement. Les mesures suivantes ont été relevées le matin sur une période de six mois. Elles permettent d'observer les fluctuations naturelles de la qualité de l'eau en fonction des conditions environnementales.

Tableau IV.3 : Évolution mensuelle de la turbidité de l'eau brute

Mois	Moyenne (NTU)	Min (NTU)	Max (NTU)	Écart-type (NTU)
Novembre 2022	3.96	0.82	8.82	2.44
Décembre 2022	2.99	0.82	5.95	2.02
Janvier 2023	3.36	1.02	8.79	2.11
Février 2023	3.44	0.91	5.82	1.38
Mars 2023	2.16	0.89	5.82	1.29
Avril 2023	2.83	0.74	5.4	1.17

Analyse des résultats :

Les résultats de turbidité de l'eau brute révèlent une forte variabilité mensuelle, avec des moyennes comprises entre 2,16 et 3,96 NTU et des pics atteignant 8,82 NTU en novembre 2022. Les écarts-types élevés (1,17 à 2,44 NTU) traduisent une dispersion marquée, liée aux conditions météorologiques, à la remise en suspension des sédiments marins et à la proximité de rejets côtiers. Le mois de novembre se distingue comme la période la plus critique, probablement en raison des perturbations marines saisonnières.

b) Turbidité de l'eau décantée :

Après le passage de l'eau brute dans l'unité de décantation lamellaire, une baisse notable de la turbidité est attendue, grâce à l'élimination partielle des matières en suspension. Cette étape repose sur des mécanismes de sédimentation gravitaire, sans ajout de produits chimiques, puisque la station de Bousmaïl n'utilise pas les coagulants et les floculants.

Les données ci-dessous sont pour l'eau décantée, elles permettent d'évaluer l'efficacité de cette opération physique sur une période de six mois.

Tableau IV.4 : Évolution mensuelle de la turbidité de l'eau décantée

Mois	Moyenne (NTU)	Min (NTU)	Max (NTU)	Écart-type (NTU)
Novembre 2022	1.38	0.51	5.59	0.96
Décembre 2022	1.08	0.47	2.41	0.49
Janvier 2023	2.97	0.79	7.4	1.69
Février 2023	1.55	0.75	3	0.81
Mars 2023	0.99	0.7	1.87	0.28
Avril 2023	1.11	0.65	1.57	0.23

Analyse des résultats :

Les résultats de turbidité après décantation indiquent une nette amélioration par rapport à l'eau

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

brute, avec des moyennes mensuelles comprises entre 0,99 et 2,97 NTU, confirmant l'efficacité du prétraitement physique à la station de Bousmaïl. La décantation lamellaire assure une réduction systématique des particules, même sans coagulants, bien que janvier présente une variabilité élevée due à une qualité d'eau brute dégradée. Malgré des performances globalement stables, certaines valeurs dépassant 1,5–2 NTU justifient l'ajout d'une étape de filtration complémentaire pour garantir une turbidité inférieure à 0,5 NTU en entrée des membranes d'osmose inverse.

c) Turbidité de l'eau traitée :

Les analyses de l'eau produite en sortie du système d'osmose inverse montrent une turbidité nulle (0 NTU) sur toute la période étudiée, confirmant la très haute performance des membranes, capables de retenir à la fois les sels dissous et les particules les plus fines. Ce résultat témoigne d'un prétraitement efficace, d'un fonctionnement stable du système et d'une qualité d'eau conforme aux normes de potabilité en termes de clarté et de pureté.

IV.3.1.3. Conductivité :

La conductivité électrique, exprimée en mS/cm, reflète le degré de minéralisation de l'eau et est directement liée à la concentration en sels dissous (TDS). Dans le dessalement de l'eau de mer, elle constitue un indicateur clé permettant d'évaluer la salinité de l'eau brute, de contrôler l'efficacité du traitement et de vérifier la conformité de l'eau produite aux normes de qualité.

a) Conductivité de l'eau brute et décantée :

Les valeurs de conductivité mesurées à l'entrée de la station (eau brute) et après la décantation (eau décantée) sont identiques, ce qui est tout à fait attendu.

En effet, la décantation lamellaire agit uniquement sur les particules en suspension, sans modifier la composition ionique de l'eau. La charge saline reste donc inchangée.

Afin de comparer les valeurs de conductivité indépendamment des variations saisonnières de température, les mesures brutes ont été corrigées à la température de référence de **25 °C**, conformément à la méthode proposée par **Rodier (1996)**. En effet, la conductivité électrique augmente en moyenne de **1,9 à 2 %** par degré Celsius, du fait de l'accroissement de la mobilité ionique avec la température.

La correction a été réalisée à l'aide de la formule :

$$K_{25} = \frac{K_{mes}}{1 + \alpha (T_{mes} - 25)}$$

Où :

- **K_{mes}** : est la conductivité mesurée à la température réelle **T_{mes}**
- **K₂₅** : est la conductivité ramenée à 25 °C
- **α** : est le coefficient de température, fixé ici à **0,019/°C**.

Ainsi, l'ensemble des valeurs de conductivité a été corrigé à la température de référence de 25 °C, afin de neutraliser l'effet des variations thermiques et d'obtenir des résultats plus représentatifs. Le tableau suivant synthétise cette correction en présentant l'évolution mensuelle de la conductivité à l'entrée de la chaîne de traitement, sur une période de six mois.

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

Tableau IV.5 : Évolution mensuelle de la conductivité de l'eau brute et de l'eau décantée à 25 °C

Mois	Moyenne (mS/cm)	Min (mS/cm)	Max (mS/cm)	Écart-type (mS/cm)
Novembre 2022	56.95	53.52	62.40	2.61
Décembre 2022	59.93	55.48	66.47	2.64
Janvier 2023	65.29	56.17	69.13	2.48
Février 2023	68.75	65.91	71.28	1.72
Mars 2023	68.68	67.16	70.95	1.24
Avril 2023	70.45	68.84	72.01	1.13

Analyse des résultats :

Les résultats de conductivité corrigée à 25 °C, entre novembre 2022 et avril 2023, révèlent une augmentation progressive des valeurs moyennes, passant de 56,95 mS/cm à 70,45 mS/cm, traduisant une salinité croissante liée aux variations saisonnières (évaporation, apports fluviaux, courants marins). Les écarts-types modérés compris entre 1,13 et 2,61 mS/cm indiquent une stabilité globale de la qualité saline malgré quelques fluctuations. Par ailleurs, la similitude entre les mesures de l'eau brute et celles de l'eau décantée confirme que la décantation n'affecte pas la conductivité, conformément aux principes du traitement physique.

b) Conductivité de l'eau traitée :

La conductivité de l'eau traitée constitue un paramètre clé pour évaluer la performance du système d'osmose inverse. Ce procédé assure une forte rétention des sels dissous, entraînant une réduction significative de la conductivité électrique. À la station de Bousmail, les valeurs mesurées sur le perméat sont très faibles et stables.

Le tableau suivant présente l'évolution mensuelle de ce paramètre corrigé à 25 °C sur une période de six mois :

Tableau IV.6 : Évolution mensuelle de la conductivité de l'eau traitée à 25 °C

Mois	Moyenne (mS/cm)	Min (mS/cm)	Max (mS/cm)	Écart-type (mS/cm)
Novembre 2022	0.386	0.354	0.425	0.018
Décembre 2022	0.366	0.314	0.411	0.036
Janvier 2023	0.341	0.312	0.391	0.019
Février 2023	0.355	0.317	0.395	0.018
Mars 2023	0.332	0.311	0.365	0.017
Avril 2023	0.374	0.353	0.395	0.011

Analyse des résultats :

Les résultats de conductivité corrigée à 25 °C, entre novembre 2022 et avril 2023 révèlent une augmentation progressive des valeurs moyennes, passant de 56,95 mS/cm à 70,45 mS/cm, et

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

traduisent une salinité croissante liée aux variations saisonnières (évaporation, apports fluviaux, courants marins). Les écarts-types modérés, compris entre 1,13 et 2,61 mS/cm indiquent une stabilité globale de la qualité saline malgré quelques fluctuations. Par ailleurs, la similitude entre les mesures de l'eau brute et celles de l'eau décantée confirme que la décantation n'affecte pas la conductivité, conformément aux principes du traitement physique.

IV.3.1.4. Température :

La température joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des systèmes d'osmose inverse, car elle influence la viscosité de l'eau, la perméabilité des membranes et le rendement global du procédé. Une température plus élevée améliore le débit de perméat, mais peut aussi accélérer le vieillissement des membranes au-delà d'un certain seuil. Ses variations saisonnières doivent donc être prises en compte lors du dimensionnement et de l'exploitation de l'unité de dessalement.

a) Température de l'eau brute :

Les mesures suivantes ont été relevées sur une période de six mois, permettant d'identifier les variations saisonnières naturelles de la température de l'eau de mer captée à Bousmaïl.

Tableau IV.7 : Variations mensuelles de la température de l'eau brute

Mois	Moyenne (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Écart-type (°C)
Novembre 2022	21.54	18.7	23.6	1.23
Décembre 2022	19.8	17.9	20.1	0.55
Janvier 2023	16.22	14.1	18.3	1.05
Février 2023	16.45	13.4	18.6	1.30
Mars 2023	16.8	14.7	18.5	0.95
Avril 2023	18.3	16.1	20.1	1.00

Analyse des résultats :

Les températures mesurées à l'entrée de la station présentent une variation saisonnière typique du climat méditerranéen, oscillant entre 13,4 °C en février et 23,6 °C en novembre, avec des moyennes mensuelles de 16,2 à 21,5 °C. Les écarts-types faibles à modérés (0,55 à 1,30 °C) indiquent une bonne stabilité thermique du milieu, favorable au fonctionnement régulier des procédés de traitement. Les fluctuations plus marquées en novembre et février reflètent les transitions climatiques saisonnières.

b) Température de l'eau décantée :

Les mesures de température relevées après la décantation présentent des valeurs similaires à celles de l'eau brute. Cela s'explique par le fait que le processus de décantation, étant purement physique et à température ambiante, n'implique aucun échange thermique significatif. La courte durée de séjour de l'eau dans les décanteurs ne suffit pas à provoquer un écart de température mesurable. Par conséquent, aucune variation notable n'a été observée entre l'eau brute et l'eau décantée, ce qui confirme la neutralité thermique du prétraitement.

c) Température de l'eau traitée :

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

L'eau traitée par osmose inverse présente également une température quasi identique à celle de l'eau décantée. Le procédé de séparation membranaire ne génère pas de chaleur ; il fonctionne à température ambiante. Ainsi, la température de l'eau traitée dépend principalement de la température de l'eau d'alimentation, sans transformation thermique durant le processus.

De très légères variations ($< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) peuvent parfois être enregistrées en raison : des pompes haute pression, et de la détente du perméat en sortie de membranes. Mais ces écarts sont négligeables dans le cas de la station de Bousmail.

IV.3.1.5. Chlore libre dans l'eau traitée après désinfection :

Le chlore libre, fraction active du chlore résiduel, constitue un indicateur essentiel de la désinfection dans les réseaux d'eau potable. À la station de Bousmaïl, la chloration en post-traitement garantit une protection microbiologique continue. Sa concentration, maintenue entre 0,2 et 0,6 mg/L, assure une désinfection efficace tout en préservant la qualité de l'eau. Le tableau suivant illustre l'évolution mensuelle du chlore libre résiduel mesuré dans l'eau traitée, permettant d'évaluer la stabilité du traitement et la conformité aux normes de potabilité.

Tableau IV.8 : Les concentrations du chlore libre dans l'eau traitée

Mois	Moyenne (Ppm)	Min (Ppm)	Max (Ppm)	Écart-type (Ppm)
Novembre 2022	0.31	0.12	0.54	0.11
Décembre 2022	0.35	0.17	0.54	0.09
Janvier 2023	0.25	0.15	0.41	0.06
Février 2023	0.37	0.23	0.54	0.07
Mars 2023	0.28	0.19	0.4	0.05
Avril 2023	0.34	0.18	0.54	0.08

Analyse des résultats :

Les résultats montrent que les concentrations en chlore libre dans l'eau traitée demeurent globalement conformes aux normes algériennes (0,2–0,6 mg/L), avec des moyennes mensuelles variant de 0,25 mg/L en janvier à 0,37 mg/L en février. Les valeurs minimales, parfois proches du seuil de sécurité (0,12 mg/L en novembre), et les maximales ($\leq 0,54$ mg/L) indiquent un bon contrôle du processus. Les écarts-types modérés (0,05–0,11 mg/L) reflètent une stabilité satisfaisante du dosage, malgré quelques fluctuations ponctuelles. Globalement, la chloration post-RO est bien maîtrisée, mais une vigilance reste nécessaire pour éviter toute baisse prolongée du chlore libre pouvant affecter la sécurité microbiologique.

IV.3.2. Paramètres hydrauliques :

IV.3.2.1. Pression de fonctionnement :

La station de dessalement de Bousmail utilise un système d'osmose inverse nécessitant une pression de fonctionnement élevée, typique des unités de dessalement d'eau de mer. Les mesures disponibles indiquent une pression comprise entre 62 et 69 bar, en cohérence avec les

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

exigences des membranes utilisées, qui nécessitent généralement une pression supérieure à 60 bar pour surmonter la pression osmotique et garantir un bon rendement. Cette plage de pression est maintenue stable grâce au système de pompage haute pression, afin d'assurer une performance optimale de la séparation membranaire.

IV.3.2.2. Le débit :

Le débit, exprimé en m^3/j , est un indicateur clé de la performance hydraulique d'une station de dessalement. Il dépend de la disponibilité énergétique, de l'état des équipements et de la qualité de l'eau brute. Son suivi statistique permet d'évaluer la production réelle, de contrôler les performances et de détecter d'éventuelles anomalies de fonctionnement. Dans le cadre de cette étude, l'analyse a porté sur trois périodes distinctes : décembre 2022 – janvier 2023 (62 jours), mars – avril 2023 (61 jours) et mars – avril 2025 (61 jours), soit un total de **184 jours** d'observations. Pour chaque mois étudié, les débits journaliers ont été examinés aussi bien par ligne de production qu'au niveau du débit global total. Cette analyse permet de mettre en évidence les variations de fonctionnement, d'identifier les arrêts ou baisses de rendement, et de suivre l'évolution hydraulique de la station dans le temps.

IV.3.2.2.1. Analyse de la production de la station de Bousmail :

L'analyse de la production journalière de la station de dessalement de Bousmail permet d'évaluer son niveau d'exploitation réel par rapport à sa capacité nominale de 10 000 m^3/j . Elle met en évidence les variations de rendement au fil du temps, influencées par les conditions opérationnelles, les interventions techniques et les stratégies d'exploitation. Trois périodes distinctes ont été identifiées afin de mieux comprendre l'évolution des performances de la station.

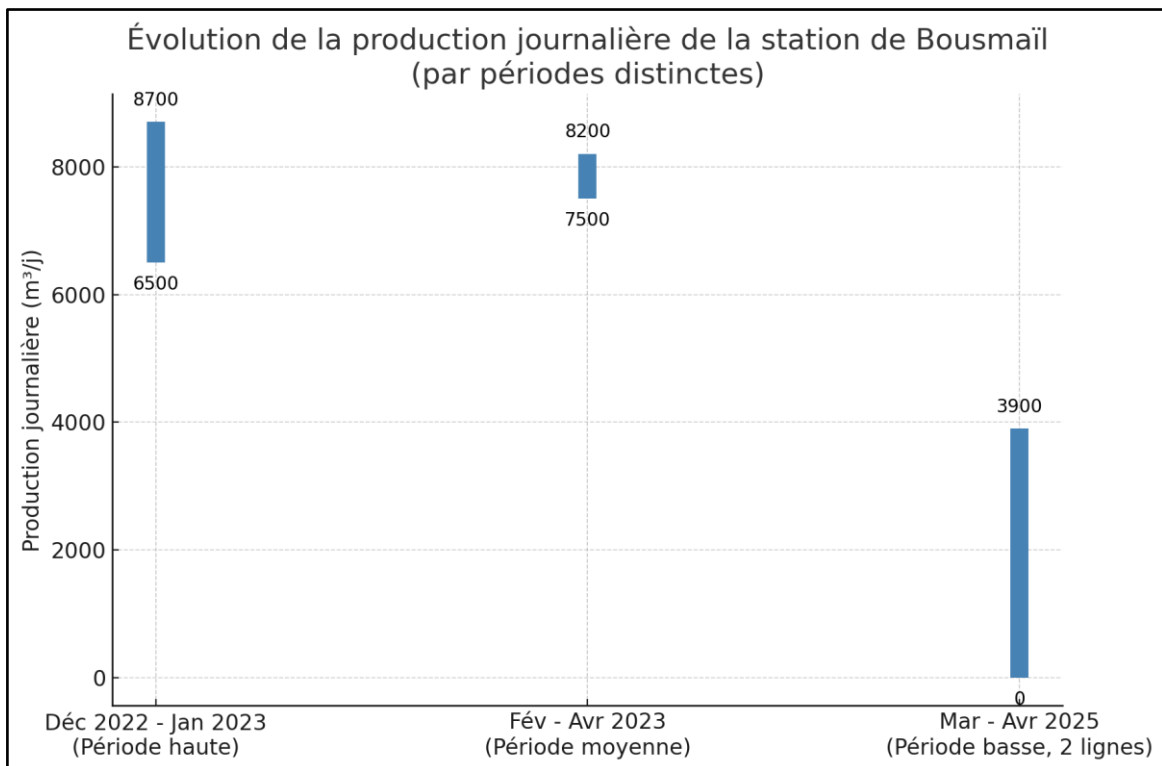


Figure IV.1 : Evolution de la production journalière de la station de Bousmail

Interprétation de l'évolution de la production :

Le graphique illustre clairement l'évolution de la production journalière de la station de dessalement de Bousmaïl sur trois périodes distinctes.

1. **La première période (décembre 2022 – janvier 2023)** correspond à la phase la plus performante, avec des débits compris entre 6 500 et 8 700 m³/j, soit jusqu'à 87 % de la capacité nominale. Malgré quelques arrêts pour maintenance, la production reste globalement élevée et stable.
2. **La deuxième période (février – avril 2023)** présente une légère baisse, la production oscillante entre 7 500 et 8 200 m³/j, traduisant une exploitation régulière mais non optimale (75–82 % de la capacité).
3. **La troisième période (mars – avril 2025)** montre une chute nette de la production, tombant entre 0 et 3 900 m³/j, soit moins de 40 % de la capacité nominale. Cette baisse importante résulte d'une exploitation réduite à seulement deux lignes actives, conjuguée à des contraintes techniques et à des choix opérationnels de sous-utilisation.

Globalement, le graphique met en évidence une tendance à la diminution de la production au fil du temps, passant d'une exploitation quasi nominale à une phase de fonctionnement minimal.

IV.3.2.2.2. Causes de la perturbation de la production :

Au cours des différentes périodes de suivi, la station de dessalement de Bousmaïl a connu plusieurs interruptions et baisses de performance, dues à des causes récurrentes et parfois cumulatives :

- **Opérations de lavage et de rinçage des membranes** : les arrêts temporaires de certaines lignes pour des lavages, rinçages ou CIP ont provoqué des chutes notables de la production. Dans ces cas, les débits journaliers se situaient généralement entre 56 % et 65 % de la capacité nominale, traduisant l'impact direct de ces interventions sur la continuité du fonctionnement.
- **Micro-coupures électriques** : les perturbations du réseau ont entraîné des arrêts soudains ou des baisses brutales de production. Elles se sont traduites soit par des chutes ponctuelles de débit autour de 5 200–5 700 m³/j ($\approx$ 52–57 % de la capacité), soit par des arrêts complets de la station.
- **Anomalies ponctuelles et maintenance planifiée** : certaines baisses isolées sont dues à des dysfonctionnements hydrauliques ou à des interventions de maintenance programmées. Dans ces situations, la production journalière est restée comprise entre 5 600 et 7 400 m³/j ($\approx$ 56–74 %).
- **Sous-productions sévères et arrêts prolongés** : plusieurs journées ont été marquées par des débits inférieurs à 2 500 m³/j ($\approx$ 20–25 % de la capacité), et même parfois en dessous de 1 000 m³/j, correspondant à un fonctionnement quasi nul avec une seule ligne active.
- **Contraintes techniques du réseau de tuyauterie** : lors de la visite technique, il a été constaté que certains coudes de la tuyauterie présentaient des fuites récurrentes. Ces défauts nécessitent des réparations longues et contraignantes, contribuant à maintenir la production dans un régime fortement réduit, ne dépassant pas 40 % de la capacité nominale durant certaines périodes.

En conclusion, la station de Bousmaïl a démontré sa capacité à fonctionner de manière globalement stable et efficace ($\approx$ 80 % du nominal) durant certaines périodes, mais également une forte dépendance à l'état de disponibilité des lignes. Les fluctuations de production observées montrent que la gestion de l'exploitation (arrêts volontaires, maintenance, nettoyages) joue un rôle

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

déterminant dans la performance globale de la station. La station présente également une vulnérabilité liée à l'alimentation électrique, avec un nombre pouvant atteindre jusqu'à 7 micro-coupures par jour, ce qui perturbe le fonctionnement régulier des installations et affecte la continuité de la production.

Cette étude souligne la nécessité d'un contrôle attentif et d'une gestion optimisée de chaque ligne de production, puisque leur disponibilité influence directement la capacité journalière et la fiabilité de l'ensemble de la station.

IV.3.2.2.3. Les effets des micro-coupures électriques :

Les micro-coupures électriques engendrent principalement deux types de perturbations sur les équipements hydrauliques de la station : les coups de bélier et les chocs mécaniques liés aux arrêts brusques. Ces phénomènes compromettent la fiabilité des pompes et des conduites. Le tableau ci-après résume les principaux effets identifiés.

Tableau IV.9 : Phénomènes liés aux micro-coupures électriques et leurs conséquences

Phénomène	Conséquences observées
Coups de bélier hydrauliques	- Sollicitations excessives des pompes, vannes et tuyauteries. - Apparition de microfissures. - Fatigue mécanique cumulative réduisant la durée de vie.
Chocs mécaniques	- Efforts répétés sur l'arbre moteur (torsion, usure, risque de rupture). - Sollicitations directes sur les pompes, vannes et conduites. - Usure accélérée des pièces en mouvement (roulements, joints). - Désalignement progressif pompe/moteur.

IV.4. Solutions générales pour améliorer la performance et la continuité de production :

Afin d'optimiser le fonctionnement de la station de dessalement de Bou Ismaïl et de limiter les perturbations, plusieurs mesures peuvent être envisagées :

- Planifier de manière rationnelle les arrêts de maintenance et de lavage chimique, afin d'éviter l'arrêt simultané de plusieurs lignes.
- Répartir équitablement la charge entre les lignes de production pour limiter l'usure prématurée des membranes.

Chapitre IV : Analyse du fonctionnement hydraulique et de la qualité de l'eau à la station de dessalement de Bousmaïl

- Développer un programme de maintenance préventive et conditionnelle, basé sur des indicateurs opérationnels (perte de charge, turbidité, rétention saline) et sur un suivi en temps réel (capteurs de pression, conductivité, colmatage).
- Mettre en place des dispositifs de reprise progressive et de protection contre les micro-coupures électriques (UPS, variateurs de vitesse, séquences de redémarrage) afin de réduire les chocs hydrauliques et mécaniques sur les équipements.
- Adopter une stratégie d'exploitation progressive permettant d'atteindre plus régulièrement 80–90 % de la capacité nominale.
- Renforcer le système de supervision (SCADA) pour anticiper les anomalies et ajuster rapidement l'exploitation.
- Prévoir un stock spécifique de pièces de rechange adaptées aux caractéristiques techniques de la station, afin d'éviter les interruptions prolongées liées à la difficulté d'approvisionnement.

IV.5. Conclusion :

L'analyse des données recueillies sur une période de six mois a permis de mieux comprendre le comportement de la station de dessalement de Bousmaïl, tant sur le plan de la qualité de l'eau que sur celui de ses performances hydrauliques. Les résultats obtenus révèlent une qualité d'eau relativement stable en amont de l'osmose inverse.

Du point de vue hydraulique, la station a montré une bonne performance durant l'année 2023, avec des débits réguliers et une exploitation homogène des lignes. Toutefois, une dégradation nette est observée en 2025, marquée par des arrêts de lignes, une baisse du débit global et une augmentation de l'instabilité de production. Ces paramètres, à la fois qualitatifs et quantitatifs, sont essentiels pour le dimensionnement de l'unité d'osmose inverse. Ils permettent de fonder les hypothèses techniques sur des données réelles, et d'ajuster les conditions de simulation pour refléter le fonctionnement concret de l'installation.

Ce chapitre constitue ainsi une base solide pour la suite du travail, qui portera sur la modélisation et l'optimisation du système d'osmose inverse.

Chapitre V :
Optimisation du
fonctionnement de la station
de Bousmail

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

V.1. Introduction :

L'optimisation du fonctionnement d'une station de dessalement constitue un enjeu majeur pour garantir une production d'eau conforme aux normes de qualité, tout en limitant les coûts d'exploitation et en préservant la durée de vie des membranes d'osmose inverse. La station de Bou Ismaïl, d'une capacité nominale de 10 000 m³/j, illustre bien ces défis techniques et énergétiques. L'amélioration de ses performances repose sur l'analyse approfondie des paramètres de fonctionnement, notamment le taux de conversion, la pression d'alimentation et la qualité du perméat, afin d'identifier les marges d'optimisation possibles.

Dans cette optique, le logiciel IMSDesign, développé par Hydranautics, est utilisé comme outil de simulation et d'aide à la décision. Il permet de modéliser le comportement du système membranaire, d'évaluer la qualité de l'eau produite et la consommation énergétique selon différents scénarios d'exploitation.

Ce chapitre présentera d'abord les données de base et les conditions de simulation, avant d'analyser les résultats obtenus en termes de débit, de qualité du perméat et de rendement énergétique, puis de proposer des pistes d'ajustement pour améliorer la performance et la durabilité de la station.

V.2. Données de base de la station de Bou Ismaïl :

V.2.1. Conditions environnementales :

Les conditions environnementales représentent les paramètres de base dans lesquels la station de dessalement de Bou Ismaïl fonctionne. Ces paramètres influencent directement les performances du procédé d'osmose inverse, notamment la température qui affecte la viscosité de l'eau et la salinité qui détermine la charge osmotique à franchir par les membranes.

Tableau V.1 : tableau des conditions environnementales de la station

Paramètre	Valeur	Unité
Température de l'eau de mer à dessaler	20	°C
Température ambiante	25	°C
Pression atmosphérique	760	mmHg
Salinité	39640	mg/L
Humidité relative	45-90	%

Ces paramètres correspondent aux conditions environnementales de référence retenues lors de la conception de la station de dessalement de Bou Ismaïl. Ils peuvent fluctuer en pratique, mais constituent la base de dimensionnement des installations.

V.2.2. Qualité de l'eau d'alimentation :

L'eau de mer destinée au traitement par osmose inverse présente une salinité élevée et des concentrations importantes en sels dissous majeurs (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-}). La connaissance précise de sa composition chimique est essentielle pour la simulation, car elle permet de prédire la performance des membranes et le risque de colmatage ou d'entartrage.

Tableau V.2 : Tableau de qualité physico-chimique de l'eau d'alimentation

Paramètre	Unité	Minimum	Moyenne	Maximum
Ph	upH	8,04	8,07	8,10
Ca^{2+}	mg/L	411	451	758
Mg^{2+}	mg/L	1 136	1 227	1 367
Na^+	mg/L	11 133	11 555	11 668
K^+	mg/L	325	353	362
HCO_3^-	mg/L	109	131	134
Cl^-	mg/L	19 156	20 059	20 556
SO_4^{2-}	mg/L	3 648	3869	4095
NO_3^-	mg/L	0	0	0
NO_2^-	mg/L	0,03	0,095	0,155
Fe	mg/L	0	0	0
B	mg/L	5,00	5,00	5,00
F	mg/L	4,40	4,70	4,80
Al	mg/L	1,97	0,93	0,98
Cu	mg/L	0	0.01	0,015
Si	mg/L	0	0	0
Zn	mg/L	0	0	0.035
Mn	mg/L	0	0.025	0,4
As	$\mu\text{g/L}$	0	0	0
Hg	$\mu\text{g/L}$	0	0	0,15
Pb	$\mu\text{g/L}$	4,60	6,25	8,35
Cr	mg/L	0,140	0,145	0,145
Ag	mg/L	0	0.005	0.15
Résidu sec (TDS)	mg/L	37 840	39 640	41 210
Dureté totale	°F	628	656	675
Turbidité	NTU	1.70	4.30	5.90
Température	°C	14	20	29

V.2.3. Exigences de la qualité du perméat :

L'eau produite par la station doit répondre aux normes de potabilité fixées par la réglementation algérienne et internationale. La teneur maximale en sels dissous (TDS) ainsi que la concentration

en bore sont strictement limitées afin de garantir la qualité sanitaire et organoleptique de l'eau distribuée. De plus, le contrôle du pH et de l'indice de Langelier (LSI) est nécessaire pour prévenir la corrosion ou l'entartrage dans le réseau de distribution.

Tableau V.3 : Tableau des exigences de la qualité du perméat

Paramètre	Limite
TDS max	≤ 400 mg/L
Bore max	$\leq 1,2$ mg/L
pH réservoir	7,5 – 8,5
Indice de Langelier (LSI)	-0,2 à +0,2

V.2.4. Configuration du système d'osmose inverse :

La configuration de l'unité d'osmose inverse définit le nombre de lignes, de modules et de membranes nécessaires pour atteindre la capacité nominale de production de la station. Le dimensionnement est réalisé de manière à optimiser la conversion (recovery), la pression appliquée et la qualité du perméat obtenu, tout en respectant les limites de flux perméat imposées par le constructeur des membranes.

Tableau V.4 : Tableau de configuration du système d'osmose inverse

Paramètre	Valeur
Nombre de lignes	4
Nombre de racks par ligne	1
Nombre de tube à pression par ligne	21
Nombre de membranes par tubes à haute pression	8
Nombre total de membranes par ligne	168
Étages	1
Type de membrane	Spirale, polyamide aromatique
Diamètre des membranes	200 mm
Matériau du tube à haute pression	PRFV
Taux de conversion (Recovery)	45 %
Débit produit par ligne	2 500 m ³ /j
Débit d'alimentation par ligne	5640 m ³ /j
Débit alimenté total	22 494,33 m ³ /j
Débit produit total	10 000 m ³ /j
Pression osmotique	29 bar
Pression d'alimentation	66 bar
Débit de rejet total	12 494 m ³ /j
Débit de rejet par ligne	3123,58m ³ /j
Flux moyen de perméat	$\leq 16,0$ l/h/m ²

V.2.5. Système de pompage et récupération d'énergie :

Le système de pompage haute pression et le dispositif de récupération d'énergie constituent des éléments essentiels du procédé. Les pompes haute pression assurent la force motrice nécessaire pour franchir la pression osmotique de l'eau de mer, tandis que les dispositifs de récupération d'énergie (ERI) permettent de réduire considérablement la consommation énergétique globale en valorisant l'énergie contenue dans la saumure rejetée.

Tableau V.5 : Caractéristiques du système de pompage et de récupération d'énergie

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de pompes HP	4	-
Débit unitaire pompe HP	105	m ³ /h
Pression différentielle HP	61	Bar
Rendement du groupe des pompes HP	$\geq 77\%$	-
Puissance moteur	320	kW
Nombre de pompes booster	4	-
Débit unitaire booster	126	m ³ /h
Pression différentielle booster	3,0	Bar
Type d'énergie récupérée	Chambres ERI	-
Nombre de chambres ERI par ligne	2	-
Rendement énergie récupérée	$\geq 95 \%$	-

V.3. Présentation du logiciel IMS-Design :

V.3.1. Le logiciel IMS-Design :

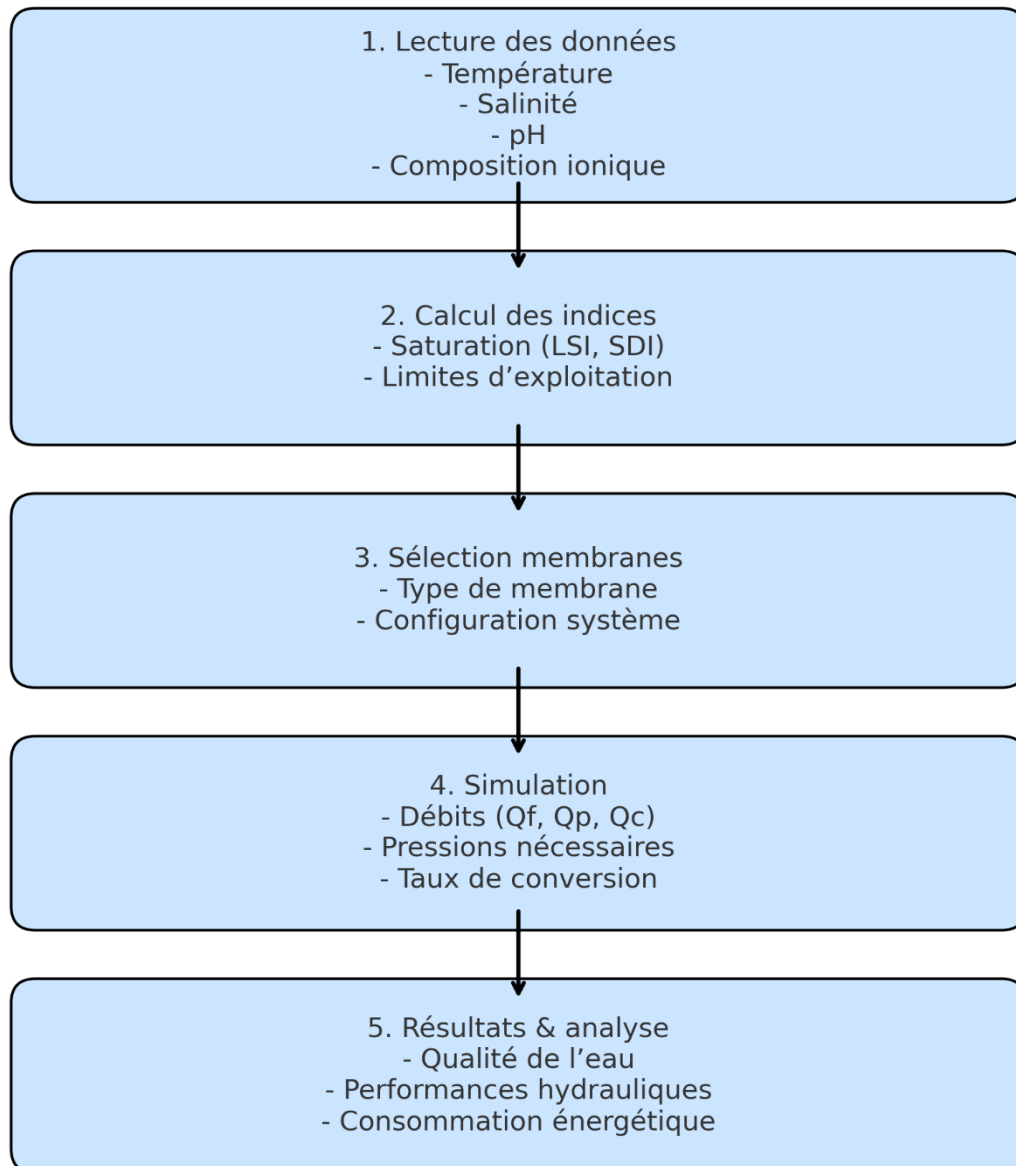
Le logiciel IMSDesign, développé par Hydranautics, est un outil de dimensionnement et d'optimisation des systèmes d'osmose inverse. Il permet d'évaluer les performances hydrauliques, énergétiques et qualitatives d'une installation en fonction des caractéristiques de l'eau brute, des membranes et des conditions d'exploitation. Grâce à ses calculs intégrés (pression osmotique, taux de conversion, qualité du perméat, etc.), il constitue une référence essentielle pour la conception et l'exploitation des stations de dessalement.



Figure V.1 : Interface du logiciel IMS-Design.

Dans le cas particulier de la station de dessalement de Bou Ismaïl, les membranes utilisées appartiennent à la marque Hydranautics, reconnue mondialement pour ses performances en dessalement d'eau de mer. C'est précisément avec le logiciel IMSDesign que le dimensionnement et la vérification du fonctionnement de l'unité d'osmose inverse ont été réalisés, garantissant une conformité avec les normes de qualité exigées et une optimisation du rendement énergétique de la station.

V.3.2. Mode de fonctionnement du logiciel IMSDesign :



V.3.3 Les paramètres de fonctionnement du logiciel :

- **Débit de production (Qp) :**

Le débit de production correspond à la quantité d'eau dessalée (perméat) que l'unité d'osmose inverse est conçue pour fournir. Dans le cadre de la station de Bou Ismaïl, la capacité nominale est fixée à **Qp = 10 000 m³/j**, répartie sur quatre lignes de traitement, soit environ 2 500 m³/j par train.

Cette valeur constitue une consigne de dimensionnement saisie dans le logiciel IMSDesign, qui correspond à l'objectif de production d'eau potable destiné à l'alimentation en eau de la région. À partir de ce paramètre, le logiciel évalue les débits d'alimentation requis et les paramètres hydrauliques associés, en tenant compte de la configuration membranaire et des conditions d'exploitation de la station.

- **Taux de conversion (Recovery) :**

Le taux de conversion représente la fraction du débit d'alimentation qui traverse les membranes sous forme de perméat. Autrement dit, il indique le pourcentage d'eau brute transformé en eau dessalée. Pour la station de Bousmail, ce taux est fixé à **Y= 45 %**, ce qui signifie que sur 100 m³ d'eau de mer alimentée dans l'unité, environ 45 m³ sont convertis en eau douce, tandis que 55 m³ sont rejetés sous forme de concentrat. Ce choix de recovery permet d'assurer un équilibre entre rendement hydraulique, limitation des phénomènes d'entartrage, et préservation de la durée de vie des membranes.

- **Qualité de l'eau produite :**

La qualité du perméat généré par le système est évaluée principalement à travers des paramètres comme le **TDS** (Total Dissolved Solids) et le **pH**, ainsi que par la concentration résiduelle de certains ions spécifiques (Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻, etc.). Pour la station de Bousmail, l'exigence est de garantir une eau dessalée avec une teneur en sels dissous inférieure à **400 mg/L**, un taux de bore inférieur à **1,2 mg/L**, et un pH ajusté dans la plage **7,5 – 8,5** après reminéralisation. Ces critères garantissent la conformité de l'eau produite aux normes de potabilité et assurent sa stabilité lors du stockage et de la distribution.

V.3.4 Les principaux onglets du logiciel IMSDesign :

- **Analyse** : cet onglet permet l'introduction et l'interprétation des données de qualité de l'eau brute afin d'établir une base de calcul fiable.
- **Dimensionnement (Design)** : il assure la configuration des membranes et le choix du schéma hydraulique adapté aux objectifs de production.
- **Calcul (Calculation)** : il fournit une estimation des performances globales de l'unité ainsi que des principaux paramètres de fonctionnement.
- **Post-traitement** : il simule les procédés correctifs et les conditionnements nécessaires pour garantir la conformité de l'eau produite aux normes requises.

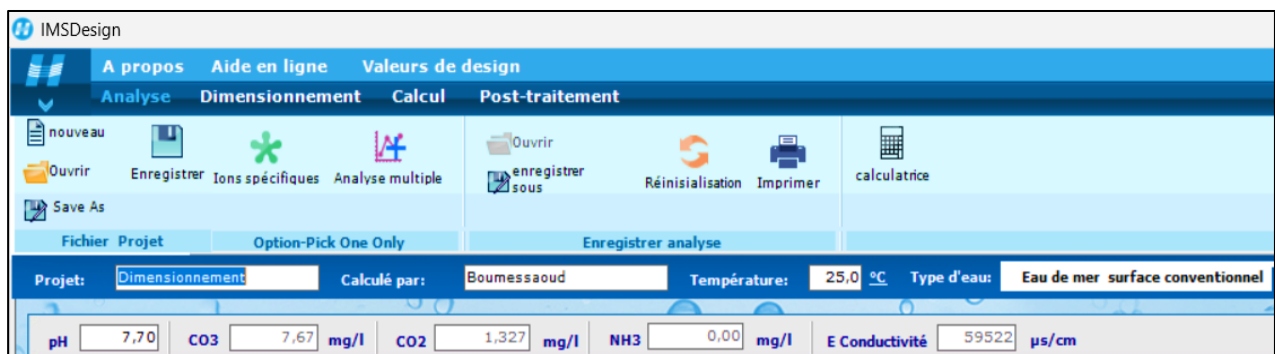


Figure V.2 : fenêtre des différents onglets de logiciel

V.4. Utilisation de la simulation du logiciel pour le dimensionnement et le contrôle du fonctionnement :

La simulation réalisée avec **IMSDesign** permet de reproduire les conditions réelles de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse et d'évaluer ses performances hydrauliques et énergétiques. Cette étape est indispensable pour valider le dimensionnement de la station de Bousmail et pour vérifier la conformité aux critères de qualité de l'eau produite. Nous présentons ci-après, étape par étape, la mise en place d'une simulation sous IMSDesign, chaque phase étant illustrée par des captures d'écran.

V.4.1. Première interface :

Cette étape consiste à introduire dans le logiciel les données issues du rapport d'analyse de l'eau, telles que les concentrations ioniques, le pH, la température, la conductivité électrique ainsi que le type d'eau choisi. Pour la simulation, nous avons retenu les valeurs **maximales** des analyses réalisées à la station de Bousmail, en considérant une température de référence de **25 °C**. Ce choix permet d'évaluer les performances du système dans les conditions les plus contraignantes.

La figure V.3 illustre l'interface correspondante de saisie, où l'ensemble de ces paramètres ont été renseignés afin de constituer la base de calcul pour la modélisation.

The screenshot shows the IMSDesign software interface. At the top, there's a menu bar with 'A propos', 'Aide en ligne', and 'Valeurs de design'. Below it, a toolbar contains icons for 'nouveau', 'Ouvrir', 'Enregistrer', 'Ions spécifiques', 'Analyse multiple', 'Ouvrir sous', 'enregistrer sous', 'Réinitialisation', 'Imprimer', and 'calculatrice'. A status bar at the top right shows 'Fichier', 'Projet', 'Option-Pick One Only', and 'Enregistrer analyse'. The main input area includes fields for 'Projet: Simulation max', 'Calculé par: Romaissa', 'Température: 25.0 °C', 'Type d'eau: Eau saumâtre de forage faible coin', and 'Date: 22/09/2025'. Below these are input fields for 'pH: 8.10', 'CO3: 4.785 mg/l', 'CO2: 1.095 mg/l', 'NH3: 0.00 mg/l', and 'E Conductivité: 60052 µs/cm'. The interface is divided into three main sections: 'Cations', 'Anions', and 'sélectionnez l'analyse'. The 'Cations' section lists Ca, Mg, Na, K, NH4, Ba, and Sr with their concentrations in mg/l and CaCO3. The 'Anions' section lists HC03, SO4, Cl, F, NO3, PO4, SiO2, and B with their concentrations in mg/l and CaCO3. The 'sélectionnez l'analyse' section has a 'Pass1' dropdown and radio buttons for 'brute', 'Alimentation', 'Perméat', and 'Concentrat-1'. At the bottom, there are 'Total, meq/l' fields for cations (666.51) and anions (667.78).

Cations		Anions	
mg/l	mg/l CaCO3	mg/l	mg/l CaCO3
Ca	758.00	HC03	134.00
Mg	1367.00	SO4	4095.00
Na	11668.00	Cl	20556.00
K	362.00	F	4.80
NH4	0.00	NO3	0.00
Ba	0.000	PO4	0.00
Sr	0.000	SiO2	0.00
		B	0.00
Total, meq/l	666.51	Total, meq/l	667.78

Figure V.3 : L'interface de l'étape d'analyse par IMS-Design.

La validation de cette étape repose sur le respect de l'équilibre ionique entre anions et cations, avec une marge d'écart tolérée inférieure à 10 %.

- Par ailleurs, la seconde section de l'interface affiche les résultats générés automatiquement par le logiciel, tels que le TDS et la pression osmotique, comme présenté à la figure V.4.

Saturations	
TDS calculé	38950 mg/l
Pression osmotique	27,8 bar
Ca3(PO4)2 SI	0,00
CCPP	42,22 mg/l
CaSO4	53,9 %
BaSO4	0,0 %
SrSO4	0,0 %
CaF2	781,6 %
silice	0,0 %

Figure V.4 : La 2ème partie de l'étape d'analyse par IMS-Design

Cette interface permet de vérifier la cohérence des données saisies. On remarque que les valeurs calculées par le logiciel (TDS et pression osmotique) sont en concordance avec celles issues des analyses, ce qui confirme la fiabilité des résultats introduits.

V.4.2. La membrane utilisée dans IMSDesign :

Dans le cadre de la simulation, la membrane **Hydranautics SWC4 Max** a été retenue. Ce modèle se distingue par un débit de perméat élevé, une surface active importante ainsi qu'une capacité de rejet de sels supérieure à 99,8 %. Ces propriétés en font une membrane adaptée aux applications de dessalement par osmose inverse à haut rendement. L'utilisation de ce modèle dans le logiciel IMSDesign garantit ainsi la représentativité et la fiabilité des résultats obtenus lors de l'analyse hydraulique et énergétique.

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques techniques de cette membrane.

Tableau V.6 : Les caractéristiques techniques de la membrane SWC4 Max

Paramètre	Membrane de simulation – Hydranautics SWC4 Max
Configuration	Spiralée, polyamide composite
Surface active	40,9 m ² (440 ft ²)
Débit de perméat nominal	27,3 m ³ /j (7200 GPD)
Taux de rejet de sel	≥ 99,8 %
Pression de service maximale	83 bar (1200 psi)
Flux recommandé	8–12 LMH
Conditions de test	32 000 ppm NaCl, 800 psig, 25 °C, récupération 10 %, pH 6,5–7,0

V.4.3. Deuxième interface :

Cette étape consiste à renseigner plusieurs paramètres essentiels du système, tels que le débit de perméat, le taux de conversion, l'âge des membranes, le type de membrane sélectionné, ainsi que le nombre d'étages et de modules nécessaires. Ces éléments sont représentés dans la figure (V.5).

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

The screenshot displays the IMSDesign software interface. At the top, there is a menu bar with options like 'A propos', 'Aide en ligne', and 'Valeurs de design'. Below this is a toolbar with icons for various functions such as 'nouveau', 'Ouvrir', 'Enregistrer', 'mélange perm.', 'pression perm.', 'Hybride', 'ERD', 'Lancer le calcul', 'Schéma flottant', 'Résumé Calc.', 'Imprimer', 'Diagramme des débits', and 'de base', 'partiel', 'Split partiel'. The main workspace is divided into several panels. The 'Trains' panel on the left contains input fields for 'pH alimentation' (8,10), 'Taux de conversion perméat' (45,00%), 'flux / train perméat' (2500,0 m3/d), 'Flux moyen' (15,1 lmh), 'Débit alimentation' (5555,6 m3/d), and 'Débit rejet' (3055,6 m3/d). The 'Produit chimique' panel on the right includes fields for 'Produit chimique' (H2SO4), 'Concentration de la solution, %' (50), 'taux de dosage de produits chimiques' (0,000 mg/l), 'Âge membranes' (5,0 années), 'Perte de flux %, par an' (7,00), 'Coefficient de colmatage' (0,696), and '% d'augmentation par an du passage en sels' (10,0). The 'Système' panel on the far right shows 'Débit de production total de l'usine' (10000,00 m3/d) and 'Nombre de trains' (4). Below these panels is the 'Spécifications du système' section, which includes 'l'étage 1', 'Type d'élément' (SWC4 MAX), 'Éléments / Tube' (21), and 'Nombre de tubes' (21). On the right side of this section, there are controls for 'Etages' (1) and 'Pass1', along with buttons for 'Recalc.' and 'Config.'.

Figure V.5 : L'interface de l'étape de dimensionnement

Cette phase de logiciel donne un débit d'alimentation par ligne de **5 555,6 m³/j**, contre **5 640 m³/j** dans les données contractuelles, soit une différence de **84,4 m³/j** ($\approx 1,5\%$). Le débit de rejet par ligne simulé est **3 055,6 m³/j** contre **3 128,58 m³/j** en données, soit une différence de **72,98 m³/j** ($\approx 2,3\%$). Le débit de perméat reste identique dans les deux cas. Ces légères divergences proviennent principalement des différences causes (propriétés membranaires, arrondis numériques, paramètres ERD et pertes de charge). Un écart inférieur à 3 % est courant et acceptable ; il n'affecte pas la validité globale de l'analyse ni les conclusions sur la performance hydraulique et énergétique de la station.

V.4.4. Les résultats de calcul de simulation:

L'exploitation du logiciel **IMSDesign** a permis de générer les informations essentielles pour l'évaluation des performances hydrauliques et de la qualité de l'eau traitée par l'unité d'osmose inverse de la station de Bousmaïl. Les résultats obtenus portent notamment sur les débits, les pressions de fonctionnement ainsi que sur les caractéristiques de l'eau produite et de la saumure rejetée.

La figure V.6 présente en détail les conditions de cette simulation.

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

Conception de base														
Nom du projet		Simulation max						page : 1/4						
Calculé par		Romaissa						flux / train perméat		2500,0 m3/d				
Débit Pompe HP		231,46 m3/h						le flux total du produit		10000,00 m3/d				
Pression alimentation		66,9 bar						Number of trains		4				
Température alimentation		25,0 °C(77,0°F)						écoulement de l'eau brute / train		5555,6 m3/d				
pH eau alimentation		8,10						Taux de conversion perméat		45,00 %				
Dosage produit chimique,mg/l, -		H2SO4						Age élément		5,0 années				
Energie spécifique		5,81 kwh/m3						Déclin du flux %, par an		7,0				
NDP pass		28,2 bar						Coefficient de colmatage		0,70				
Flux moyen		15,1 l/mh						Perte de flux par an, %		10,0 %				
								Type alimentation		Eau saumâtre de forage faible colmatage				
Pass -	Perm.	Débit / Tube		Flux	DP	Flux	Bêta	pression par étage			Perm.	Elément	Elément	PV# x
Etage	Débit	Alimentation				max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantité	Elem #
	m3/h	m3/h	Conc	l/mh	bar	l/mh		bar	bar	bar	mg/l			
1-1	104,1	11	6,1	15,1	2,2	25,1	1,03	0	0	64,7	207,3	SWC4 MAX	168	21 x 8M

Figure V.6 : Les conditions de simulation

Les résultats issus du calcul de simulation sont présentés dans la figure suivante :

Résultats de calcul

(Flows are per vessel)

Arrangement	Tubes	Alimentation (bar)	Conc (bar)	Alimentation (m3/h)	Conc (m3/h)	Flux (lmh)	flux le plus élevé (lmh)	bêta le plus élevée
1-1	21	66,9	64,7	11,02	6,07	15,1	25,1	1,03

Concentration perméat

Ca	0,053	K	3,032	Sr	0,000	Cl	118,403	P04	0,000	CO2	1,095
Mg	0,096	NH4	0,000	HCO3	1,388	NO3	0,000	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	78,216	Ba	0,000	SO4	5,904	F	0,055	B	0,000	pH	6,3
NH3	0,000									TDS	207,15 mg/l

Saturations et paramètres concentrat

CaSO4, %	114	SrSO4, %	0	Pression osmotique	50,4 bar	pH	8,3
BaSO4, %	0	SiO2, %	0	CCPP	111,74 mg/l	TDS	70602,7 mg/l
Ca3(P04)2 SI	0,00	CaF2, %	7460				

Figure V.7 : les principaux résultats obtenus à l'issue de la simulation

- Le premier tableau présente les paramètres de dimensionnement hydrauliques de l'unité d'osmose inverse. On observe que chaque train est constitué de **21 pressure vessels (PV)**, chacun contenant 8 membranes, soit un total de 168 membranes par train (et 672 membranes pour l'ensemble des 4 trains). Les résultats indiquent une pression d'alimentation de **66,7 bar**, avec une pression en concentrat de **64,7 bar**, correspondant à un débit d'alimentation de **11,02 m³/h** et un débit de concentrat de **6,07 m³/h**. Le flux moyen est de **15,1 LMH**, tandis que le flux le plus élevé atteint **25,1 LMH**, pour un bêta (rapport flux max/flux moyen) de **1,03**, ce qui traduit une bonne homogénéité de répartition du flux au sein du système.
- La concentration en TDS du perméat reste faible (207,15 mg/l), respectant les exigences de qualité de l'eau potable. En revanche, le taux de saturation en CaSO₄ (114 %) et surtout en CaF₂ (7460 %) met en évidence un risque élevé d'entartrage, ce qui justifie la nécessité d'un dosage adéquat d'antiscalant pour prévenir le colmatage des membranes.

La figure (V.8) présente la dose d'anti-scalant nécessaire pour limiter les phénomènes d'entartrage et prévenir la précipitation des sels sur la surface des membranes.

Projet: Dimensionnement		Calculé par: Boumessaoud		Température: 25,0 °C	
Système Pass1					
Débit alimentation, m3/d	5555,6				
Débit perméat, m3/d	2500,0				
Débit total produit, m3/d	2500,0				
Résumé des coûts des produits chimiques					
	Perméat Pass1	Total Produit			
DZD/m3	0,000	0,000			
DZD/kgal	0,000	0,000			
DZD/Mega litres	0,000	0,000			
DZD/Mega usgal	0,000	0,000			
DZD/Mega m3	0,000	0,000			
DZD/Acre.ft	0,000	0,000			
Dosage SMBS alimentation					
Solution concentrat.	%	10,0			
Densité spécifique		1,10			
coût de la solution	DZD/ l de 10% sol.	0,0			
Dose, mg/l	base de 100%	2,5			
Consommation	kg/h	5,8			
Dosage séquestrant alimentation					
Solution concentrat.	%	40,0			
Densité spécifique		1,00			
coût de la solution	DZD/ l de 10% sol.	0,0			
Dose, mg/l	base de 100%	0,7			
Consommation	kg/h	0,4			
NaOCl dosage Alimentation					
Solution concentrat.	%	10,0			
Densité spécifique		1,30			
coût de la solution	DZD/ l de 10% sol.	0,0			
Dose, mg/l	base de 100%	1,0			
Consommation	kg/h	2,3			

Figure V.8 : L'interface des exigences chimiques

Cette interface présente l'estimation des besoins en produits chimiques nécessaires pour le fonctionnement de l'unité d'osmose inverse. Elle indique les débits d'alimentation et de production, ainsi que les dosages de trois additifs essentiels : le SMBS (bisulfite de sodium (NaHSO_3)), utilisé pour éliminer les résidus de chlore libre et protéger la membrane contre l'oxydation ; le séquestrant (anti-scalant), dont le rôle est de prévenir les dépôts et la précipitation des sels à la surface de la membrane ; et enfin le NaOCl (hypochlorite de sodium), qui assure la désinfection de l'eau d'alimentation. L'ensemble de ces paramètres permet de garantir une exploitation durable et sécurisée du système.

VI.4.5. Post traitement :

L'interface de post-traitement permet d'analyser la qualité finale de l'eau produite, obtenue après le mélange de l'eau osmosée avec l'eau filtrée. La figure (V.9) met en évidence les dosages appliqués en hypochlorite de sodium (NaOCl) et en chaux $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, nécessaires respectivement pour la désinfection et la reminéralisation de l'eau avant sa distribution.

Projet: Simulation max Calculé par: Romaissa Température: 25,0 °C Type d'eau: Perméat OI Date: 22/09/2025

pH 11,11 CO3 2,5 mg/l CO2 0,000 mg/l NH3 0,000 mg/l E Conductivité 530,0 µs/cm

Cations		Anions	
	mg/l	mg/l	mg/l CaCO3
Ca	27,08		67,70
Mg	0,10		0,39
Na	78,53		170,71
K	3,03		3,88
NH4	0,00		0,00
Ba	0,000		0,00
Sr	0,000		0,00
Total, meq/l		4,85	

Anions		mg/l CaCO3	
	mg/l	mg/l	mg/l CaCO3
HCO3	0,33		0,27
SO4	5,90		6,15
Cl	118,88		167,67
F	0,06		0,15
NO3	0,00		0,00
PO4	0,00		0,00
SiO2	0,00		0,00
B	0,00		0,00
total, meq/l		3,57	

Post-traitement - Consommation chimique.

		Ca(OH)2
Solution concentr.	%	5,0
Densité spécifique		1,006
coût de la solution	DZD/l	0,0
Dose, mg/l	100 %	50,0
Consommation	kg/h	416,6

Taux de dosage des produits chimiques, mg/l (concentration 100%)

NaOH	NaHCO3	Na2CO3	Ca(OH)2	H2SO4	HCl	CO2	NaOCl
0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Saturations

	mg/l		%
TDS calculé	236,4	CaSO4	0,12
Pression osmotique	0,18 bar	BaSO4	0,00
Ca3(PO4)2 SI	0,00	SrSO4	0,00
CCPP	51,72 mg/l	CaF2	0,01
indice de saturation	0,45 Langelier	silice	0,00

Figure V.9 : L'interface de post traitement

La simulation du post-traitement par IMSDesign montre que l'eau produite présente un TDS d'environ 236 mg/L et une conductivité de 530 µS/cm, indiquant une eau faiblement minéralisée mais conforme aux normes de potabilité. L'analyse ionique révèle des concentrations très faibles en sels dissous qui confirment l'efficacité du dessalement mais signalent une certaine agressivité chimique (LSI ≈ -0,45).

Pour rétablir l'équilibre calco-carbonique, un post-traitement de reminéralisation est recommandé, consistant en l'ajout de Ca(OH)₂ (≈ 50 mg/L) pour renforcer la dureté et de NaOCl (≈ 1 mg/L) pour la désinfection. Ces ajustements stabilisent le pH, limitent la corrosion et garantissent une eau conforme et durablement stable.

La figure ci-dessous illustre le schéma simplifié du procédé d'osmose inverse adopté pour la station de dessalement étudiée, incluant également les principales étapes de post-traitement :

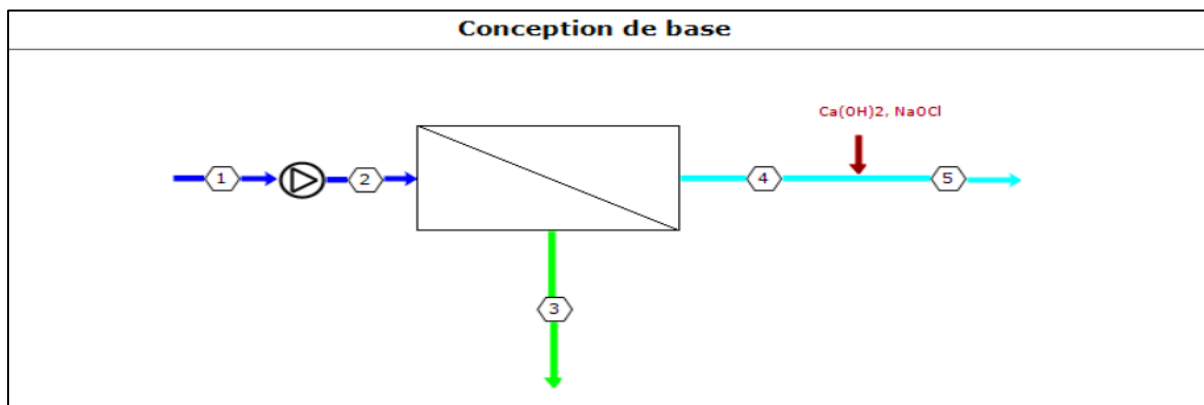


Figure V.10 : Configuration du système d'OI avec la reminéralisation et la chloration finale

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

La figure représente le schéma de base d'une ligne d'osmose inverse utilisé pour le dessalement de l'eau de mer dans le logiciel IMS Design. Elle illustre les différentes étapes du procédé, depuis l'arrivée de l'eau d'alimentation jusqu'au traitement final du perméat. Chaque point numéroté correspond à une étape clé du fonctionnement hydraulique et du post-traitement de l'eau produite.

① → Ligne d'alimentation (Feed water)

Il s'agit de l'eau brute de mer introduite dans le système après les étapes de prétraitement (filtration et conditionnement chimique).

- Débit $\approx 231 \text{ m}^3/\text{h}$, salinité élevée, conductivité $\approx 60052 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$.

② → Pompe haute pression (High Pressure Pump)

Elle a pour rôle d'augmenter la pression de l'eau ($\approx 66.9 \text{ bar}$) afin de dépasser la pression osmotique naturelle de l'eau de mer et permettre son passage à travers les membranes d'osmose inverse.

③ → Concentrat (Brine / Rejet)

C'est la partie de l'eau qui ne traverse pas la membrane. Elle contient la majorité des sels dissous.

- Débit rejet $\approx 127 \text{ m}^3/\text{h}$, conductivité $\approx 105411 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$.

④ → Perméat (Eau dessalée produite)

C'est l'eau obtenue après passage à travers les membranes.

- Débit $\approx 104 \text{ m}^3/\text{h}$, TDS $\approx 207 \text{ mg/L}$, conductivité $\approx 443 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$.

⑤ → Post-traitement (Reminéralisation et désinfection)

Dans la station de Bousmaïl, deux ajouts chimiques sont effectués :

- **Chaux $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$** : utilisée pour reminéraliser l'eau et ajuster son pH ($\approx 7-8$), ce qui limite la corrosion des conduites.
- **Hypochlorite de sodium $[\text{NaOCl}]$** : injecté pour assurer la désinfection finale et garantir la qualité sanitaire de l'eau potable produite.

Tableau V.7 : Les résultats des paramètres de traitement de l'eau par Osmose Inverse

	Eau d'alimentation	Pompe Hp	Rejet	Perméat	Post traitement
Débit (m^3/h)	231	231	127	104	104
Pression (bar)	0	66.9	64.7	0	0
TDS (mg/l)	38950	38950	70603	207	236
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	60052	60052	105411	443	530

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

Le tableau (V.8) présente la qualité de l'eau aux différentes étapes du procédé, notamment l'eau brute, l'eau d'alimentation, le perméat et le concentrat.

Tableau V.8 : Les résultats de la qualité de l'eau à différentes étapes du processus de traitement.

Ion (mg/l)	Eau brute	Eau alimentation	imprégner l'eau	Concentrat-1
Dureté, CaCO ₃	7497,46	7497,46	0,524	13622,6
Ca	758,00	758,00	0,053	1377,3
Mg	1367,00	1367,00	0,096	2483,8
Na	11668,00	11668,00	78,216	21137,0
K	362,00	362,00	3,032	655,3
NH ₄	0,00	0,00	0,000	0,0
Ba	0,000	0,000	0,000	0,0
Sr	0,000	0,000	0,000	0,0
H	0,00	0,00	0,001	0,0
CO ₃	4,78	4,78	0,000	17,4
HCO ₃	134,00	134,00	1,388	233,7
SO ₄	4095,00	4095,00	5,904	7435,9
Cl	20556,00	20556,00	118,404	37253,8
F	4,80	4,80	0,055	8,7
NO ₃	0,00	0,00	0,000	0,0
PO ₄	0,00	0,00	0,000	0,0
OH	0,02	0,02	0,000	0,0
SiO ₂	0,00	0,00	0,000	0,0
B	0,00	0,00	0,000	0,0
CO ₂	1,10	1,10	1,10	1,10
NH ₃	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS	38949,59	38949,59	207,15	70602,70
pH	8,10	8,10	6,29	8,32

L'eau produite par la station de Bousmail présente un TDS de 207.15 mg/L (< 400 mg/L) et un pH ajusté à 6.29, des valeurs conformes aux normes algériennes de potabilité. La qualité obtenue confirme l'efficacité du procédé de dessalement et du post-traitement appliqué dans la station.

V.4.6. Pompage haute pression :

L'alimentation en eau des modules d'osmose inverse est assurée par des pompes haute pression, indispensables pour atteindre la pression nécessaire à la séparation des sels dissous. Ces équipements garantissent un débit constant et stable, permettant ainsi une récupération optimale de l'eau douce et une qualité élevée du perméat.

Les caractéristiques techniques estimées des pompes haute pression de la station de Bou Ismaïl sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau V.9 : Caractéristiques des pompes haute pression de la station de Bou Ismaïl

Paramètre	Valeur
HMT (m)	622 m
Débit nominal par pompe	105 m ³ /h
Pression différentielle booster	3 bar
Puissance hydraulique par pompe	178 kW
Puissance spécifique par pompe (kWh/m ³)	2,39 kWh/m ³
SEC HP (énergie spécifique de pompage)	2,41 kWh/m ³

- Afin de dimensionner l'installation de manière optimale, les calculs de puissance ont été réalisés à l'aide du logiciel. La figure ci-dessous présente les résultats détaillés de cette simulation pour la première étape de pompage, intégrant les données de pression, de débit et les rendements des équipements.

The screenshot displays the 'Calcul de la puissance' (Power Calculation) window in the IMSDesign software. At the top, a header bar contains the project name 'Simulation max', the user 'Romaissa', and the temperature '25,0 °C'. The main area is titled 'Pass1' and contains a table of simulation results. The table lists various parameters such as pump pressure, production and pump flow rates, efficiencies of the pump, motor, and frequency converter, and the resulting power and specific energy consumption. The values are entered into text boxes, with some showing decimal values.

Pass1		
Pression pompe / boost	bar	66,9
Débit production	m3/d	2500,0
Débit de la pompe	m3/d	5555,6
Rendement de la pompe	%	77,0
Rendement du moteur	%	95,0
Rendement variateur de fréquence	%	97,0
Puissance / Etage / Pass	kw	605,1
	BHP	811,1
Puissance totale de pompage	kw	605,1
Energie spécifique de pompage	kwh/m3	5,81

Figure V.11 : Résultats de la simulation de pompage

La figure illustre les résultats obtenus avec IMSDesign, mettant en évidence la puissance de 605.1 kW nécessaire pour le pompage, ainsi que la consommation d'énergie spécifique de 5,81 kWh/m³. Ces valeurs tiennent compte des rendements de la pompe, du moteur et du variateur de fréquence, ce qui permet une évaluation précise de la performance énergétique de l'installation. Il convient toutefois de préciser que ces résultats correspondent à un seul train de production, pour un débit de 2 500 m³/j, soit un quart de la capacité totale de la station.

V.4.7. Échangeur de Pression PX (ERD) :

L'intégration d'un échangeur de pression de type PX (Pressure Exchanger) dans le circuit d'osmose inverse joue un rôle déterminant dans la réduction de la consommation énergétique. Le principe de fonctionnement repose sur la récupération de l'énergie hydraulique contenue dans le concentrat rejeté à haute pression : celle-ci est directement transférée à une partie de l'eau d'alimentation, sans conversion mécanique intermédiaire. Ce mécanisme permet d'alléger significativement la charge des pompes haute pression, tout en garantissant les conditions de fonctionnement nécessaires à la séparation membranaire.

Dans ce qui suit, une simulation a été réalisée avec le logiciel IMSDesign afin de comparer les pressions et la consommation énergétique de la station avant et après l'intégration du PX. Les résultats permettront d'évaluer l'impact de ce dispositif sur l'efficacité énergétique globale de l'installation.

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

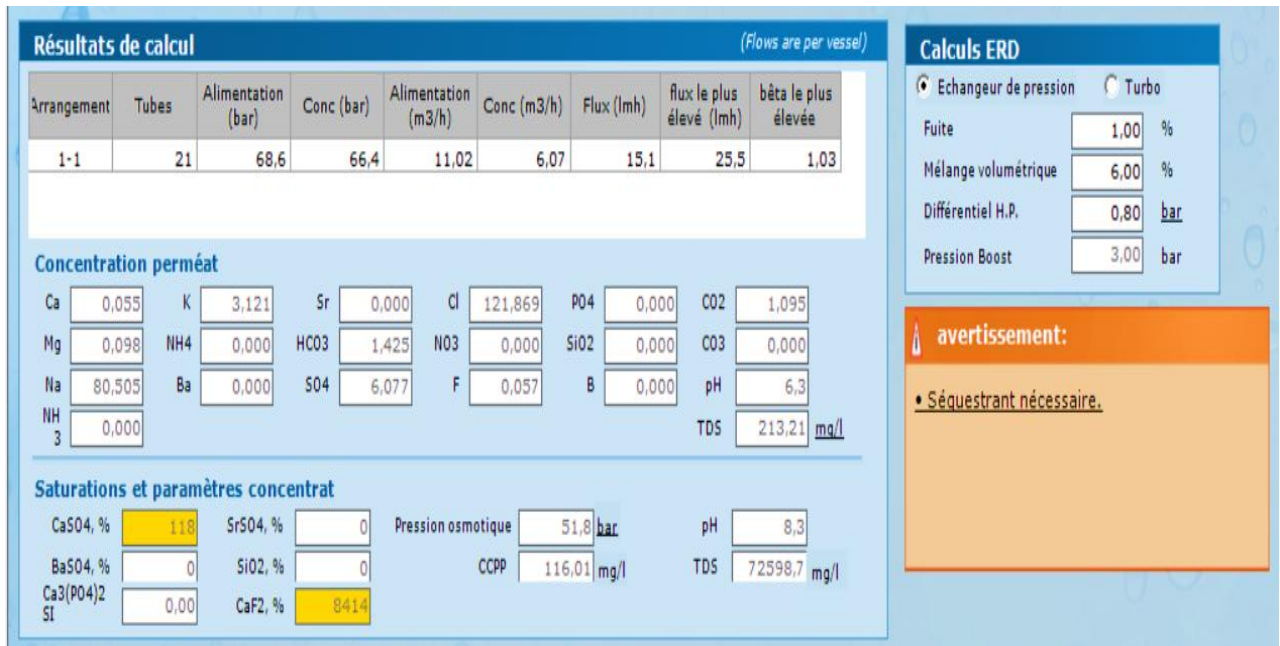


Figure V.12 : Résultats de calcul avec échangeur de pression

La figure ci-dessus présente les résultats de la simulation en ajoutant un récupérateur d'énergie (ERD) au système. En comparant avec les calculs précédents, on constate que la pression d'alimentation passe de **66,9 bar** à **68,6 bar**. L'augmentation de la pression est nécessaire pour compenser les pertes de charge et la pression osmotique dans le système avec ERD. Bien que la pression augmente, l'ERD permet de récupérer l'énergie de la saumure concentrée, ce qui se traduit par une réduction significative de la consommation énergétique globale. La qualité de l'eau produite reste satisfaisante, avec une concentration de TDS légèrement supérieure de **213,12 mg/l**, contre **207,15 mg/l** sans ERD.

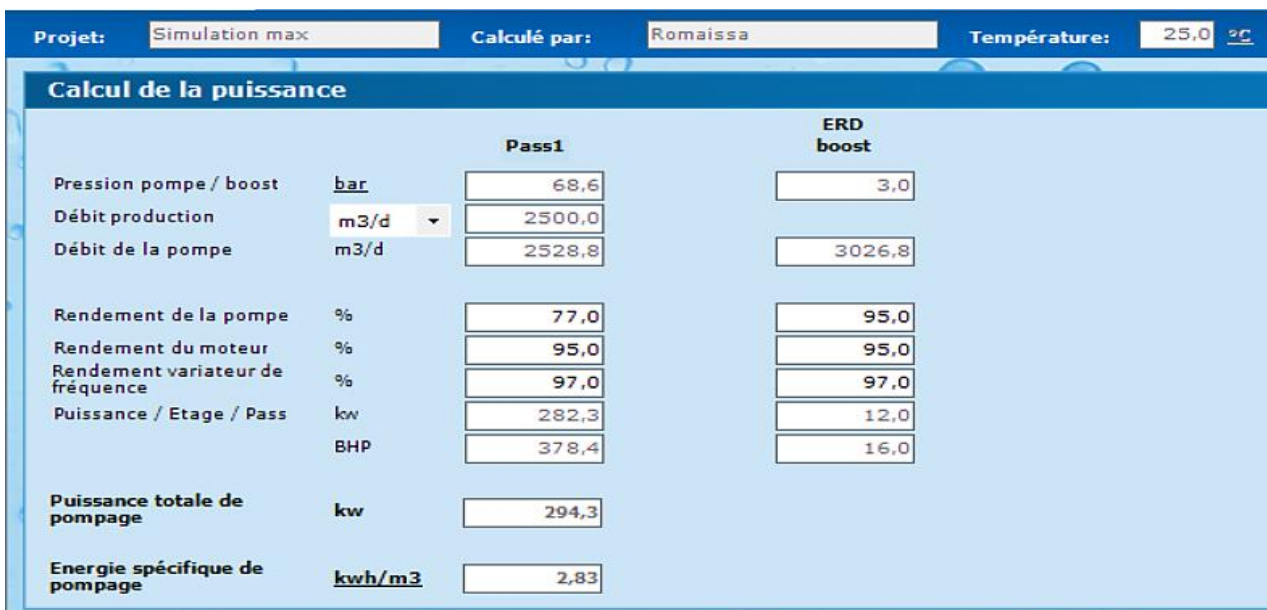


Figure V.13 : Résultats de la simulation de pompage avec ERD

La figure ci-dessus présente le calcul de puissance avec l'intégration d'un récupérateur d'énergie (ERD). La comparaison avec la simulation initiale sans ERD révèle des résultats très positifs. La

puissance totale de pompage chute drastiquement de **605.1 kW** à seulement **294.3 kW**, grâce à la récupération d'énergie par l'ERD. Cette réduction significative de la puissance se traduit directement par une diminution de l'énergie spécifique de pompage, qui passe de **5,81 kWh/m³** à **2,83 kWh/m³**. Cette amélioration de l'efficacité énergétique confirme que l'ERD est un composant essentiel pour optimiser les performances et réduire les coûts d'exploitation de l'installation de dessalement.

Remarque :

L'intégration d'un échangeur de pression (ERD) dans l'unité d'osmose inverse entraîne une augmentation de la pression d'alimentation, ce qui améliore l'efficacité énergétique du procédé. Toutefois, cette configuration rend l'installation plus sensible aux coups de bélier hydrauliques. Il est donc nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection appropriés (soupapes de décharge, réservoirs tampons, séquences de démarrage progressif) afin de préserver l'intégrité des membranes et des équipements sous pression.

V.5. Simulation de l'unité d'osmose inverse à taux de conversion variable et température croissante :

Afin d'approfondir l'évaluation des performances de l'unité d'osmose inverse de la station de Bousmaïl, trois scénarios de simulation ont été considérés, correspondant aux conditions saisonnières de fonctionnement et aux variations observées dans la qualité de l'eau de mer :

- **Cas 1 (période hivernale) :** simulations réalisées à partir des analyses minimales de la station, pour une plage de températures comprise entre 14 et 17 °C. Durant cette période, les précipitations abondantes entraînent une dilution de l'eau de mer, ce qui se traduit par une diminution de la salinité et donc des teneurs plus faibles en sels dissous.
- **Cas 2 (période intermédiaire) :** simulations effectuées avec les valeurs moyennes des analyses, pour des températures comprises entre 18 et 24 °C. Cette période, couvrant les saisons de transition (printemps et automne), reflète des conditions intermédiaires de salinité et de qualité d'eau.
- **Cas 3 (période estivale) :** simulations basées sur les analyses maximales de la station, pour une plage de températures comprise entre 25 et 29 °C. En été, les températures élevées favorisent l'évaporation, ce qui augmente la salinité de l'eau de mer et conduit à des valeurs maximales en sels dissous.

Dans chacun des cas étudiés, le taux de conversion a été progressivement varié entre **45 %** et **50 %**, avec des limites spécifiques selon la simulation, afin d'analyser l'effet combiné de la température et du taux de conversion sur le comportement hydraulique des trains de membranes ainsi que sur la qualité de l'eau produite.

Le logiciel IMSDesign a permis, pour chaque scénario, d'extraire les principaux indicateurs de performance, à savoir la pression d'alimentation, la teneur en sels dissous totaux (TDS) du perméat ainsi que le débit de production. L'analyse comparative de ces résultats met en évidence la sensibilité de l'unité aux variations saisonnières et permet d'identifier les conditions de fonctionnement les plus favorables, tant en termes de qualité de l'eau produite que de sollicitation énergétique des équipements. Il convient de noter que, bien que la tolérance maximale des membranes atteigne 83 bar, la station de Bousmaïl fixe une limite opérationnelle de **72 bar**. Cette marge de sécurité est volontairement adoptée afin de protéger les équipements contre les phénomènes de coups de bélier susceptibles d'entraîner des surpressions ponctuelles.

V.5.1. Simulation des performances de l'unité d'osmose inverse en période hivernale (analyses minimales, 14–17 °C) :

On commence par le premier cas, correspondant à la période hivernale. La figure (V.14) illustre l'interface des résultats de simulation obtenus pour la période hivernale à une température de 14 °C et un taux de conversion de 45%.

Projet: Simulation min Calculé par: Romaissa Température: 14,0 °C Type d'eau:

Trains Pass1

pH alimentation		8,04	Produit chimique	HCl
Taux de conversion perméat	%	45,00	Concentration de la solution, %	50
flux / train perméat,	m3/d	2500,0	taux de dosage de produits chimiques	mg/l
Flux moyen	lmh	15,1	Âge membranes	années
Débit alimentation,	m3/d	5555,6	Perte de flux %, par an	7,00
Débit rejet	m3/d	3055,6	Coefficient de colmatage	0,696
			% d'augmentation par an du passage en sels	10,0

Résultats de calcul (Flows are per vessel)

Arrangement	Tubes	Alimentation (bar)	Conc (bar)	Alimentation (m3/h)	Conc (m3/h)	Flux (lmh)	flux le plus élevé (lmh)	bêta le plus élevée
1-1	21	71,4	69,2	11,02	6,06	15,1	21,7	1,03

Concentration perméat

Ca	0,019	K	1,776	Sr	0,000	Cl	73,693	P04	0,000	CO2	1,235
Mg	0,052	NH4	0,000	HCO3	0,754	NO3	0,000	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	48,674	Ba	0,000	SO4	3,546	F	0,034	B	0,000	pH	6,1
NH3	0,000									TDS	128,55 mg/l

Figure V.14 : Résultats de calcul pour la période hivernale à 14°C.

La figure suivante présente les résultats des différentes simulations effectuées pour cette période.

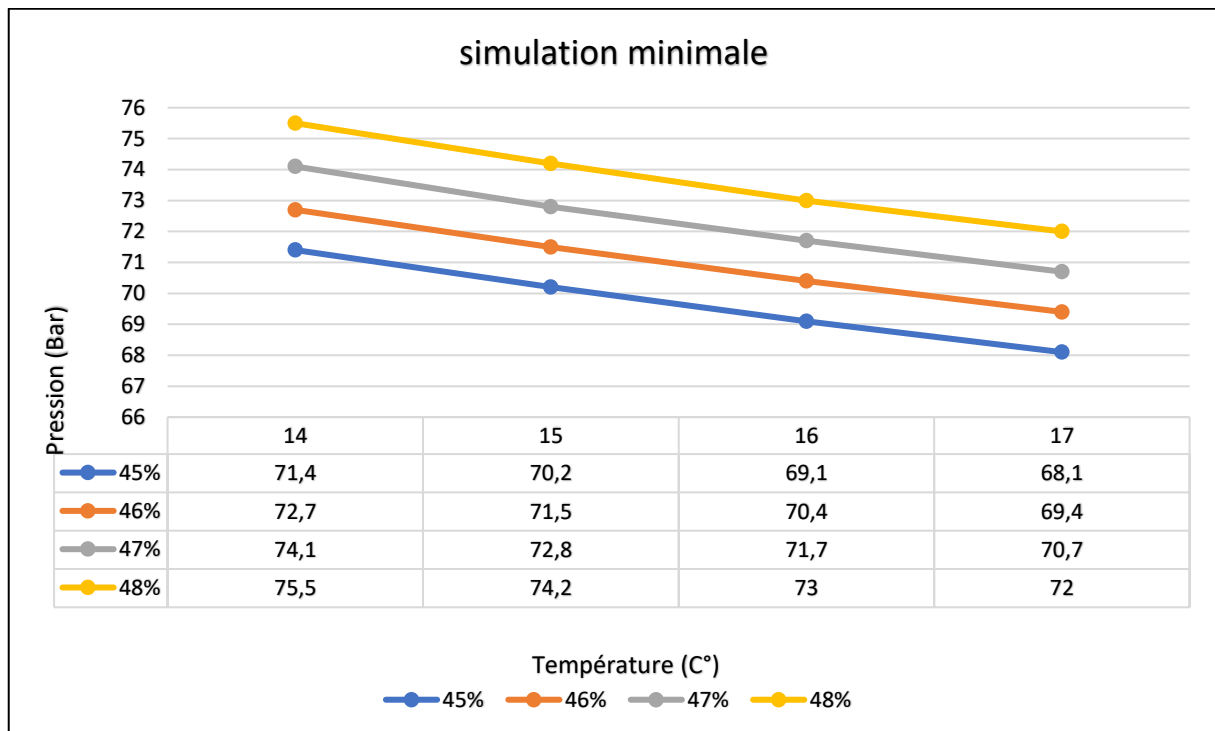


Figure V.15 : Variation de la pression d'alimentation en fonction de la température pour différents taux de conversion (période hivernale)

Discussion des résultats :

L'analyse des résultats de la figure VI.15 met en évidence l'effet combiné de la température et du taux de conversion sur le fonctionnement hivernal de l'unité d'osmose inverse. L'élévation de la température de l'eau d'alimentation (de 14 à 17 °C) réduit progressivement la pression nécessaire au fonctionnement (de 71,4 à 68,1 bar pour Y = 45 %), en raison de la diminution de la viscosité de l'eau. À l'inverse, l'augmentation du taux de conversion (de 45 % à 48 %) provoque une hausse de la pression d'alimentation, traduisant une résistance hydraulique accrue.

En outre, la capacité d'exploitation de la station dépend fortement de la température : à 14 °C, seul un taux de 45 % est possible, tandis qu'à 17 °C, le fonctionnement peut atteindre 48 % sans dépasser la limite de pression recommandée.

V.5.2. Simulation des performances de l'unité d'osmose inverse pour la période intermédiaire (analyses moyennes, 18–24 °C) :

La figure (V.16) illustre l'interface des résultats de simulation obtenus pour la période intermédiaire à une température de 18 °C et un taux de conversion de 45%.

Projet: Simulation moy **Calculé par:** Romaissa **Température:** 18,0 °C **Type d'eau:**

Trains

Pass 1		Pass 1	
pH alimentation		8,07	
Taux de conversion perméat	%	45,00	
flux / train perméat,	m3/d	2500,0	
Flux moyen	lmh	15,2	
Débit alimentation,	m3/d	5555,6	
Débit rejet	m3/d	3055,6	
Produit chimique	HCl		
Concentration de la solution, %		50	
taux de dosage de produits chimiques	mg/l	0,000	
Âge membranes	années	5,0	
Perte de flux %, par an		7,00	
Coefficient de colmatage		0,696	
% d'augmentation par an du passage en sels		10,0	

Résultats de calcul (Flows are per vessel)

Arrangement	Tubes	Alimentation (bar)	Conc (bar)	Alimentation (m3/h)	Conc (m3/h)	Flux (lmh)	flux le plus élevé (lmh)	bêta le plus élevée
1-1	21	69,7	67,4	11,02	6,07	15,1	23,1	1,03

Concentration perméat

Ca	0,025	K	2,300	Sr	0,000	Cl	91,238	P04	0,000	CO2	1,281
Mg	0,067	NH4	0,000	HCO3	1,072	NO3	0,000	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	60,255	Ba	0,000	SO4	4,404	F	0,043	B	0,000	pH	6,2
NH3	0,000									TDS	159,40 mg/l

Figure V.16 : Résultats de calcul de la période intermédiaire à 18 °C

Dans ce deuxième cas, correspondant à la période intermédiaire caractérisée par des températures comprises entre 18 et 24 °C, les simulations ont été réalisées à partir des analyses moyennes de la station de Bousmail. L'objectif est d'évaluer le comportement hydraulique et la qualité de l'eau produite dans des conditions représentatives du fonctionnement en saisons de transition. La figure suivante présente les résultats obtenus.

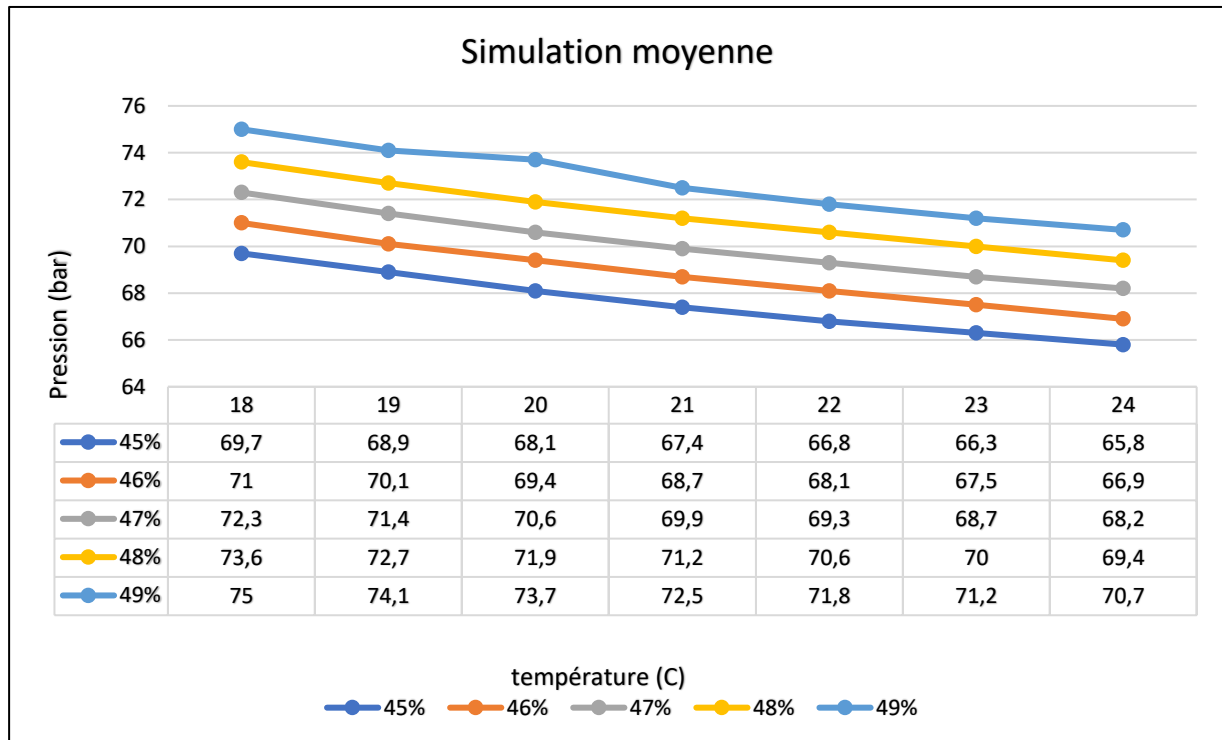


Figure V.17 : Variation de la pression d'alimentation en fonction de la température pour différents taux de conversion (période intermédiaire)

Discussion des résultats :

L'analyse du graphique de la période intermédiaire (18–24 °C) montre que l'élévation de la température de l'eau réduit la pression nécessaire au fonctionnement, tandis que l'augmentation du taux de conversion (Y) entraîne une hausse de cette pression. À 18 °C, la pression varie de 69,7 à 75 bar pour Y = 45–49 %, contre 65,8 à 70,7 bar à 24 °C. La station peut donc fonctionner entre 45 % et 49 % de conversion dans la plage de 20–24 °C, sans dépasser la limite de 72 bar. Cependant, à 18–19 °C, les pressions deviennent proches de cette limite, nécessitant une surveillance accrue.

Remarque : Il est important de rappeler que la station de dessalement de Bou Ismail fonctionne en pratique avec une pression d'alimentation d'environ **66 bar**. À titre de comparaison avec les résultats de simulation, pour une température de 20 °C, la pression de 66 bar correspond à un taux de conversion effectif d'environ **43,5 %**. Cette valeur réelle confirme la tendance observée dans les simulations, tout en soulignant que la station opère avec des marges de sécurité par rapport aux taux de conversion simulés plus élevés.

V.5.3. Simulation des performances de l'unité d'osmose inverse pour la période estivale (analyses maximales, 25–29 °C) :

La figure (V.18) illustre l'interface des résultats de simulation obtenus pour la période estivale à une température de 25 °C et un taux de conversion de 45%.

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

Projet: **Simulation max** Calculé par: **Romaissa** Température: **25,0 °C** Type d'eau: **---**

Trains

Pass1		Pass1	
pH Alimentation		8,10	
Taux de conversion perméat	%	45,00	
flux / train perméat,	m3/d	2500,0	
Flux moyen	lmh	15,2	
Débit alimentation,	m3/d	5555,6	
Débit rejet	m3/d	3055,6	
Produit chimique		H2SO4	
Concentration de la solution, %		50	
taux de dosage de produits chimiques	mg/l	0,000	
Âge membranes	années	5,0	
Perte de flux %, par an		7,00	
Coefficient de colmatage		0,696	
% d'augmentation par an du passage en sels		10,0	

Résultats de calcul (Flows are per vessel)

Arrangement	Tubes	Alimentation (bar)	Conc (bar)	Alimentation (m3/h)	Conc (m3/h)	Flux (lmh)	flux le plus élevé (lmh)	bêta le plus élevée
1-1	21	66,9	64,7	11,02	6,07	15,1	25,1	1,03

Concentration perméat

Ca	0,053	K	3,032	Sr	0,000	Cl	118,403	PO4	0,000	CO2	1,095
Mg	0,096	NH4	0,000	HCO3	1,388	NO3	0,000	SiO2	0,000	CO3	0,000
Na	78,216	Ba	0,000	SO4	5,904	F	0,055	B	0,000	pH	6,3
NH3	0,000									TDS	207,15 mg/l

Figure V.18 : Résultats de calcul de la période estivale à 25 °C

Dans cette dernière série de simulations, les analyses maximales de la station de Bousmaïl ont été retenues afin d'évaluer le comportement de l'unité d'osmose inverse dans les conditions les plus contraignantes, correspondant aux températures élevées de la période estivale (25 à 29 °C). L'objectif est d'examiner l'impact combiné d'une salinité maximale et d'une élévation de température sur la pression d'alimentation requise ainsi que sur la qualité du perméat produit. La figure suivante présente les résultats obtenus.

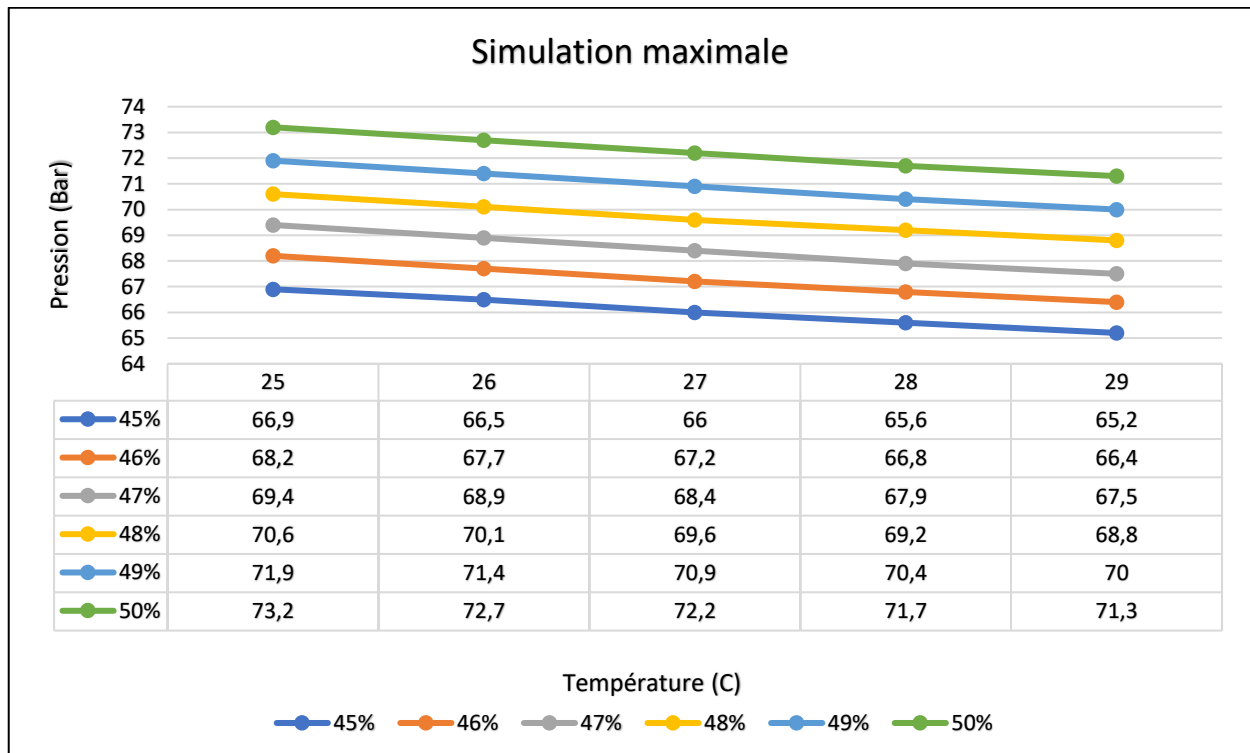


Figure V.19 : Variation de la pression d'alimentation en fonction de la température pour différents taux de conversion (période estivale)

Discussion des résultats :

Les résultats montrent qu'en période estivale (25 à 29 °C), la pression d'alimentation diminue progressivement avec l'augmentation de la température, quelle que soit la valeur du taux de conversion. On constate que, même pour les taux de conversion les plus élevés (49 % et 50 %), la pression reste inférieure à la limite fixée de 72 bar à partir de 27 °C, ce qui rend leur exploitation possible. En revanche, aux températures de 25 et 26 °C, seul le taux de 50 % dépasse la limite et ne peut donc pas être utilisé en pratique.

V.6. Amélioration des performances de la station de dessalement :

Dans cette section, on considère le taux de conversion de référence appliqué par la station de Bousmail, fixé à **43,5 %**, qui correspond aux conditions réelles d'exploitation et garantit la sécurité des membranes ainsi que la protection des équipements. Les résultats de simulation obtenus pour les différents scénarios saisonniers (analyses minimales, moyennes et maximales) permettent d'évaluer l'impact d'une augmentation progressive du taux de conversion (jusqu'à 50 % selon les cas) sur la production d'eau dessalée.

L'amélioration de la performance a été quantifiée en comparant la production correspondant aux taux de conversion simulés avec celle obtenue au taux réel de 43,5 %. Cette comparaison met en évidence le gain relatif en pourcentage de production que la station pourrait atteindre en fonction des conditions de température et de salinité de l'eau d'alimentation.

Tableau V.10 : Évaluation du gain relatif de production en fonction de la température et du taux de conversion

Intervalle de température (°C)	Taux de conversion exploitables	Amélioration relative de la production (%)	Production après augmentation (m ³ /j)
14	45 %	1,5 %	10 000
15	45 – 46 %	2,5 %	10 222,22
16	45 – 47 %	3,5 %	10 444,44
17–19	45 – 48 %	4,5 %	10 666,66
20–26	45 – 49 %	5,5 %	10 888,88
27–29	45 – 50 %	6,5 %	11 111,11

L'analyse du tableau montre une évolution progressive de la production en fonction de la température et du taux de conversion.

À basse température (autour de 14 °C), seule une exploitation à 45 % de conversion est envisageable, avec un gain limité à environ 1,5 %.

Lorsque la température atteint 15 à 16 °C, il devient possible d'augmenter légèrement le taux de conversion (jusqu'à 47 %), entraînant une amélioration comprise entre 2,5 % et 3,5 %. Entre 17 et 19 °C, la station peut fonctionner jusqu'à 48 % de conversion, ce qui se traduit par un gain d'environ 4,5 %.

Pour des températures comprises entre 20 et 26 °C, l'exploitation peut atteindre 49 % de conversion, avec une amélioration relative avoisinant 5,5 %.

Enfin, en période estivale (27 à 29 °C), les conditions thermiques favorables permettent d'atteindre un taux de conversion maximal de 50 %, correspondant à un gain de production estimé à 6,5 %. Ces résultats confirment la nécessité d'ajuster le taux de conversion en fonction des variations saisonnières de température afin d'optimiser la performance de la station tout en préservant la durabilité des équipements.

V.6.1. Estimation de l'amélioration de la production en fonction du taux de conversion :

Afin d'évaluer l'impact de l'augmentation du taux de conversion sur la production journalière de la station de dessalement de Bou Ismail, la relation suivante a été utilisée :

$$Q_{perm} = Q_{alim} \times Y$$

Où :

- **Qperm** : est le débit de perméat (m³/j)
- **Qalim** : est le débit d'alimentation, fixé à **22 222 m³/j**
- **Y** : est le taux de conversion exprimé en fraction.

La production actuelle, correspondant à un taux de conversion de **43,5 %**, est de **9666,4 m³/j**.

Exemple de calcul :

Pour un taux de conversion de **49 %** :

$$Q_{perm} = 22222 \times 0,49 = 10\,888,8 \text{ m}^3/\text{j}$$

Ainsi, on constate que l'augmentation du taux de conversion entraîne un gain de production significatif par rapport à la valeur de référence, ce qui confirme l'intérêt d'optimiser ce paramètre dans les conditions de fonctionnement simulées.

V.6.2. Qualité de l'eau produite :

L'analyse des résultats obtenus à partir des différents scénarios de simulation montre que la teneur en sels dissous totaux (TDS) du perméat demeure toujours inférieure à 300 mg/L, avec des valeurs comprises dans l'intervalle **120–260 mg/L**. Ces concentrations, bien que largement conformes à la norme algérienne de potabilité (**≤ 400 mg/L**), restent relativement faibles et nécessitent, dans certains cas, une reminéralisation afin de garantir un équilibre chimique adapté à la consommation humaine. Ainsi, même en cas d'augmentation du taux de conversion au-delà de la valeur de référence, la qualité de l'eau produite reste conforme aux exigences réglementaires. Cela met en évidence la robustesse du procédé d'osmose inverse utilisé à la station de Bou Ismail, capable de maintenir un niveau de qualité satisfaisant malgré les variations de température et de récupération appliquées lors des simulations.

V.6.3. Estimation de l'augmentation de la consommation énergétique :

L'augmentation du taux de conversion dans une unité d'osmose inverse s'accompagne nécessairement d'une élévation de la pression d'alimentation, ce qui engendre une hausse de la consommation énergétique spécifique. Pour évaluer cette augmentation, il convient de prendre en considération le rendement global de l'ensemble moteur, variateur de fréquence, pompe haute pression.

Dans le cas de la station de dessalement de Bou Ismail, les rendements unitaires sont les suivants :

- **Moteur électrique** : 95 %
- **Variateur de fréquence** : 97 %
- **Pompe haute pression** : 77 %

Le rendement global η_{tot} est obtenu par la relation :

$$\eta_{tot} = \eta_{moteur} \times \eta_{VFD} \times \eta_{pompe}$$

$$\eta_{tot} = 0,95 \times 0,97 \times 0,77 \approx 0,71$$

Ainsi, le rendement global du système est de **71 %**, valeur qui sera utilisée dans le calcul de la consommation énergétique spécifique.

1. La consommation énergétique spécifique (SEC) est exprimée par la relation :

$$SEC_{hyd} (kWh/m^3) = \frac{P(bar) \times 0,02778}{\eta_{tot} \times Y}$$

Avec :

- **P** : la pression appliquée (bar)
 - **0,02778** : facteur de conversion (1 bar $\rightarrow$ kWh·m⁻³)
 - **η_{tot}** : rendement global
 - **Y** : taux de conversion
2. **Différence de consommation énergétique** entre deux pressions (situation de référence P_0 et scénario simulé P_1) :

$$\Delta SEC = \frac{\Delta P \times 0,02778}{\eta_{tot} * Y}$$

Avec : $\Delta P = P_1 - P_0$: écart de pression entre scénario et référence (bar)

3. **Surconsommation énergétique journalière** :

$$\Delta E_j = \Delta SEC \times Q_{perm}$$

Chapitre V : Optimisation du fonctionnement de la station de Bousmail

Avec : Q_{perm} : est le débit de perméat produit (m^3/j)

Et ΔE_j : est la surconsommation énergétique journalière (kWh/j)

4. Surconsommation énergétique annuelle :

$$\Delta E_{an} = \Delta E_j \times 365$$

Où ΔE_{an} : est la surconsommation énergétique annuelle (kWh/an)

5. Surcoût énergétique annuel :

$$\Delta C_{an} = \Delta E_{an} \times P_{elec}$$

Avec : P_{elec} : est le prix de l'électricité (DA/kWh)

Et ΔC_{an} : le surcoût énergétique annuel (DA/an)

6. Surcoût énergétique unitaire (DA/ m^3) :

$$\Delta C_{unit} = \Delta SEC \times P_{elec}$$

Où : ΔC_{unit} : est le surcoût énergétique unitaire (DA/ m^3)

Exemple de calcul (Cas : période estivale, $T = 25^\circ C$, $Y = 49\%$) :

- Pression de référence : $P_0 = 66$ bar
- Pression simulée : $P_1 = 71,9$ bar
- Écart de pression : $\Delta P = 5,9$ bar
- Rendement global : $\eta_{tot} = 0,71$
- Débit d'alimentation : $Q_{lim} = 22\,222$ m^3/j
- Taux de conversion : $Y = 49\%$
- Débit de perméat : $Q_{perm} = 22\,222 \times 0,49 \approx 10\,888,78$ m^3/j

Étapes de calcul :

1. La différence de consommation énergétique (ΔSEC) :

$$\Delta SEC = \frac{5,9 \times 0,02778}{0,71 \times 0,49} \approx 0,471 \text{ kWh}/m^3$$

2. Surconsommation journalière :

$$\Delta E_j = 0,471 \times 10\,888,78 \approx 5\,127 \text{ kWh}/j$$

3. Surconsommation annuelle :

-

$$\Delta E_{an} = 5\,127 \times 365 \approx 1\,871\,000 \text{ kWh}/an$$

4. Surcoût annuel (8 DA/kWh) :

$$\Delta C_{an} = 1\,871\,000 \times 8 \approx 14\,968\,000 \text{ DA/an}$$

5. Surcoût unitaire :

$$\Delta C_{unit} = \Delta SEC \times Pelec \approx 0,471 \times 8 \approx 3,77 \text{ DA/m}^3$$

Ces résultats montrent que l'augmentation du taux de conversion améliore la production mais s'accompagne d'un surcoût énergétique non négligeable. Pour une décision opérationnelle informée, il est nécessaire de comparer ce surcoût aux bénéfices économiques liés à l'augmentation de la quantité d'eau produite (valeur commerciale/évitements d'achat, économies sur délestage, etc.). Par ailleurs, les gains énergétiques potentiels liés à l'intégration d'un ERD doivent être pris en compte : si la récupération d'énergie réduit la puissance effective fournie par les pompes, la surconsommation estimée ci-dessus diminuera en conséquence.

V.7 Conclusion :

L'analyse effectuée dans ce chapitre a permis d'évaluer de manière détaillée les performances de l'unité d'osmose inverse de la station de dessalement de Bou Ismaïl, en tenant compte des variations saisonnières de température et de salinité. Les résultats des simulations montrent que l'augmentation de la température de l'eau d'alimentation entraîne une diminution progressive de la pression nécessaire, facilitant ainsi le passage de l'eau à travers les membranes. Parallèlement, l'élévation du taux de conversion améliore sensiblement la production d'eau dessalée, avec des gains variant de 1,5 % à 6,5 % selon les conditions de fonctionnement. Par ailleurs, la qualité du perméat reste conforme aux normes algériennes de potabilité ($TDS < 400 \text{ mg/L}$), même à des taux de conversion plus élevés, bien que dans certains cas une étape de reminéralisation demeure nécessaire pour stabiliser la qualité finale de l'eau distribuée.

L'optimisation des performances s'accompagne néanmoins d'une augmentation de la consommation énergétique spécifique, en raison de l'accroissement de la pression d'alimentation requise. Cette contrainte met en évidence la nécessité d'un compromis entre amélioration de la production, maîtrise des coûts énergétiques et préservation des équipements, notamment face aux risques liés aux coups de béliet hydrauliques.

Ainsi, ce chapitre met en lumière la fiabilité de l'installation en place, tout en ouvrant des perspectives claires pour renforcer son efficacité opérationnelle à travers une gestion optimale du taux de conversion, une meilleure valorisation énergétique et un contrôle renforcé de la qualité du produit final.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce mémoire a porté sur l'analyse du fonctionnement et des performances de la station de dessalement de Bousmaïl, une unité de capacité moyenne destinée à renforcer l'alimentation en eau potable de la région. Cette installation, basée sur le procédé d'osmose inverse, joue un rôle important dans la diversification des ressources en eau, particulièrement dans un contexte de disponibilité limitée et de variabilité saisonnière. L'objectif principal de ce travail a été d'examiner en détail les performances actuelles de la station et d'évaluer les possibilités d'amélioration de son rendement à travers une approche combinant l'analyse des données réelles et des simulations numériques.

L'étude des paramètres physico-chimiques et hydrauliques, réalisée sur une période de six mois, a mis en évidence l'efficacité du prétraitement ainsi que la conformité de l'eau produite aux normes algériennes de potabilité. Par ailleurs, l'étude a révélé que la régularité de la production de la station est fortement affectée par les micros-coupures électriques, fréquentes sur le site, qui entraînent des arrêts et redémarrages non souhaités des équipements, avec un impact direct sur la continuité du service.

L'exploitation du logiciel IMSDesign a permis de simuler plusieurs scénarios de fonctionnement en variant le taux de conversion et les conditions opératoires. Les simulations ont montré que la qualité du perméat reste satisfaisante ($TDS < 300 \text{ mg/L}$) et conforme aux normes, même avec une augmentation du taux de conversion. Elles ont également mis en évidence un gain de production situé dans un intervalle compris entre 1,5 % et 6,5 %, selon la température et le taux de conversion appliqués. Cependant, ces résultats ont aussi révélé la hausse progressive de la consommation énergétique spécifique, confirmant ainsi l'existence d'un compromis à rechercher entre performance hydraulique et coût énergétique.

En conclusion, bien que la station de Bousmaïl assure une production d'eau dessalée de qualité, plusieurs pistes d'amélioration demeurent possibles, en particulier l'optimisation des paramètres d'exploitation et la gestion des interruptions électriques. Ces éléments constituent des leviers importants pour renforcer la fiabilité et l'efficacité de l'installation dans le contexte actuel de stress hydrique en Algérie.

Références bibliographiques :

- [1] : Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024 : L'eau pour la prospérité et la paix. UNESCO. (2024).
- [2] : L'Algérie inaugure trois nouvelles stations de dessalement. (2025, février). APS
- [3] : AQUASTAT – Base de données par pays : Algérie. FAO. (2023).
- [4] : Programme national de dessalement d'eau de mer. Ministère des Ressources en Eau. (2023). APS.
- [5] : Bilan des capacités de dessalement d'eau de mer en Algérie. (2020). *Hachemi.S.* ResearchGate
- [6] : Lancement des stations monoblocs en 2021–2022. (n.d.). *Algeriainvest.dz*.
- [7] : SEAAL (Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger). (2023), rapport annuel ou communiqué 2023. SEAAL.
- [8] : Étude d'impact environnemental des stations de dessalement. Agence Nationale de Dessalement (ANDE). (2022)
- [9] : Desalination technology selection using multi-criteria evaluation (MCE). Vivekh, P., & Kumar, S. (2017).
- [10] : The Principle of Reverse Osmosis and Nanofiltration. Complete Water Olszak, N. (2020, 7 janvier).
- [11] : Basic Principles of Membrane Technology (2^e éd.). Kluwer Academic Publishers. Mulder, M. (1996).
- [12] : Desalination by reverse osmosis. Desalination. Ali, M., Mubarak, A., & Al-Mutaz, I. (2000).
- [13] : Membrane Technology and Applications (3^e éd.). John Wiley & Sons. Baker, R. W. (2012).
- [14] : AL-OBEIDI, Abdulaziz, et al. *Reverse Osmosis System Components, Design and Application*. In: Desalination and Water Treatment. Taylor & Francis, 2017.
- [15] : *Reverse Osmosis: Industrial Processes and Applications* (2^e éd.). Wiley-Scrivener. Kucera, J. (2015).
- [16] : Tubular membranes. Synder Filtration. (2014).
- [17] : Membrane Clean-in-Place (CIP) Guide for Industrial Aquaporin Inside® RO Membrane Elements. Aquaporin (2024).
- [18] : Cost studies of reverse osmosis desalination plants. Feo-García, J., Pulido-Alonso, A., Florido-Betancor, A., & Florido-Suárez, N. R. (2024).
- [19] : FRISCHKNECHT, Thomas et al. Energy recovery devices in seawater reverse osmosis desalination plants: State of the art and trends. Desalination, 2023.

Annexes :

