

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'hydraulique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en hydraulique
Domaine : Science et technologies
Filière : hydraulique urbaine
Spécialité : hydraulique

Thème

***Etude expérimentale et optimisation des performances du
procédé d'osmose Inverse pour le dessalement d'eau de mer***

Réalisé par :

- 1) Mr. Chelhaoui abdelmoudjib.
- 2) Mr. Azza mohamed.

Devant le jury composé de :

Dr. BEN AICHA	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr. BENCHACORE	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. NEHARI ABDERRAHMANE	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. MESTFAOUI LEILA	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-encadrant

Année Universitaire 2025/2026

*Nous remercions avant tout **DIEU** tout puissant, qui nous a donné la santé, le bénévolat, le courage, et la patience afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant **Dr.Nehari Abderrahmane**, Maître de conférence, classe B, à université d'Ain Témouchent, ainsi qu'à Dr. **Mestfaoui Leïla** pour nous avoir encadrés. Nous les remercions pour leurs précieuses remarques et leurs conseils constructifs, ainsi que pour leur suivi et pour le temps qu'ils nous ont consacré pour mener à terme cette étude.*

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements aux regards des membres de jury, à Dr. **Ben Aïcha** qui nous fait l'honneur de sa présence en acceptant de présider le jury de cette soutenance, ainsi qu'à Dr. **Benchacore** pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Un grand merci à nos **parents**, pour l'intérêt qu'ils ont accordé à notre travail, et plus particulièrement pour leur précieux soutien morale.*

Enfin, nous devons remercier beaucoup toute les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Tout au début, je tiens à remercier Allah de m'avoir donné du courage et de patience afin de réaliser ce travail.

Je dédie ce travail à ma famille qui ma doté d'une éducation digne son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Ma mère Najete mon soutien et Symbole du bonheur

Mon père Mohamed mon premier éducateur et Symbole de donations

J'implore Dieu, tout puissant, de leurs accorder une bonne santé, une Longue vie et beaucoup de bonheurs.

A ma chère sœur

A ma chère grand-mère, pour ses prières précieuses. Que dieu lui accorde une longue et belle vie.

A ma chère encadreuse

Symbole de la continuité Mme Mostefaoui Leïla et Mme Darar Karima

Ingénieure de laboratoire pour son aide précieuse, sa coopération

A mon chère amie Azza Mohamed, je lui souhaite un bon rétablissement, une excellente Santé et une longue vie et leur famille.

ABDELMOUDJIB



Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, en témoignage de ma profonde gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis, leur amour inconditionnel, leur soutien constant ainsi que leurs précieuses prières tout au long de mon parcours universitaire. Que Dieu les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À mon cher frère et à mes chères sœurs, pour leur affection, leurs encouragements permanents et leur soutien moral inestimable.

Je dédie également ce travail à tous mes enseignants de la filière Hydraulique, pour la qualité de leur enseignement, leurs précieux conseils et leur accompagnement tout au long de mon cursus universitaire.

Une pensée toute particulière à mon encadreuse, pour sa disponibilité, son aide précieuse, ses orientations et ses conseils avisés, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

À tous mes amis, pour leur présence, leur amitié sincère et les agréables moments partagés ensemble

Enfin, à tous les étudiants de la filière Hydraulique urbaine, avec qui j'ai eu le plaisir de partager une expérience universitaire riche en apprentissages et en souvenirs inoubliables.

MOHAMED

Résumé

La demande croissante en eau douce, combinée au changement climatique et à l'épuisement des ressources hydriques conventionnelles, a fait du dessalement de l'eau de mer une solution essentielle pour garantir la sécurité hydrique. Parmi les différentes technologies de dessalement, l'osmose inverse (OI) s'est imposée comme la méthode la plus performante et la plus utilisée grâce à son excellent taux de rejet des sels, sa faible consommation d'énergie et sa rentabilité économique.

Cette étude porte sur l'évaluation expérimentale d'un système de dessalement par osmose inverse à l'aide d'une unité pilote de laboratoire. Une étude bibliographique a d'abord été réalisée afin de présenter les principes du dessalement de l'eau de mer, les différentes technologies disponibles, les caractéristiques des membranes, les paramètres de fonctionnement, les mécanismes de colmatage, les avancées technologiques récentes ainsi que la situation du dessalement en Algérie, avec un intérêt particulier pour la station de dessalement de Béni Saf.

L'étude expérimentale avait pour objectif d'évaluer l'influence de la pression transmembranaire et du temps de fonctionnement sur les performances du procédé d'osmose inverse. Les performances du système ont été analysées à travers la production de perméat et le comportement des membranes sous différentes conditions opératoires. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la pression améliore le flux de perméat et l'efficacité du dessalement, tandis qu'un fonctionnement prolongé peut entraîner une diminution des performances en raison du colmatage des membranes et du phénomène de polarisation de concentration.

Ce travail souligne l'importance de l'optimisation des conditions de fonctionnement afin d'améliorer l'efficacité, la productivité et la durabilité des systèmes de dessalement par osmose inverse. Les résultats obtenus contribuent à une meilleure compréhension des procédés membranaires et fournissent des informations utiles pour l'amélioration des technologies de dessalement de l'eau de mer.

Mots-clés : Dessalement de l'eau de mer, Osmose inverse, Membrane, Pression transmembranaire, Flux de perméat, Colmatage, Étude expérimentale.

Abstract

The growing demand for freshwater, combined with climate change and the depletion of conventional water resources, has made seawater desalination an essential solution for ensuring water security. Among the available desalination technologies, reverse osmosis (RO) has emerged as the most efficient and widely adopted process due to its high salt rejection, relatively low energy consumption, and economic feasibility.

The présent study focuses on the experimental evaluation of a reverse osmosis desalination system using a laboratory-scale pilot unit. A comprehensive bibliographic review was first conducted to present the principles of seawater desalination, the different desalination technologies, membrane characteristics, operating parameters, membrane fouling mechanisms, recent technological developments, and the status of desalination in Algeria, with particular emphasis on the Béni Saf desalination plant.

The expérimental investigation aimed to asses the influence of transmembrane pressure and operating time on the performance of the reverse osmosis process. The system performance was evaluated through permeate production and membrane behavior under different operating conditions. The obtained results showed that increasing the operating pressure improves permeate flux and desalination efficiency, while prolonged operation may reduce membrane performance because of fouling and concentration polarization.

This work highlights the importance of optimizing operating conditions to improve the efficiency, productivity, and sustainability of reverse osmosis desalination systems. The findings contribute to a better understanding of membrane-based desalination processes and provide useful guidance for improving the performance of seawater desalination technologies.

Keywords : Seawater desalination, Reverse osmosis, Membrane, Transmembrane pressure, Permeate flux, Fouling, Experimental study.

المخلص

أدى الطلب المتزايد على المياه العذبة، إلى جانب التغيرات المناخية واستنزاف الموارد المائية التقليدية، إلى جعل تحلية مياه البحر حلاً أساسياً لضمان الأمن المائي. ومن بين تقنيات التحلية المختلفة، برزت تقنية التناضح العكسي باعتبارها الأكثر كفاءة والأوسع استخداماً، وذلك بفضل قدرتها العالية على إزالة الأملاح، وانخفاض استهلاكها للطاقة، وجودها الاقتصادي.

تهدف هذه الدراسة إلى التقييم التجريبي لنظام تحلية مياه البحر بالتناضح العكسي باستخدام وحدة تجريبية مخبرية. وقد تم في البداية إجراء دراسة بيبليوغرافية شاملة تناولت مبادئ تحلية مياه البحر، وتقنيات التحلية المختلفة، وخصائص الأغشية، والعوامل التشغيلية، وآليات انسداد الأغشية، وأحدث التطورات في هذا المجال، بالإضافة إلى واقع تحلية مياه البحر في الجزائر مع التركيز على محطة تحلية مياه البحر ببني صاف.

كما هدفت الدراسة التجريبية إلى تقييم تأثير الضغط عبر الغشاء وزمن التشغيل على أداء عملية التناضح العكسي، حيث تم تقييم أداء النظام من خلال إنتاجية الماء المحلى وسلوك الأغشية تحت ظروف تشغيل مختلفة. وأظهرت النتائج أن زيادة الضغط التشغيلي تؤدي إلى تحسين تدفق الماء المحلى ورفع كفاءة التحلية، في حين أن استمرار التشغيل لفترات طويلة قد يؤدي إلى انخفاض أداء الأغشية نتيجة ظاهرة الانسداد والاستقطاب التركيبي.

تؤكد هذه الدراسة أهمية تحسين ظروف التشغيل من أجل رفع كفاءة وإنتاجية واستدامة أنظمة التحلية بالتناضح العكسي، كما تساهم نتائجها في تحسين فهم عمليات الفصل الغشائي وتقديم معطيات علمية تساعد على تطوير تقنيات تحلية مياه البحر.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، التناضح العكسي، الأغشية، الضغط عبر الغشاء، تدفق الماء المحلى، انسداد الأغشية، دراسة تجريبية.

Tables des matières

Tables des matières

Tables des matières.....	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VI
Introduction générale	VIII

Chapitre I

Synthèses bibliographiques

1.Introduction :	4
2.Les ressources en eau et le besoin du dessalement	5
2. 1. Eaux douces de surface :	
2.2 Eaux souterraines :	
2.3. Eau de mer :	
3. Les technologies du dessalement d'eau de mer.....	7
3.1 Les procédés thermiques	8
3.1.1 Distillation flash multi-étagée (MSF)	
3.1.2 Multiple-effet distillation (MED).....	
3.2 Procédé membranaire	
3.2.1 Osmose inverse (OI).....	
3.2.2 Electrodialyse (ED)	
3.3 Comparaison entre les différents procédés de dessalement	11
3.4.Avantages et inconvénients des technologies	12
4. Osmose inverse	13
4.1 .1. Définition de l'osmose inverse	
4.1 .2. La pression osmotique	14
4.2 Le fonctionnement d'une membrane d'osmose inverse	
4.3. Les membranes d'osmose inverse	
4.3.1. Les membranes tubulaires.....	
4.3.2.Les membranes en spirale	
4.3.3. Les membranes en plaques et de cadres.....	
4.3.4. Les membranes fibres creuses	
5. Les paramètres influençant les performances d'un système Osmose inverse	17

5.1. Pression transmembranaire	
5.2. La salinité de l'alimentation	
5.3. La température	
5.4. Le débit.....	
5.5. Le colmatage des membranes.....	
6. Les problèmes techniques rencontrés en dessalement.....	19
6.1. Problèmes d'entartrage	19
6.2. Problèmes de corrosion	19
7. Les progrès dans les technologies membranaires pour le dessalement de l'eau.....	20
7.1. Les nano composites	20
7.2. Les membranes d'osmose inverse antibactérienne.....	21
9. Le dessalement en Algérie	22
9.1. Les stations de dessalement de l'eau de mer existant en Algérie :	23
9.2. Station de dessalement d'eau de mer de béni saf.....	26
10. Conclusion.....	28

Chapitre II

Matériels Et Méthodes

1. Matériel expérimental	31
2. Description de l'unité pilote ROUC	
3.2. Pompe d'alimentation	
3.3. Module membranaire	
3.4. Système d'acquisition des données	
4. Préparation de l'eau d'alimentation.....	
4.1. Prétraitement de l'eau	
4.2. Synthèse de l'eau salée	
5. Procédure expérimentale.....	
5.1. les conditions opératoires fixées pour évaluer les performances de l'installation pilote	
6. La perméabilité de la membrane	
6.1. Détermination de la perméabilité de la membrane	
7. Notes de Calculs :.....	
7.1. La pression osmotique	
7.2. Taux de conversion	
7.3. Perméabilité de la membrane (l/h.m ² .bar)	
7.4. Sélectivité	

7.5.Débit spécifique ou densité du flux volumique	
---	--

Chapitre III

Résultats, interprétations et discussions

1. Introduction :	41
2. Influence des paramètres opératoires sur les performances du système d'osmose inverse	43
2.1 Influence de la pression sur le flux du perméat	51
2.2. Influence de la pression sur le facteur de conversion	
2.3. Influence de la pression sur le flux de perméat	
2.4. Influence du temps de fonctionnement sur le flux	
2.5. Influence de la pression sur le facteur de conversion	
2.6. Analyse des phénomènes de polarisation de concentration	
3. Discussion générale	54
Conclusion générale et perspectives	55
Références bibliographiques	58

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure 1	Carte du stress hydrique en 2020 (Salinas-Rodriguez et al., 2021)	5
Figure 2	Les procédés de dessalement (ecotoxicologie.fr, 2012)	7
Figure 3	Schéma d'une unité MSF (Loirdighi et Assir, 2025)	9
Figure 4	Schéma d'une unité MED (Loirdighi et Assir, 2025)	10
Figure 5	Principe du dessalement par électrodialyse (Abdalla et al., 2023)	11
Figure 6	Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse (Union des entreprises de traitement de l'eau, 2026)	14
Figure 7	Membrane tubulaire (Polymem, 2026)	16
Figure 8	Membranes en spirale (Cieléo, 2023)	16
Figure 9	Membranes à fibres creuses (GS Yuasa Corporation, 2026)	17
Figure 10	Niche du procédé membranaire (Safe Drinking Water Foundation, 2026)	21
Figure 11	Station de dessalement en Algérie (Djeddi M., 2014)	26
Figure 12	L'unité pilote ROUC (Labo hydraulique UAT, 2026)	30
Figure 13	Le réservoir pilote (Labo hydraulique UAT, 2026)	31
Figure 14	La pompe pilote (Labo hydraulique UAT, 2026)	32
Figure 15	Les membranes (Labo hydraulique UAT, 2026)	33
Figure 16	Schéma pilote (Labo hydraulique UAT, 2026)	34
Figure 17	Logiciel PC (Labo hydraulique UAT, 2026)	35
Figure 18	Préparation de la solution (Labo hydraulique UAT, 2026)	36
Figure 19	Graphes de J_p ($m \cdot s^{-1}$) en fonction de la pression P	42
Figure 20	Variation du J_{p1} en fonction du temps pour la pression 12	45
Figure 21	Variation du J_{p2} en fonction du temps pour la pression 22	45
Figure 22	Variation du J_{p3} en fonction du temps pour la pression 28	46
Figure 23	Variation du J_{p4} en fonction du temps pour la pression 35	46
Figure 24	Variation du F_{s1} en fonction du temps pour la pression 12	48
Figure 25	Variation du F_{s2} en fonction du temps pour la pression 22	49
Figure 26	Variation du F_{s3} en fonction du temps pour la pression 28	49
Figure 27	Variation du F_{s4} en fonction du temps pour la pression 35	50

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau 01	Avantages et inconvénients des principaux procédés de dessalement (Loirdighi et Assir, 2025)	12
Tableau 02	Fiche technique et financière de la station de captage et de pompage d'eau de mer (Béni Saf Water Company, 2025)	28
Tableau 03	Conditions opératoires fixées pour évaluer les performances de l'installation pilote	37
Tableau 04	Valeurs de la densité de flux du perméat obtenues à différentes pressions	42
Tableau 05	Évolution du volume de perméat (V_p) et du flux de perméat (J_p) en fonction du temps sous différentes pressions de fonctionnement	44
Tableau 06	Résultats expérimentaux du facteur de conversion (F_s) sous différentes pressions de fonctionnement	47

Liste des abréviations

AEC : Algérien Energie Company

BWC : Béni Saf Water Company

CNT : Carbone Nanotubes (Nanotubes de carbone)

DFME : Distillation Flash Multi-Étagée

ED : électrodialyse

ERI : Energie Recovery Inc. (Système de récupération d'énergie)

GO : Graphene Oxide (Oxyde de graphène)

MED : Multiple Effect Distillation (Distillation Multi-Effets)

MF : Microfiltration

MENA : Middle East and North Africa

MSF : Multi-Stage Flash (Distillation Flash Multi-Étagée)

NaCl : Chlorure de sodium

NF : Nanofiltration

OI : Osmose Inverse

OIEM : Osmose Inverse de l'Eau de Mer

PNIPAm : Poly (N-isopropylacrylamide)

PVA : Polyalcool vinylique

QP : Débit de perméat

Q0 : Débit d'alimentation

RO : Reverse Osmosis (Osmose Inverse)

ROUC : Reverse Osmosis Ultrafiltration Computer Controlled Unit

SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition

SDEM : Station de Dessalement d'Eau de Mer

TDS : Total Dissolved Solids (Solides Dissous Totaux)

TFN : Thin Film Nanocomposite

TR : Taux de rétention

TVC : Thermal Vapor Compression

UF : Ultrafiltration

Ppm : Parties par million (parts per million)

USD/m² : Dollar américain par mètre carré

PNIPAm : poly(N-isopropylacrylamide)

µm :Micromètre

Vp : Volume de perméat

Y : Taux de conversion

cm : Centimètre.

% : Pourcentage.

J-C : Jésus-Christ.

km² : Kilomètre carré.

°C: Degré Celsius.

g : Gramme.

ml : Milliliter.

min : Minute.

km : Kilometer

Introduction générale

Introduction générale

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable à la vie et au développement des sociétés humaines. Elle intervient dans de nombreux domaines tels que l'alimentation, l'agriculture, l'industrie et la production d'énergie. Malgré son abondance apparente sur la planète, les ressources en eau douce exploitables demeurent limitées et inégalement réparties à travers le monde(Tigrineet *al.*, 2023).

Au cours des dernières décennies, la croissance démographique, l'urbanisation accélérée, le développement industriel ainsi que les changements climatiques ont entraîné une augmentation considérable de la demande en eau. Cette situation a accentué la pression sur les ressources hydriques conventionnelles et a conduit plusieurs pays à rechercher des solutions alternatives pour assurer leur approvisionnement en eau potable(Tigrineet *al.*, 2023).

Parmi les solutions adoptées, le dessalement de l'eau de mer s'est imposé comme une option stratégique permettant de répondre aux besoins croissants en eau, notamment dans les régions arides et semi-arides. Grâce aux progrès technologiques réalisés dans ce domaine, plusieurs procédés ont été développés, dont l'osmose inverse qui est aujourd'hui la technique la plus utilisée en raison de son efficacité et de ses performances économiques.

L'Algérie figure parmi les pays confrontés à un stress hydrique important en raison de son climat semi-aride à aride, de l'irrégularité des précipitations et de l'augmentation constante des besoins en eau. Afin de garantir la sécurité hydrique nationale, les autorités algériennes ont adopté une stratégie ambitieuse reposant notamment sur le développement du dessalement de l'eau de mer. Plusieurs stations de dessalement ont ainsi été implantées le long du littoral afin d'assurer l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations et de réduire la dépendance aux ressources conventionnelles (Tigrineet *al.*, 2023).

1. Problématique

Malgré les performances reconnues de l'osmose inverse dans le dessalement de l'eau de mer, plusieurs défis techniques et économiques subsistent. Les performances du procédé dépendent fortement des conditions opératoires telles que la pression de fonctionnement, le débit d'alimentation, la qualité de l'eau brute, la température et le temps d'exploitation. Une mauvaise maîtrise de ces paramètres peut entraîner une diminution du flux de permet, une augmentation de la consommation énergétique, ainsi qu'un colmatage prématuré des membranes.

Introduction générale

Dans ce contexte, il devient essentiel d'étudier l'influence des paramètres de fonctionnement sur les performances des systèmes d'osmose inverse afin d'optimiser leur rendement et de réduire les coûts d'exploitation. La problématique centrale de cette étude peut être formulée comme suit :

Comment les paramètres de fonctionnement, notamment la pression appliquée et la durée de fonctionnement, influencent-ils les performances d'un système de dessalement par osmose inverse, et quelles conditions permettent d'optimiser la production d'eau dessalée tout en limitant les contraintes opérationnelles ?

2. Objectifs de l'étude

Le présent travail a pour objectif principal d'étudier le procédé de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse et d'évaluer l'influence de certains paramètres opératoires sur ses performances.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Présenter les principes fondamentaux du dessalement de l'eau de mer et les différentes technologies utilisées ;
- Décrire le mécanisme de fonctionnement du procédé d'osmose inverse et ses principaux composants ;
- Étudier l'unité expérimentale ROUC intégrant les procédés d'ultrafiltration et d'osmose inverse ;
- Analyser l'influence de la pression de fonctionnement et du temps d'opération sur les performances du système ;
- Évaluer les variations du débit de perméat et du taux de rejet des sels ;
- Identifier les conditions optimales de fonctionnement permettant d'améliorer l'efficacité du procédé.

3. Aperçu du mémoire

Afin de répondre aux objectifs fixés et d'apporter des éléments de réponse à la problématique posée, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Introduction générale

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Ce chapitre présente une synthèse des connaissances relatives aux ressources en eau, à la problématique de la pénurie d'eau et aux différentes techniques de dessalement. Une attention particulière est accordée au procédé d'osmose inverse, à son principe de fonctionnement, aux membranes utilisées ainsi qu'aux paramètres influençant ses performances.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes expérimentales

Ce chapitre décrit l'installation expérimentale utilisée dans le cadre de cette étude, notamment l'unité ROUC associant l'ultrafiltration et l'osmose inverse. Les caractéristiques techniques des équipements, les instruments de mesure ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée sont présentés en détail.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Le troisième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. L'influence de la pression appliquée et de la durée de fonctionnement sur les performances du système d'osmose inverse est étudiée. Les résultats sont discutés en les comparant aux données rapportées dans la littérature afin de dégager les conditions de fonctionnement les plus favorables.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus, met en évidence les apports de l'étude et propose des perspectives de recherche visant à améliorer davantage les performances des procédés de dessalement par osmose inverse.

Chapitre I

Synthèses bibliographiques

1. Introduction :

L'eau potable est une ressource rare et précieuse, car seule une petite partie (environ 2,5 %) de toute l'eau présente sur Terre est propre à la consommation humaine directe. Actuellement, il existe un fort déséquilibre entre l'offre et la demande en eau potable, et environ un quart de la population mondiale est confrontée à une pénurie d'eau économique. De plus, les dernières prévisions statistiques ont révélé qu'environ la moitié de la population mondiale pourrait être soumise à des conditions de stress hydrique d'ici 2030. Le problème de la rareté de l'eau est encore exacerbé par des facteurs tels que la croissance démographique exponentielle, l'industrialisation continue, l'expansion des activités agricoles, la pollution de l'eau, la mauvaise gestion et les changements climatiques. Afin de relever ce défi mondial, des efforts considérables sont déployés pour développer des technologies alternatives de production d'eau. Le dessalement de l'eau est considéré comme la principale source de production d'eau potable à partir de diverses sources. Il désigne le procédé d'élimination des sels et minéraux de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre afin d'obtenir de l'eau propre à la consommation humaine et aux usages industriels et domestiques. Historiquement, les méthodes de dessalement thermique utilisant des procédés de changement de phase (tels que l'évaporation multi-étagée [MSF], la distillation à effets multiples [MED] et la compression thermique de vapeur [TVC]), ont été employées pour produire de l'eau douce. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine des membranes, les procédés membranaires sont aujourd'hui considérés comme les options les plus prometteuses et pratiques, notamment grâce à leur haute efficacité énergétique, leur faible encombrement et une automatisation aisée. Parmi ceux-ci, les plus répandus sont l'osmose inverse (OI), la nanofiltration (NF) et la distillation membranaire (DM). L'osmose inverse est actuellement la technique la plus fiable et la plus moderne pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre afin de minimiser les coûts associés (**Qasim et al., 2019**).

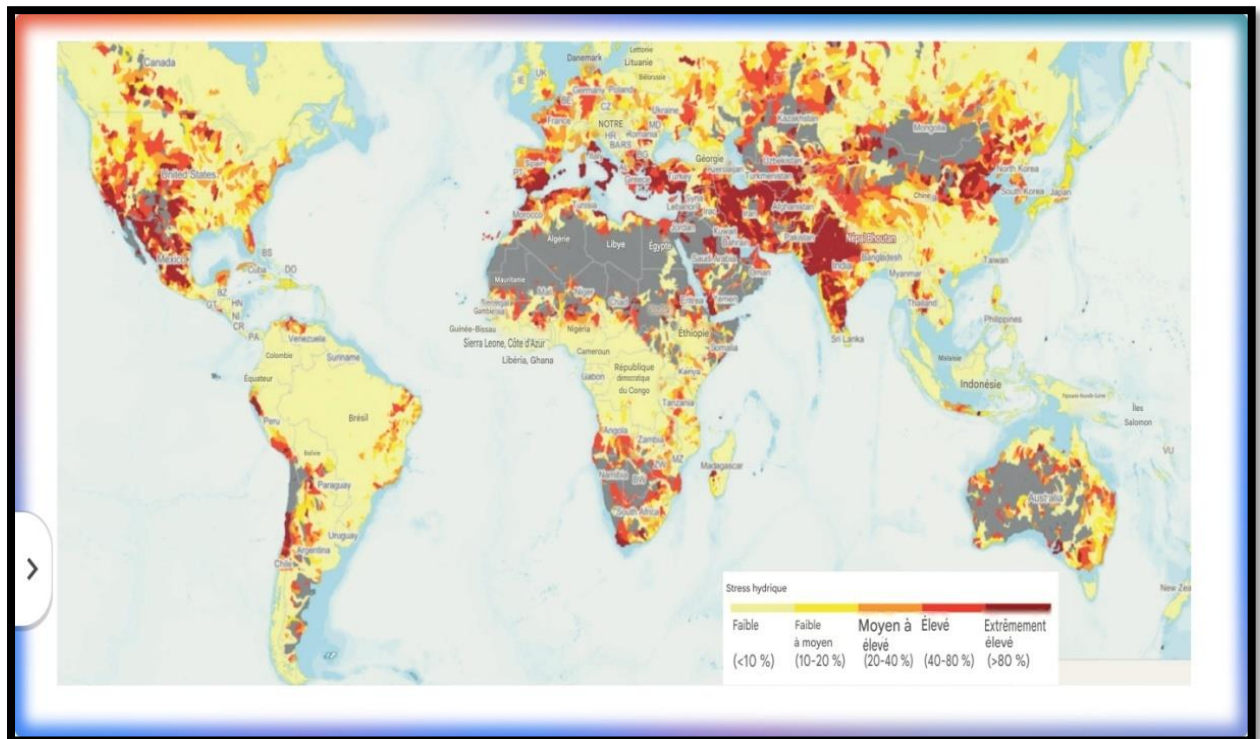


Figure 1 : carte du stress hydrique en 2020(Salinas-Rodriguez et al., 2021).

2. Les ressources en eau et le besoin du dessalement

Les sources d'eau naturelles se subdivisent **en trois groupes** :

2. a. Eaux douces de surface :

Leur volume total est très faible : il représente 0,18 millions de km³, soit 0,013 % de l'hydrosphère. Elles sont présentes dans les cours d'eau (ruisseaux, rivières, fleuves) et les lacs. Elles sont très vulnérables à la pollution car elles reçoivent directement les eaux de ruissellement, c'est-à-dire les eaux de pluie ruisselant sur le sol, qui s'infiltrent dans le sol ou dans le sous-sol, ou qui rejoignent un cours d'eau (Maafa, 2020).

2. b. Rivières et fleuves :

En très haute montagne, les cours d'eau naissent de la fonte des glaciers. La glace qui fond donne naissance à des ruisseaux ou à des torrents qui glissent sous les glaciers et émergent à leur pied : c'est le régime glaciaire. Les autres cours d'eau proviennent du ruissellement des pluies excédentaires et/ou de l'émergence, sous la forme de sources, de nappes d'eaux souterraines : ce type de régime est dit pluvial. Tous les cours d'eau descendent le long des

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

pent, se rejoignent pour former des rivières de plus en plus imposantes qui finissent par se jeter dans un océan ou une mer intérieure. Tout au long de leur périple, les cours d'eau sont aussi alimentés par les eaux de ruissellement et parfois par des eaux souterraines (Maafa, 2020).

2. c. lacs :

Les lacs se forment lorsque les eaux qui coulent le long des pentes, cours d'eau ou eaux de ruissellement, rencontrent un obstacle qui les empêche de poursuivre leur course. Les eaux envahissent alors la dépression ainsi créée, formant des étendues parfois immenses, à tel point que certains grands lacs sont appelés des mers (par exemple, la mer Caspienne : 371 000 kilomètres carrés de superficie). Les lacs sont alimentés par un cours d'eau, par des eaux de ruissellement et, dans certains cas, par des eaux souterraines.

2.2 Eaux souterraines :

Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches constituant le sous-sol, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable. Là, les eaux s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé nappe. La roche plus ou moins poreuse et donc plus ou moins perméable contenant cette eau est appelée aquifère. Les eaux souterraines constituant la nappe cheminent en sous-sol sur la couche imperméable, en suivant les pentes, parfois sur des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau nommés exutoires. Les nappes souterraines fournissent presque le tiers du débit total des cours d'eau de la planète, soit environ 12000 kilomètres cubes d'eau par an. Les aquifères représentent un réservoir d'eaux souterraines correspondant à un volume d'environ 8 millions de km³, soit 0,6 % de l'hydrosphère, Elles constituent notre principale ressource en eau douce (Maafa, 2020).

2.3. Eau de mer :

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est «salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, Principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion Sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface

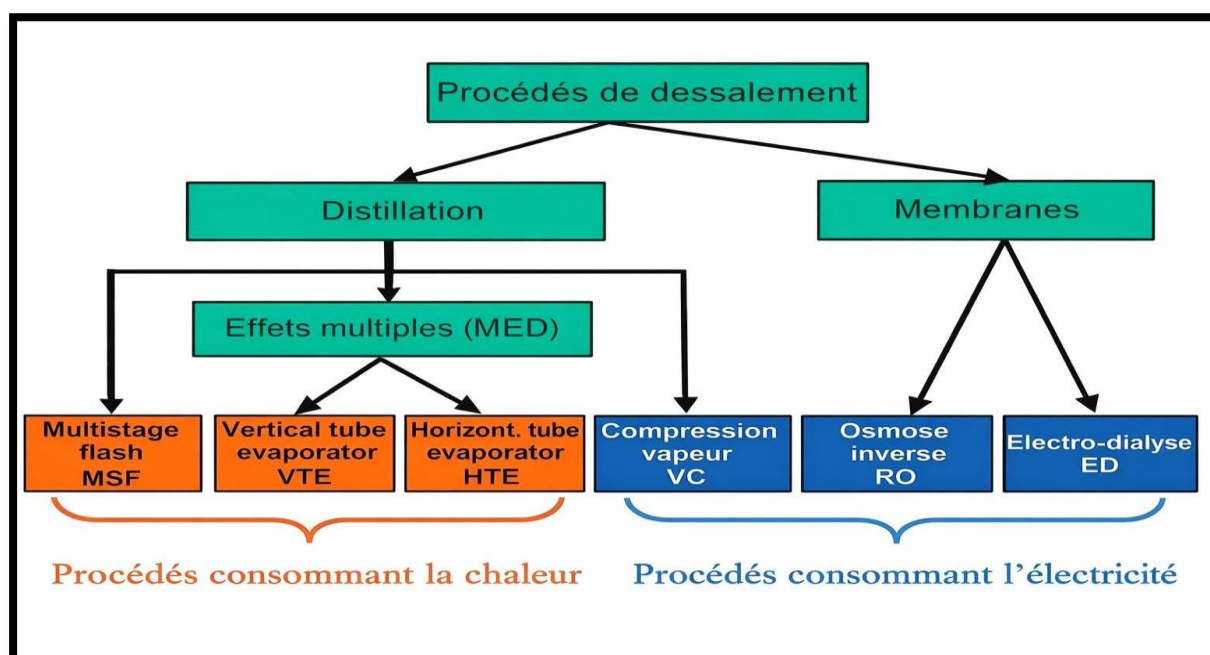
Chapitre I : Synthèses bibliographiques

est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à Celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction (Maafa, 2020).

3. Les technologies du dessalement d'eau de mer

Le dessalement de l'eau est le processus d'élimination du sel et d'autres impuretés de l'eau de mer pour la rendre propre à la consommation humaine, à l'agriculture et à l'usage industriel. Les technologies les plus largement appliquées et éprouvées commercialement peuvent être divisées en deux types de procédés : thermiques et membranaires (Bouramdane, 2023).

Figure 2 : Les procédés de dessalement (ecotoxicologie.fr, 2012)



3.1 Les procédés thermiques

Les méthodes de dessalement thermique s'inspirent du cycle hydrologique naturel, où l'eau salée est d'abord évaporée puis condensée pour obtenir de l'eau douce à faible concentration de matières solides dissoutes totales (TDS). Les principales technologies de cette catégorie sont la distillation multi-effet (MED) et la distillation multi-étagée (MSF). Dans les régions d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (MENA), les procédés thermiques tels que la MED et la MSF dominent le marché du dessalement, représentant environ 85 % de la capacité totale de production d'eau. Cette prédominance s'explique par la forte salinité de l'eau de mer dans le Golfe, la fréquence élevée des proliférations d'algues qui peuvent gravement endommager les membranes d'osmose inverse (OI), ainsi que par la présence de nombreuses grandes centrales

électriques, facilitant une intégration rentable entre la production d'énergie et le dessalement (Thuét *al.*, 2013).

3.1.1 Distillation flash multi-étagée (MSF)

Dans le procédé, l'eau salée traverse les tubes des échangeurs de chaleur situés dans les différentes étapes de vaporisation instantanée, ce qui la préchauffe avant son entrée dans le réchauffeur de saumure. Bien que ce système ne génère pas de chaleur résiduelle pendant la distillation, il présente des coûts d'exploitation élevés ainsi que des risques accrus de corrosion et d'entartrage en raison des températures élevées utilisées. Ce procédé se compose de deux parties principales, le chauffage de la saumure et les étapes de détente. La saumure est chauffée dans un réchauffeur spécifique à l'aide de vapeur basse pression, jusqu'à ce qu'elle atteigne une température comprise entre 90 et 110°C, appelée température maximale de la saumure (TMS) (Loirdighi et Assir, 2025). Une fois chauffée, la saumure entre dans la première étape, où la pression est inférieure à celle du réchauffeur, ce qui entraîne une évaporation rapide de l'eau (phénomène de vaporisation instantanée). Chaque étape du procédé MSF fonctionne à une température légèrement inférieure à celle de l'étape précédente, la pression étant ajustée au point d'ébullition correspondant. Lors de la condensation de la vapeur produite par vaporisation instantanée sur les tubes de l'échangeur, la chaleur latente est transférée à l'alimentation saline, ce qui contribue au processus global (Nassrullah *et al.*, 2020).

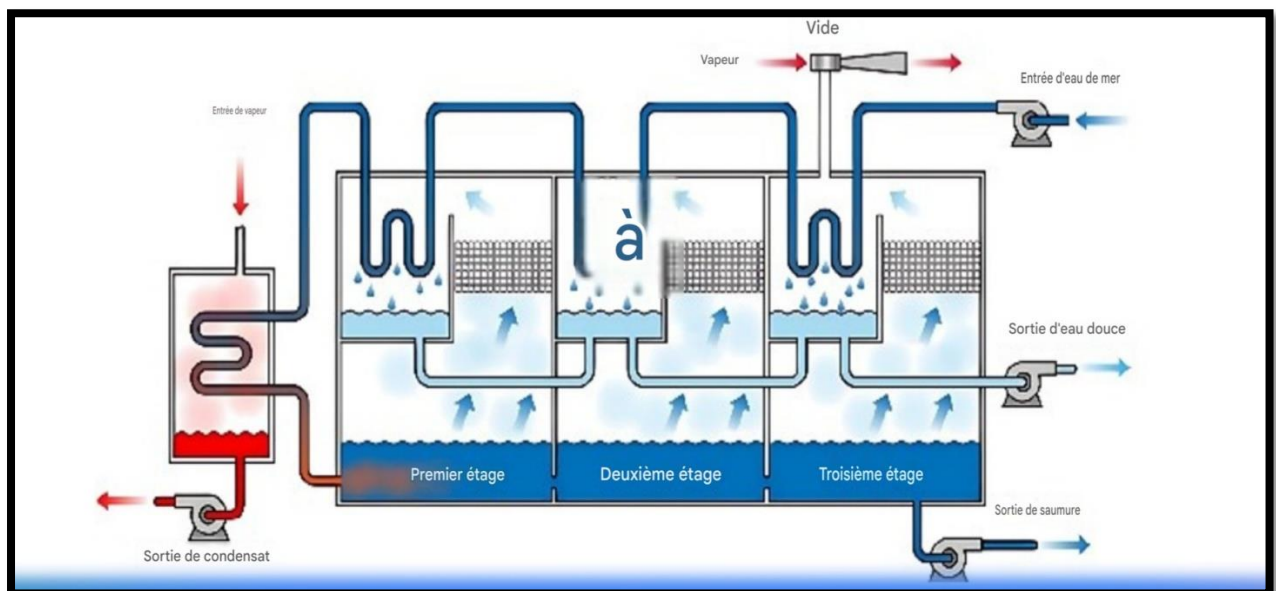


Figure 3 : Schéma d'une unité MSF (Loirdighi et Assir, 2025).

3.1.2 Multiple-effet distillation (MED)

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

Le procédé MED, est l'une des technologies de dessalement les plus répandues aujourd'hui. Cependant, la chaleur perdue n'est pas récupérable pour alimenter le processus de distillation. Ce système présente certains inconvénients, notamment des coûts d'exploitation élevés et des températures de fonctionnement qui favorisent la corrosion ainsi que la formation de dépôts. Le MED est principalement composé d'un condenseur et de plusieurs compartiments appelés effets. Ces effets fonctionnent à des pressions et des températures décroissantes, généralement entre 65 et 90 °C. Avant d'atteindre le condenseur, l'eau d'alimentation saline est préchauffée. Elle est ensuite distribuée en quantités égales à chaque effet. À l'intérieur de chaque effet se trouvent des faisceaux de tubes d'évaporateur, sur lesquels l'eau saline est pulvérisée. La vapeur à basse pression circulant dans ces tubes provoque l'évaporation initiale de l'eau d'alimentation. Dans les effets suivants, la vapeur produite dans le L'effet précédent sert de source thermique pour l'évaporation suivante. De plus, cette vapeur est également utilisée pour chauffer l'eau salée dans le condenseur. Étant donné que le point d'ébullition de l'eau diminue avec la pression, une réduction de pression permet l'évaporation à des températures plus basses. Ainsi, la vapeur externe n'est nécessaire que dans le premier effet de l'unité MED, tandis que la chaleur récupérée pendant le refroidissement est réutilisée comme énergie thermique dans les effets suivants (Loirdighi et Assir, 2025).

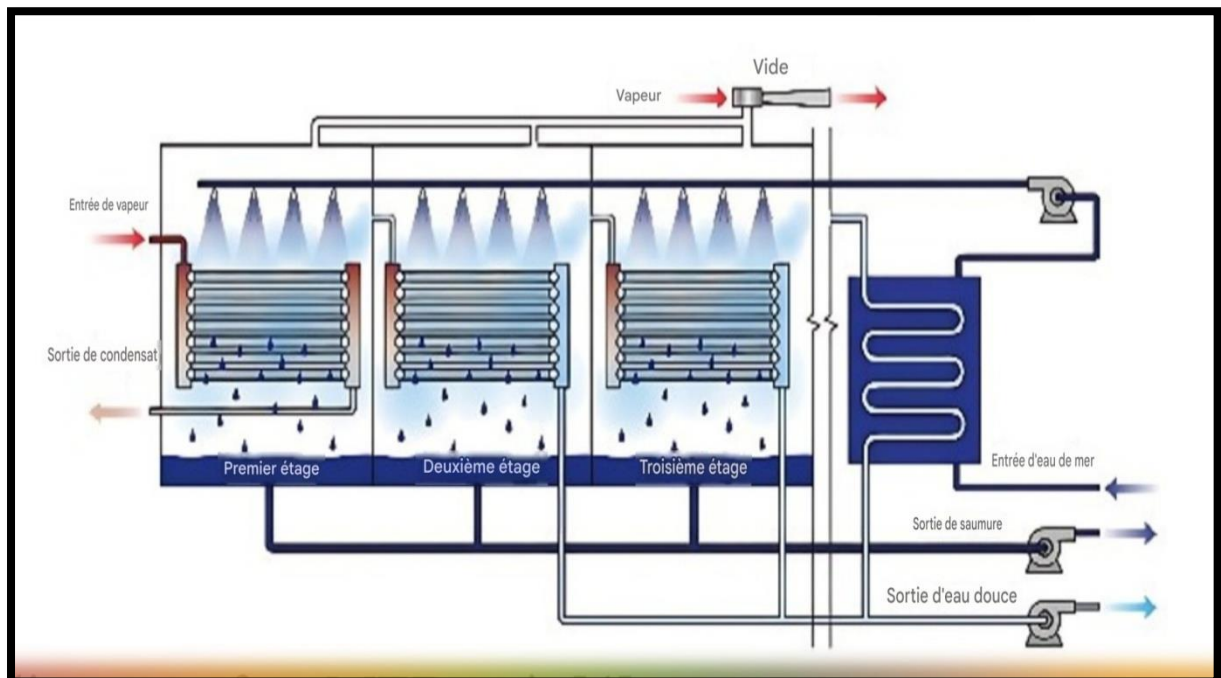


Figure 4 : Schéma d'une unité MED(Loirdighi et Assir, 2025).

3.2 Procédé membranaire

Dans les procédés de dessalement par membrane, les sels de plus grand rayon ne peuvent pas traverser les membranes semi-perméables. Il en résulte de l'eau douce à faible teneur en TDS (Total des Solides Dissous) et le rejet de la saumure à forte concentration. L'osmose inverse et l'électrodialyse sont les principales technologies de dessalement par membrane (**Gohil et al., 2023**).

3.2.1 Osmose inverse (OI)

Le procédé d'osmose inverse (OI) est relativement récent par rapport à d'autres technologies et a été commercialisé avec succès au début des années 1970 pour le dessalement de l'eau. L'OI est un procédé de séparation membranaire dans lequel l'eau d'une solution saline sous pression est séparée des solutés (la matière dissoute) en la faisant passer à travers une membrane (**Eyl-Mazzega, 2023**).

3.2.2 Electrodialyse (ED)

L'électrodialyse (ED) a été introduite commercialement au début des années 1960, avant l'osmose inverse (OI). C'était un moyen rentable de dessaler l'eau saumâtre et elle a suscité un intérêt considérable pour les technologies de dessalement afin de produire de l'eau potable à usage municipal. Elle a également de nombreuses autres applications dans les industries environnementales et biochimiques, ainsi que dans la production de sel. L'ED est un procédé de séparation électrochimique qui utilise des membranes échangeuses d'ions chargées électriquement avec une différence de potentiel comme force motrice. En effet, la plupart des sels dissous dans l'eau sont ioniques, c'est-à-dire qu'ils sont chargés positivement (cationiques) ou négativement (anioniques) et migrent vers les électrodes. Les membranes peuvent être construites pour permettre le passage sélectif des cations ou des anions (**Loirdighi et Assir, 2025**).

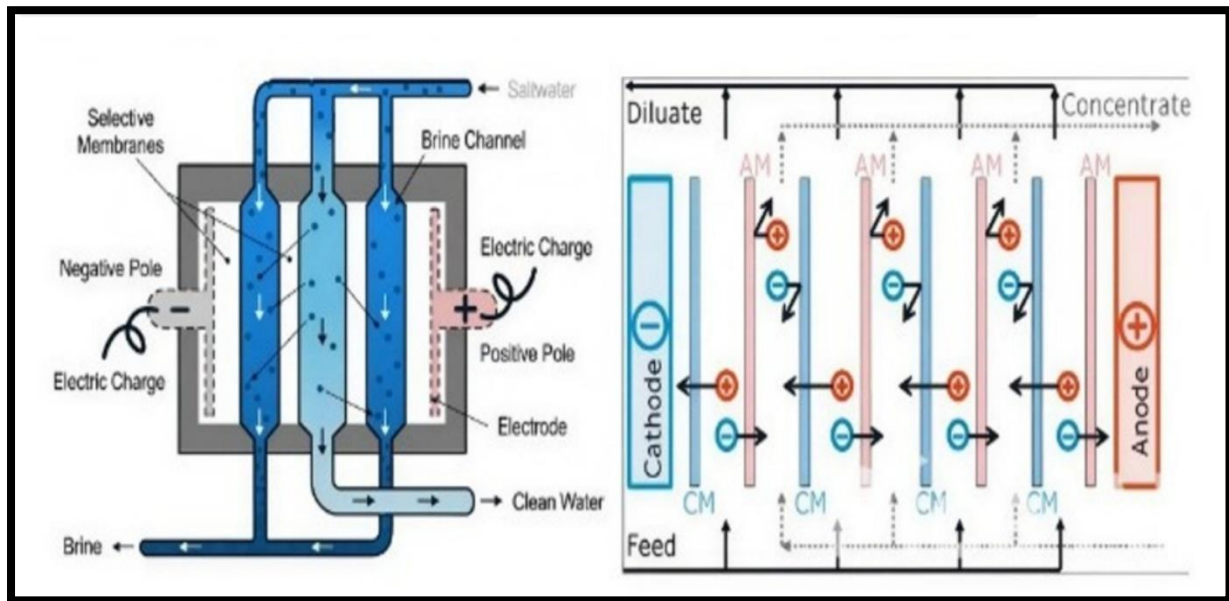


Figure 5 : Principe du dessalement par électrodialyse (Abdalla *et al.*, 2023).

3.3 Comparaison entre les différents procédés de dessalement

des statistiques sur l'état de l'art des usines de dessalement opérationnelles, mettant en évidence les performances énergétiques et économiques des principales technologies de dessalement, notamment les procédés membranaires tels que l'osmose inverse (OI) et les procédés thermiques comme la distillation multi-effets (DME) et la distillation flash multi-étagée (DFME). La technologie OI se distingue par sa faible consommation d'énergie (3 à 6 kWh/m²) et son coût de production compétitif (0,45 à 1,72 USD/m²), ce qui en fait la solution la plus utilisée au monde, fonctionnant exclusivement à l'électricité. En revanche, les procédés thermiques nécessitent une quantité importante d'énergie thermique (jusqu'à 390 kJ/kg), ce qui entraîne une consommation équivalente totale beaucoup plus élevée (jusqu'à 25,5 kWh/m² pour la DFME), ainsi que des coûts d'investissement initiaux plus élevés. Les méthodes d'osmose inverse, qui deviennent dominantes dans le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer, sont actuellement les moins coûteuses, principalement en raison de leur faible consommation d'énergie, ainsi que des progrès récents réalisés dans le domaine des membranes et des systèmes de récupération d'énergie. En effet, la technologie d'osmose inverse représente environ 69 % de la capacité de dessalement installée dans le monde et est privilégiée dans la plupart des nouveaux projets (Loirdighi et Assir, 2025). Outre son efficacité énergétique, l'osmose inverse produit une eau dont la teneur en sels dissous se situe entre 400 et 500 ppm, convenant à la fois à l'irrigation agricole et à la consommation humaine. En revanche, l'eau très pure produite par le procédé MED (~10 ppm) nécessite une reminéralisation avant utilisation, ce qui complexifie

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

les étapes de traitement (Curto *et al.*, 2021). Ainsi, grâce à son efficacité énergétique, sa viabilité économique et la qualité de l'eau produite, l'osmose inverse est devenue la technologie la plus adaptée aux défis actuels du dessalement, notamment dans les régions à fort potentiel solaire (Loirdighi et Assir, 2025).

3.4. Avantages et inconvénients des technologies

Tableau01 : Avantages et inconvénients des principaux procédés de dessalement (Loirdighi et Assir, 2025).

Procédés de dessalement	Type de technologies	Avantages	Inconvénients
Membrane	Osmose inverse (OI)	-Seule demande électrique. - Faibles investissements. -Couplé à de nombreuses sources d'énergie renouvelables. -Structure modulaire de l'usine.	-Qualité de l'eau inférieure Coûts élevés des membranes et des produits chimiques -Sujet à l'encrassement biologique
	Électrodialyse (ED)	-haute pureté de l'eau douce. -Consommation d'énergie proportionnelle à la concentration en sel.	-Uniquement pour l'eau saumâtre (jusqu'à 2000 ppm) -les contaminants bactériens ne sont pas éliminés par le système.

Thermique	Distillation Flash Multi-étagée (MSF)	- les opérations de maintenance pour éliminer l'entartrage sont plus simples qu'en MED - Haute qualité de l'eau - capacité nominale élevée	- Forte demande d'énergie - Démarrage lent - L'ensemble de l'installation est arrêté pour maintenance
	Distillation Multi-effet (MED)	- Haute qualité de l'eau - Faible consommation d'énergie	- Entartrage des canalisations

4. Osmose inverse

4.1 .1. Définition de l'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé sous pression qui utilise une membrane semi-perméable dont la taille des pores est de 0,5 à 1,5 nm, ne laissant passer que les particules les plus fines. Ce procédé inverse le processus d'assimilation classique en appliquant une pression d'environ 20 à 70 bars supérieure à la pression osmotique de la solution d'alimentation. La taille subatomique des solutés retenus est généralement comprise entre 0,00025 et 0,003 μm . L'osmose inverse permet d'éliminer 95 à 100 % des sels minéraux et des composés organiques chargés. Ce procédé est compact et offre une efficacité d'élimination élevée. Cependant, la dégradation et l'encrassement de la membrane constituent les principaux inconvénients des systèmes d'osmose inverse (**Qasem et al., 2021**).

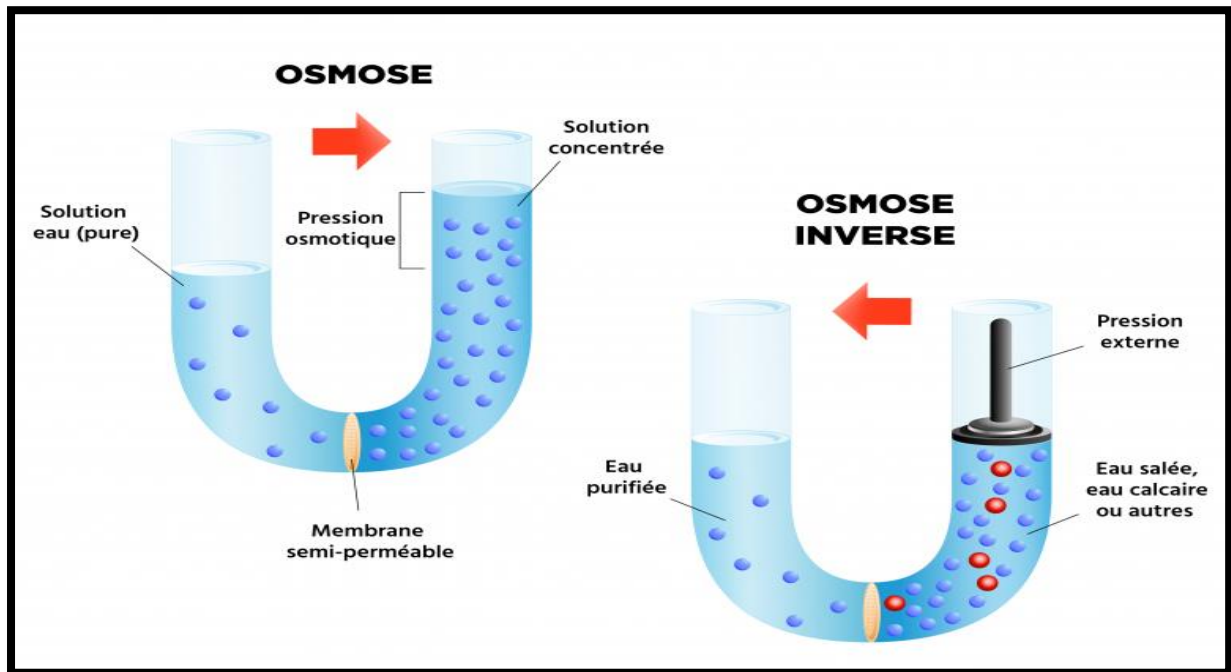


Figure 6: Principe des phénomènes d’osmose et d’osmose inverse (Union des entreprises de traitement de l’eau ,2026).

4.1 .2. La pression osmotique

La pression osmotique absolue π_{osm} peut être définie selon l'équation de van't Hoff (En chimie, la quantité $i[c]$ est appelée « normalité », indiquant le nombre d'équivalents dans un volume unitaire. L'équivalent représente la quantité d'une substance spécifique capable de réagir avec (ou de fournir) une mole d'hydrogène (H^+) dans une réaction acido-basique, ou de réagir avec (ou de fournir) une mole d'électrons dans une réaction d'oxydoréduction) :

$$\Pi = i . C . R . T$$

En supposant la notation suivante :

i : est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté

C : la concentration molaire du soluté (mol/m^3).

R : Constante des gaz parfaits ($0,082 \text{ l.bar.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T : Température (Kelvin) (Helfer *et al.*, 2014).

4.2 Le fonctionnement d’une membrane d’osmose inverse

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

Le dessalement par osmose inverse repose sur quatre étapes : prétraitement, pompe haute pression, membrane et post-traitement. L'eau est forcée à travers une membrane semi-perméable, produisant de l'eau douce et une saumure. Les pressions de fonctionnement sont généralement de 55–82 bars pour l'eau de mer et 17–27 bars pour l'eau saumâtre (Al-Karaghoul *et al.*, 2010).

Le processus est influencé par plusieurs facteurs tels que **le pH, la pression de fonctionnement et la température**. Lors du choix des membranes, il faut prendre en compte **l'angle de contact, le potentiel zêta, la distribution de la taille des pores et la rugosité de la surface** (Ezechi *et al.*, 2012).

4.3. Les membranes d'osmose inverse

4.3.1. Les membranes tubulaires

Les modules tubulaires sont utilisés pour des applications à forte teneur en solides, notamment dans les industries alimentaire et biologique. Le diamètre des tubes varie entre 1,3 et 2,6 cm ; l'alimentation circule à l'intérieur du tube tandis que le perméat est recueilli à l'extérieur, se caractérise par une densité d'empilement faible et un coût élevé. Ils sont faciles à nettoyer mais nécessitent un nettoyage fréquent et un débit élevé pour limiter l'encrassement. Ils sont surtout employés en microfiltration (MF) et ultrafiltration (UF) plutôt qu'en osmose inverse (RO) (Kucera, 2015).

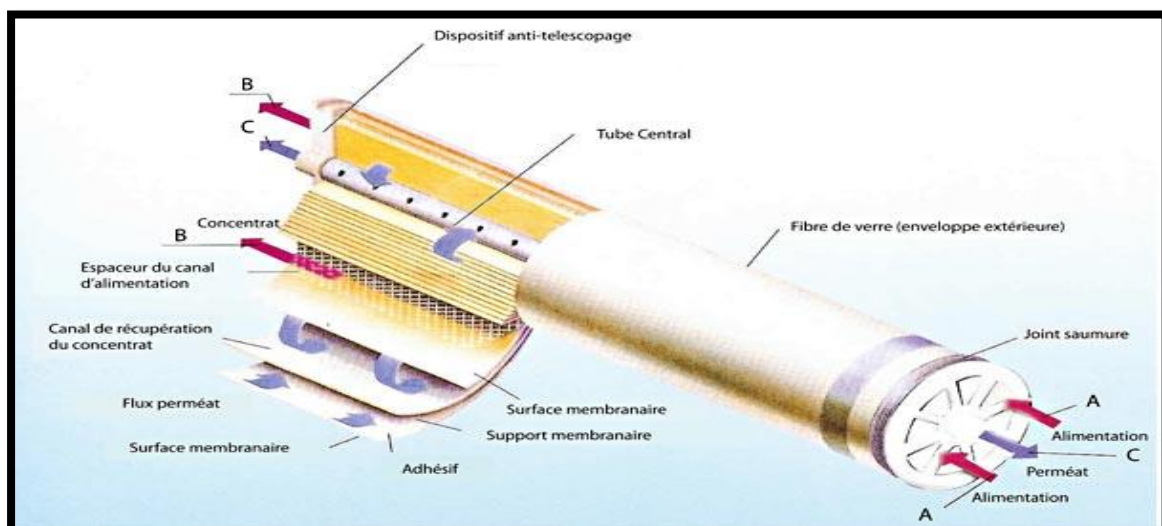


Figure 7: Membrane tubulaire (Polymem, 2026).

4.3.2. Les membranes en spirale

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

Les modules à membrane spiralée sont les plus utilisés en osmose inverse (RO) en raison de leur forte densité d'emballage. Ces modules sont constitués de feuilles de membrane séparées par des espaces pour collecter l'eau purifiée, puis enroulées autour d'un tube central perforé. L'épaisseur de l'espaceur d'alimentation peut être augmentée pour mieux supporter les eaux riches en matières solides et réduire l'encrassement de la membrane. L'eau d'alimentation circule parallèlement à la membrane, tandis que le concentrant sort à l'extrémité opposée, et le perméat traverse la membrane perpendiculairement pour être collecté dans le tube central (**kucera, 2015**).

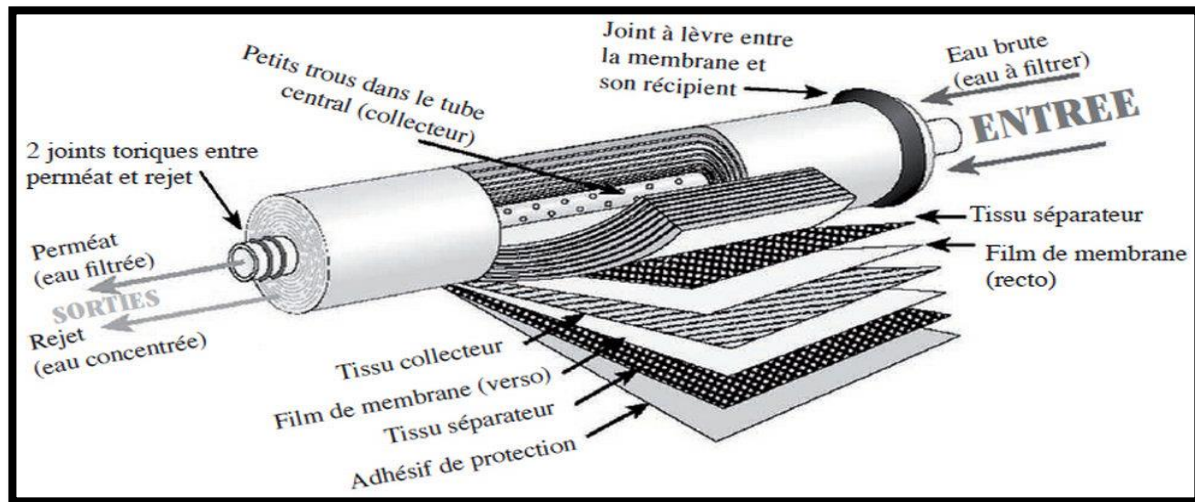


Figure 8:Membranes en spirale (Cieléo ,2023).

4.3.3. Les membranes en plaques et de cadres

Les modules RO à plaques et cadres sont utilisés pour les applications à fortes matières en suspension et sont peu courants dans les stations de traitement d'eau. Ils sont composés de membranes à feuilles plates doubles disposées dans un cadre, avec des espacements permettant le flux d'eau. Ces modules présentent l'avantage d'être faciles à nettoyer et adaptés aux applications à fortes matières en suspension. Cependant, ils sont coûteux et peuvent s'encrasser dans les zones mortes à l'intérieur de l'unité (**kucera, 2015**).

4.3.4. Les membranes fibres creuses

Les modules à coque sont sensibles au diamètre et à l'encrassement, tandis que les modules à alimentation intérieure assurent un flux régulier et une faible polarisation. Le diamètre des fibres influence fortement la performance, et l'efficacité peut être améliorée par un flux perpendiculaire ou la connexion de plusieurs modules (**Baker, 2012**).

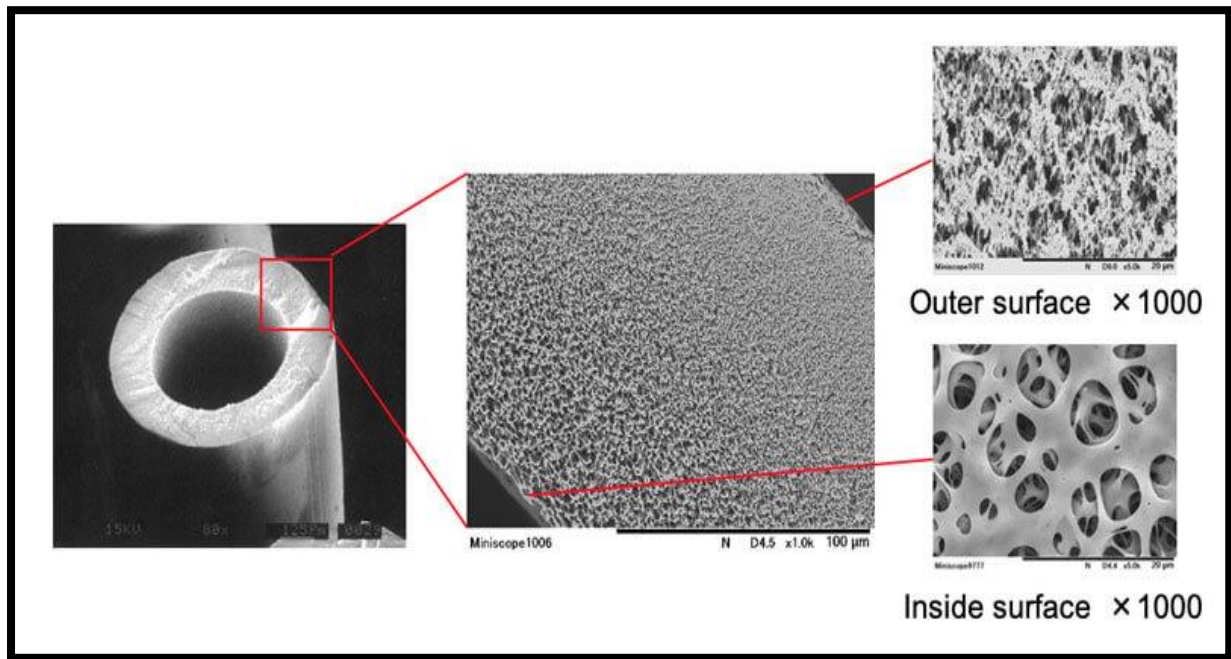


Figure 9:Membranes à fibres creuses (GS Yuasa Corporation ,2026).

5. Les paramètres influençant les performances d'un système Osmose inverse

Les performances d'un système d'osmose inverse d'eau de mer (OIEM) dépendent de nombreux paramètres tels que la salinité de l'eau d'alimentation, la température d'alimentation, la pression d'alimentation, le débit d'alimentation et Le colmatage des membranes. De nombreuses recherches ont été menées pour étudier le phénomène d'OI, comment améliorer l'efficacité des systèmes d'OI et quels sont les paramètres de conception et de fonctionnement les plus efficaces (**Kimet al., . 2019**)

5.1. Pression transmembranaire

La pression d'alimentation est un paramètre essentiel en osmose inverse. Lorsque la pression augmente, le flux de perméat augmente également, à condition qu'elle soit supérieure à la pression osmotique. Toutefois, une pression élevée améliore la production d'eau mais entraîne une augmentation de la consommation énergétique(**Mostafaa et al., 2021**).

5.2. La salinité de l'alimentation

La salinité élevée augmente la pression osmotique, ce qui exige une pression de fonctionnement plus importante. Elle influence directement la qualité du perméat et la consommation énergétique du système (**Mostafaa et al., 2021**).

5.3. La température

La température de l'eau d'alimentation joue un rôle important dans la performance d'un système d'osmose inverse. Une augmentation de la température entraîne une hausse du débit de perméat en raison de la diminution de la viscosité de l'eau. Toutefois, cette élévation peut provoquer une légère diminution du taux de rejet des sels. De plus, la température influence également la concentration du bore dans le perméat (**Mostafaa et al., 2021**).

5.4. Le débit

Le débit d'alimentation joue un rôle clé dans le fonctionnement d'un système d'osmose inverse. Il influence le phénomène de polarisation de concentration, c'est-à-dire l'accumulation de sels à la surface de la membrane, et affecte également la chute de pression à travers les membranes (**Mostafaa et al., 2021**).

5.5. Le colmatage des membranes

L'encrassement des membranes constitue un problème majeur dans ce domaine. Bien que les différents types d'encrassement présentent des processus de formation distincts, il n'existe pas de frontières clairement définies entre eux ; leurs effets sont synergiques ou interdépendants et forment généralement une couche d'encrassement composite (**Ahmed et al., 2023**). Cela entraîne un colmatage partiel de la surface et des pores de la membrane, ce qui provoque une augmentation de la résistance à l'écoulement. Ce phénomène est mis en évidence par la diminution de la perméabilité observée lors de l'application d'une pression constante ou lors de l'augmentation de la pression pour maintenir un débit constant (**Al-Amoudi et Lovitt, 2007**). La revue met en avant les principales méthodes de prétraitement pour limiter l'encrassement des membranes, ainsi que des techniques de nettoyage physiques et chimiques pour restaurer leurs performances, tout en recommandant de réduire l'usage des produits chimiques afin d'éviter leur dégradation. Elle souligne également l'importance de la

modification des membranes et de l'ajout de nanoparticules pour améliorer leur résistance et leurs performances (**Ahmed et al., 2023**).

Les dépôts qui sont à l'origine de l'encrassement des surfaces d'échange peuvent être classés en **trois** catégories:

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

Les dépôts minéraux qui correspondent au phénomène d'entartrage ou scaling Constitués principalement par CaCO_3 , CaSO_4 , XH_2O ... ;

Les dépôts organiques constitués principalement par:

- Les matières en suspension, les acides humiques ou fulviques.
- Les micro-organismes ainsi que les produits excrétés par les micro-organismes(Polysaccharides): on parle alors de biofouling.

Les dépôts colloïdaux: silice, soufre, hydroxydes de fer, de manganèse d'aluminium.

En fait, un dépôt est en général constitué par un mélange de ces différents typesauxquels il faut rajouter les produits de corrosion, ainsi que les précipités résultantsdes réactifs ajoutés (antitartres, flocculants) (**Maurel ,2006**).

6. Les problèmes techniques rencontrés en dessalement

6.1. Problèmes d'entartrage

L'entartrage est un dépôt de sels minéraux qui a tendance à se former sur les Surfaces d'échanges. Compte tenu des ions présents dans les eaux salines (Calcium, magnésium, bicarbonate, sulfate) ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et du sulfate de calcium (CaSO_4) (**Maurel ,2006**).

6.2. Problèmes de corrosion

L'agressivité marquée de l'eau de mer surtout aux températures élevées a plusieurs raisons:

- Composition chimique et en particulier teneur élevée en ions chlorures.
- Conductivité élevée et par suite facilité du développement des effets galvaniques.
- Corrosion résultant de l'oxygène dissous.
- Présence de bactéries, d'organismes marins divers et d' H_2S dans certains cas de Pollution. (**Maurel ,2006**).

7. Les progrès dans les technologies membranaires pour le dessalement de l'eau

7.1. Les nano composites

Les technologies de dessalement à base de membrane, en particulier l'osmose inverse (RO) et la distillation multi-effets (MED), sont essentielles pour remédier à la pénurie mondiale d'eau, mais sont confrontées aux défis de l'encrassement des membranes, qui réduit l'efficacité et augmente les coûts opérationnels. Cette revue examine les progrès réalisés dans l'atténuation de l'encrassement par le biais de membranes nano composites à base de carbone et de métal. Les nanomatériaux de carbone, tels que l'oxyde de graphène (GO) et les nanotubes de carbone (CNT), améliorent l'hydrophilie, la résistance mécanique et l'activité antimicrobienne, réduisant considérablement le bio salissure et la mise à l'échelle. Les composites GO fonctionnels présentent une résistance élevée au chlore et un flux d'eau amélioré, tandis que les mélanges de nanoparticules-polymères métalliques formant des nano composites à couche mince présentent des propriétés anti salis contre les contaminants tels que les métaux de terre alcaline, la matière organique naturelle et les microbes. Les nano composites à base de métaux, tels que les hybrides argentés (Ag)-GO et les matériaux connexes, atténuent encore l'adhésion microbienne par des effets bactéricides, ce qui permet d'obtenir un rejet de sel d'environ 98,5 % et une perméabilité accrue à l'eau. Des techniques telles que la polymérisation in situ, la polymérisation inter faciale, le mélange et la modification de surface optimisent les performances de la membrane en équilibrant la porosité, la sélectivité et la robustesse. Malgré les progrès réalisés, des défis subsistent pour étendre les processus de fabrication et assurer la stabilité à long terme dans le cadre d'applications réelles. Les recherches futures doivent donner la priorité à la synthèse écologique, au rapport coût-efficacité et à l'évolutivité industrielle pour faire progresser le dessalement durable. En outre, la consommation énergétique spécifique des installations de dessalement d'eau de mer se situe entre 3,5 et 4,5 kWh/m³, qui, dans la plupart des cas, sont alimentées par de l'électricité à base de combustibles fossiles. Ce phénomène contribue de manière significative à l'empreinte carbone industrielle, nécessitant l'intégration de micro-réseaux d'énergie renouvelable pour alimenter les usines de dessalement, favorisant ainsi la durabilité environnementale du dessalement de l'eau de mer tout en maximisant l'efficacité des ressources et la viabilité économique. Cette revue met en évidence le potentiel des nano composites pour révolutionner la technologie membranaire, offrant des solutions à haut flux et à faible consommation d'énergie avec des capacités antisalissure élevées pour le dessalement de l'eau de mer (Niche *et al.*, 2025).

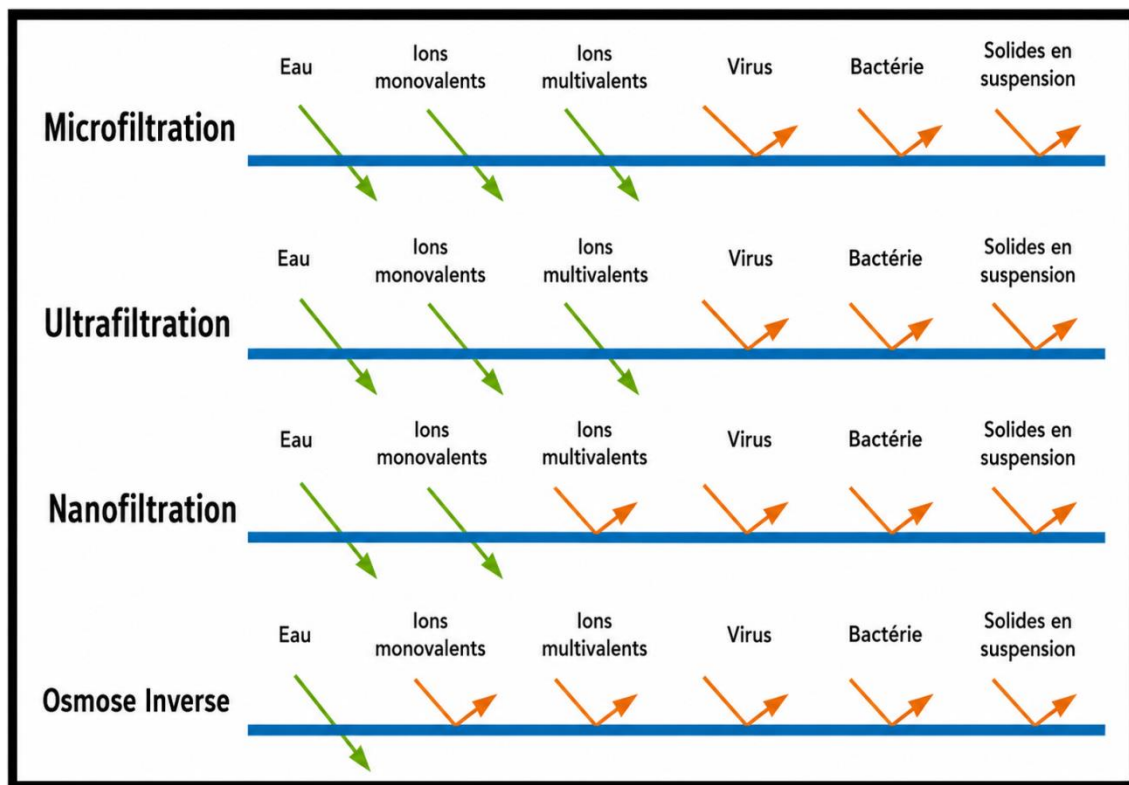


Figure 10: Niche du procédé membranaire (Safe Drinking Water Fondation, 2026).

7.2. Les membranes d'osmose inverse antibactérienne

Cette étude traite le problème du biofouling dans les membranes d'osmose inverse (RO), où l'adhésion et la prolifération des micro-organismes sur la surface de la membrane provoquent une diminution du flux d'eau, une baisse de l'efficacité du rejet des sels et une réduction de la durée de vie de la membrane. Afin de résoudre ce problème, les chercheurs ont développé une membrane RO à double fonction possédant des propriétés antibactériennes et anti-adhésion, grâce à la modification de la surface de la membrane par l'ajout de liquides ioniques (Ionic liquide) et de monomères d'acide sulfonique. Les résultats ont montré une amélioration significative des performances de la membrane, avec une augmentation du flux d'eau de 13 % et une légère amélioration du rejet des sels. De plus, la membrane a démontré une forte efficacité contre les bactéries telles que *E. coli* et *S. aureus*, avec un taux d'élimination dépassant 96 %. En outre, elle a présenté une bonne résistance au colmatage organique ainsi

qu'une stabilité à long terme dans la purification de l'eau, ce qui en fait une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité et la durée de vie des membranes d'osmose inverse (Langet *al.*, 2025).

La 2^{ème} étude se concentre sur le développement d'une solution innovante visant à améliorer les performances des membranes d'osmose inverse (RO) et à réduire les problèmes causés par la contamination microbienne, considérée comme l'une des principales causes de dégradation des membranes et d'augmentation des coûts d'exploitation. Pour cela, les chercheurs ont conçu une membrane intelligente à propriété antibactérienne en modifiant sa surface par l'ajout de nano composites contenant de l'argent (Ag) associés à un matériau thermosensible (PNIPAm). Cette technologie permet une libération contrôlée des ions d'argent antibactériens lorsque la température augmente pendant le fonctionnement, assurant ainsi une protection efficace contre les micro-organismes. Les résultats ont montré une très forte efficacité dans l'inhibition des bactéries et des champignons, ainsi qu'une amélioration notable de la résistance au colmatage et de la récupération du flux d'eau, tout en maintenant une efficacité élevée du rejet des sels supérieure à 99 %, ce qui fait de ce type de membrane une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes de traitement de l'eau (Song *et al.*, 2025).

La 3^{ème} étude c'est un développement de revêtements antifouling à base de polyalcool vinylique (PVA), reconnu pour sa forte hydrophile, mais limité par une faible perméabilité due aux fortes liaisons hydrogène dans sa structure. Pour surmonter ce problème, les chercheurs ont utilisé une méthode de quaternisation consistant à introduire des groupes d'ammonium quaternaire dans le revêtement PVA, ce qui a permis de réduire la résistance au transport et d'augmenter le flux d'eau de 26,4 à 33,8 L·m⁻²·h⁻¹. Les membranes modifiées ont également montré des propriétés antibactériennes et une meilleure résistance au colmatage organique et biologique, avec une efficacité antibactérienne passant de 27,5 % à 97,5 % après modification. En outre, le traitement de réticulation (crosslinking) a amélioré la stabilité du revêtement et sa résistance pendant le fonctionnement. Les essais à long terme ont confirmé une meilleure performance et une durée de vie prolongée des membranes, faisant de cette approche une solution prometteuse pour le traitement avancé de l'eau (Calet *al.*, 2026).

8. désalinisation dans les pays en développement

D'ici 2050, on prévoit que 40 % de la population mondiale vivra sous une grave pénurie d'eau

Notamment la quasi-totalité de la population du Moyen-Orient et de l'Asie du Sud, ainsi que Des régions importantes de Chine et d'Afrique du Nord. Les principaux facteurs sont la croissance démographique, L'urbanisation et le changement climatique.

Sachant qu'environ 785 millions de personnes n'avaient toujours pas accès à un service d'eau potable de base en 2019, que près de 2,4 milliards de personnes vivent à moins de 100 km des côtes et compte tenu des défis posés par l'augmentation du stress hydrique – diminution des ressources en eau renouvelables et baisse de la qualité de l'eau avec l'apparition de composés émergents plus problématiques le dessalement est déjà une alternative sur laquelle de nombreux pays à travers le monde s'appuient. Par exemple, au Kenya, à Likoni, dans le comté de Mombasa, la construction d'une usine de dessalement d'une capacité de 100 000 m³/jour est prévue. Au Mexique, le gouvernement a envisagé, dans son plan d'investissement pour l'eau et l'assainissement pour les cinq prochaines années, la construction de quatre usines de dessalement. De nombreux pays en transition économique mettent déjà en œuvre des usines de dessalement, Par conséquent, la recherche et le renforcement des capacités dans ces régions sont urgents pour assurer la mise en œuvre durable des projets de dessalement. L'Afrique se divise en Afrique du Nord et Afrique subsaharienne. La capacité de dessalement actuelle en Afrique du Nord est d'environ 7,4 millions de m³/jour, tandis qu'en Afrique subsaharienne, elle est d'environ 1,8 million de m³/jour. En Afrique du Nord, 87 % de l'eau dessalée provient de l'eau de mer **(Salinas-Rodriguez et al., 2021)**.

9. Le dessalement en Algérie

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement en vue d'un usage exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est quasi inexistant. Néanmoins une seule expérience a été tentée dans une situation où il n'existait aucune autre solution. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'OuedDjalal dans la wilaya de Biskra (sud-est algérien) **(Bessenasse ; 2006)**

Dans l'industrie, la déminéralisation et le dessalement sont utilisés pour assurer la fourniture de l'eau de chaudière, de refroidissement, de traitement. En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est « à tubes submergés » travaillant à basse pression. Et en 1969, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j. Le procédé utilisé est MSF. Dés lors de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont

été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire à l'activité des complexes de production d'électricité (Cap Djanet à l'est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda). Egalement quelques installations sont destinées, principalement dans le Sud, à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières (**Bessenasse ; 2006**). La capacité de dessalement de l'eau de mer en Algérie est estimée en moyenne à 100 000 m³/ j. selon les statistiques du ministère des Ressources en eau, le nombre d'usines de dessalement en 2012 est de l'ordre de 13 grandes stations (**Touidjeni et Benarab ; 2013**), leur capacité totale est estimée à 2.26 millions M³/ j (**Kherbache, 2025**), 16 petites stations réparties sur le long du littoral, leur capacité est comprise entre 2500 à 5000 m³ / j (**Touidjeni et Benarab ; 2013**).

9.1. Les stations de dessalement de l'eau de mer existant en Algérie :

Pour pallier le manque d'eau potable dans le pays, l'Algérie a décidé de miser sur des usines de dessalement d'eau de mer. De nombrant stations sont déjà en service dans le pays :

- ❖ La wilaya de Tlemcen comprend la station de dessalement d'eau de mer suiva

Station de dessalement de Honaïne : 200 000 m³/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Souk Tléta : 200 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Chlef comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de Ténès : 200 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Mostaganem comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de Mostaganem : 200 000 m³/jour d'eau potable⁵.

- ❖ La wilaya d'AinT'émouchent comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de Béni Saf : 200 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Boumerdès comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de cap Djinet : 100 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya d'Alger comprend les stations de dessalement d'eau de mer suivantes:

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

Station de dessalement d'El Hamma : 200 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Tipaza comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement d'Oued Sebt : 100 000 m³/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Fouka : 120 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya d'Oran comprend les stations de dessalement d'eau de mer suivantes:

Station de dessalement d'Arzew : 90 000 m³/jour d'eau potable

Station de dessalement de Bousfer : 5 500 m³/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Aïn Turck : 5 000 m³/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Chatt El Hilal : 200 000 m³/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Mactaâ : 500 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya d'El Tarf comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement d'El Tarf : 50 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Jijel comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de Jijel : 200 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Skikda comprend la station de dessalement d'eau de mer suivant

Station de dessalement de Skikda : 100 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya d'Annaba comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement d'Annaba : 50 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Béjaïa comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de Béjaïa : 100 000 m³/jour d'eau potable.

- ❖ La wilaya de Tizi Ouzou comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante:

Station de dessalement de Tizirt : 2 500 m³/jour d'eau potable.



Figure 11: Station de dessalement en Algérie (Djeddi M. AlderianEnergyCompanySp des Technologies Houari Boumediene Mai 2014).

9.2. Station de dessalement d'eau de mer de béni saf

LIEU D'IMPLANTATION

Commune : SIDI BEN ADDA

Daïra : AIN TEMOUCHENT

Wilaya: AIN TEMOUCHENT

Superficie : 51.118 M2

🚧 SOCIETE D'EXPLOITATION : « UTE DESALADORA BENI SAF OPERATION Y MANTENIMIENTO »

🚧 PRESENTATION

La construction de la station de dessalement d'eau de mer de Béni Saf (SDEM) entre dans le programme de réalisation de 14 stations lancées par le gouvernement Algérien. La SDEM est réalisée par la société Béni Saf Water Company Spa «BWC» qui est constituée à partir du

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

consortium Algéro-Espagnol en l'occurrence GEIDA COBRA (espagnole) avec 51% des actions et de l'AEC (Algérienne) avec 49 % des actions.

BWC a confié la construction de la SDEM à l'entreprise espagnole UTE Desaladora construcción Beni saf. Et son exploitation à l'entreprise espagnole UTE desaladora Beni Saf operación y mantementio.

Surface Totale	: 5.12 ha
Surface Bâtie	: 2.68 ha
Date signature du contrat	: 10 Septembre 2005
Type de Captage d'eau de mer	: Emissaire Long de 1000 M
Rejet de Saumure	: Emissaire long de 500 M
Date ouverture du chantier	: 01 Août 2006
Mise en service partielle	: 09 Nov. 2009
Mise en service totale	: 04 Avril 2010
Capacité de production annuelle: 200.000 M3/jours	

Tableau 02 : Fiche technique et financière de la station de captage et de pompage d'eau de mer (Béni Saf Water Company ,2025).

<u>Nombre de modules:</u>	<i>10 unités de 20.000 M³/j chacune</i>
<u>Technologie de dessalement:</u>	<i>Osmose Inverse</i>
<u>Consommation électrique</u>	<i>≤ 4,15 kWh/m³</i>
<u>Type de prise d'eau de mer et rejet :</u>	<i>Émissaire sous-marin DN 2400 mm /1800mm</i>
<u>Prétraitements :</u>	<i>Pré filtration, Filtres à sable et anthracite, Filtres à cartouche</i>

Chapitre I : Synthèses bibliographiques

<u>Prétraitements chimiques:</u>	<i>Hypochlorite sodique, Chlorure ferrique, Acide sulfurique, Méta Bisulfite Sodique, Dispersant.</i>
<u>Système de récupération d'énergie:</u>	<i>Chambres isobariques (ERI) 95%</i>
<u>Poste traitement du produit :</u>	<i>Carbonate de calcium - Hypochlorite sodique</i>
<u>Montant de l'investissement :</u>	<i>240 M\$</i>
<u>Prix de l'eau :</u>	<i>0.6994 \$/m3</i>

10. Conclusion

Le manque d'eau potable constitue un défi majeur, tant actuel que futur, incitant les scientifiques à rechercher des solutions. La mise en place d'usines de dessalement, notamment celles utilisant la technologie membranaire, représente l'une de ces solutions (**Tayeh ,2024**). L'osmose inverse (OI) est considérée comme la plus fiable, la plus économe en énergie et la plus rentable pour la production d'eau douce (**Shaaban et Yahya, 2017**). Dans le cadre de ces recherches, des membranes d'osmose inverse pour l'eau de mer ont été mises au point des NanoH2OTM de LG Chem intègrent la technologie innovante des nano composites à couches minces (TFN), qui réduit les coûts de dessalement tout en garantissant une qualité d'eau supérieure. Elles offrent un taux de rejet du sel de 99,85 %, une performance inégalée dans le secteur, et un débit supérieur de 20 % à celui des membranes fabriquées avec des technologies conventionnelles. De plus, les membranes LG SW 400 R combinent un taux de rejet élevé et une faible consommation d'énergie, permettant ainsi de réduire les coûts totaux des systèmes d'eau de mer fonctionnant avec de l'eau de mer de salinité moyenne à élevée (**Kim et al., 2020**).

Chapitre II

Matériels Et Méthodes

1. Matériel expérimental

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de Génie de l'Eau et de l'Environnement de l'université de Belhadj Bouchaïb. Les essais ont été effectués sur une unité pilote d'osmose inverse de type ROUC (Reverse OsmosesUltrafiltration computer controlled unit), destinée à l'étude des procédés membranaires de séparation et de dessalement des eaux.

Cette installation permet d'évaluer l'influence des différents paramètres opératoires, notamment la pression transmembranaire, sur les performances du procédé d'osmose inverse en termes de production de perméat et de rétention des sels dissous.

2. Description de l'unité pilote ROUC

L'unité pilote ROUC est constituée d'une pompe volumétrique à trois pistons assurant l'alimentation de la membrane sous pression. Le moteur de cette pompe est commandé par un variateur de fréquence permettant de modifier la vitesse de rotation et, par conséquent, le débit d'alimentation du système.



Figure 12 : L'unité pilote ROUC (Labo hydraulique UAT, 2026).

L'eau à traiter est pompée vers un module contenant deux membranes tubulaires montées en série. Sous l'effet de la pression appliquée, une partie de l'eau traverse la membrane pour former le perméat, tandis que la fraction restante, enrichie en sels dissous, constitue le concentrât.

Le système fonctionne en mode d'écoulement tangentiel (cross-flow filtration), ce qui limite l'accumulation des particules à la surface de la membrane et réduit ainsi les phénomènes de colmatage.

Au cours du fonctionnement, l'eau subit une légère augmentation de température due au travail mécanique de la pompe. Le perméat produit est recueilli dans un réservoir de stockage dédié. Quant au concentrât, il est recyclé vers le réservoir d'alimentation après passage dans un échangeur de chaleur à plaques permettant de maintenir une température de fonctionnement relativement constante.

La pression de fonctionnement au niveau du module membranaire est ajustée à l'aide d'une vanne de régulation placée sur la ligne de concentrât.

3. Caractéristiques techniques de l'installation

3.1. Réservoirs

- Réservoir d'alimentation en acier inoxydable d'une capacité maximale de 15 L ;
- Réservoir de collecte du perméat en acier inoxydable d'une capacité maximale de 15 L.



Figure 13 : Le Réservoir pilot(Labo hydraulique UAT ,2026).

3.2. Pompe d'alimentation

- Pompe volumétrique à trois pistons ;

- Débit maximal : 38 L.min^{-1} ;
- Pression maximale : 150 bars ;
- Pression maximale de fonctionnement : 55 bars ;
- Soupape de sécurité intégrée ;
- Variateur de fréquence pour le réglage du débit.



Figure 14 : La pompe pilote(Labo hydraulique UAT ,2026).

3.3. Module membranaire

Le module est composé de deux membranes tubulaires montées en série présentant les caractéristiques suivantes :

- Diamètre interne : 12,5 mm ;
- Surface membranaire : $0,000122 \text{ m}^2$;
- Pression maximale de fonctionnement : 55 bars.

L'unité est équipée de plusieurs types de membranes :

- **RO01** : membrane d'osmose inverse avec une rétention de 99 % du NaCl et une pression maximale de 45 bars ;

Chapitre II : Matériels Et Méthodes

- **UF02** : membrane d'ultrafiltration (seuil de coupure : 20 000 Da) et pression maximale de 10 bars ;
- **UF03** : membrane d'ultrafiltration (seuil de coupure : 200 000 Da) et pression maximale de 15 bars.

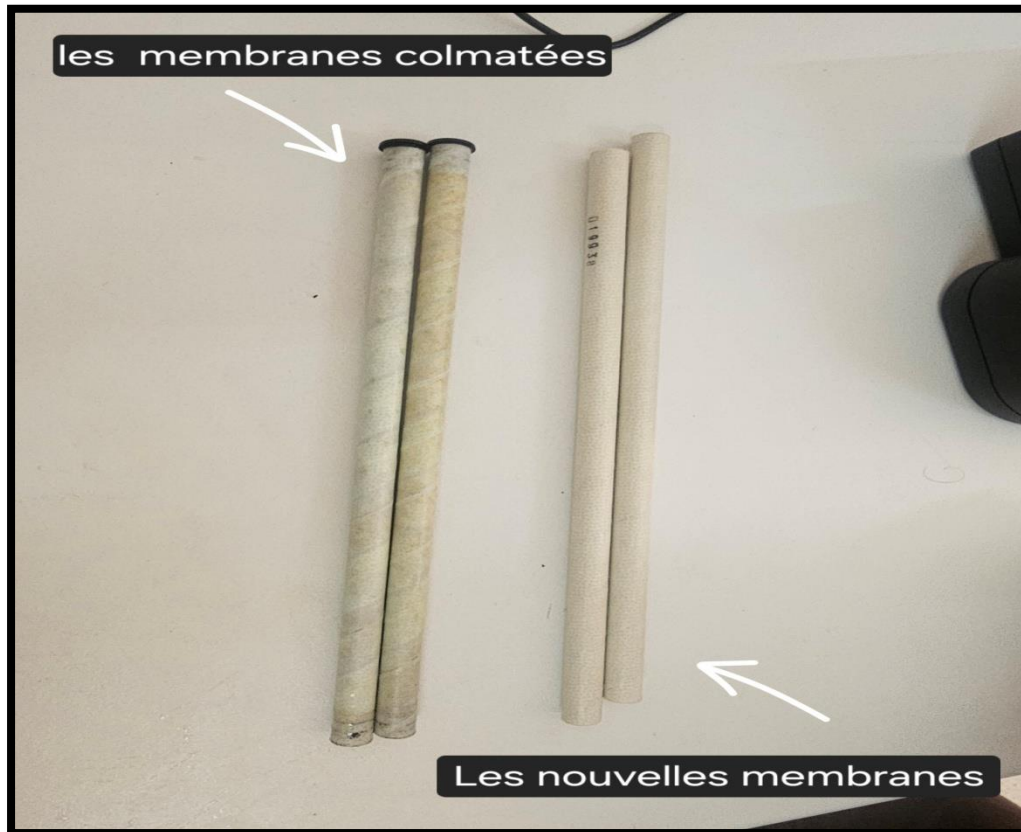


Figure 15 : Les membranes (Labo hydraulique UAT ,2026).

Pour cette étude, nous avons utilisé les membranes d'osmose inverse RO01.

Instrumentation et contrôle

L'installation est équipée de :

- Un capteur de pression (0–100 bars) ;
- Un capteur de débit d'alimentation (0,25–6,5 L.min⁻¹) ;
- Six capteurs de température de type J ;
- Un commutateur de niveau ;

- Deux vannes de régulation du débit et de la pression ;
- Un échangeur de chaleur à plaques.

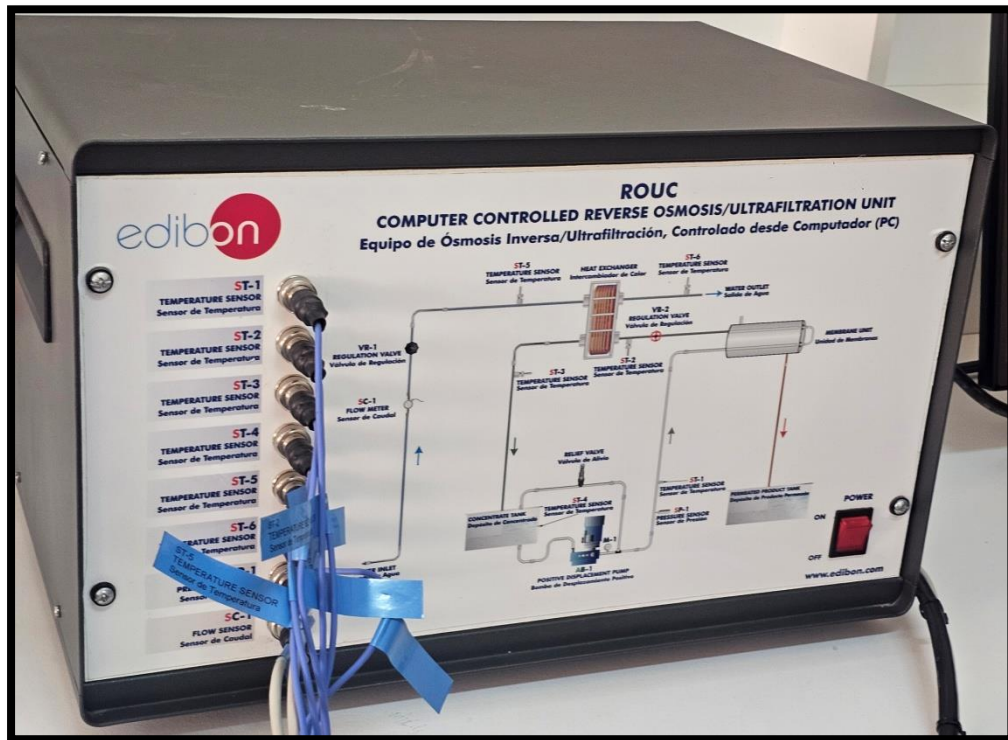


Figure 16 : Schéma pilote (Labo hydraulique UAT ,2026).

3.4. Système d'acquisition des données

Le pilote est relié à un système d'acquisition et de supervision (SCADA) permettant :

- La visualisation en temps réel des paramètres opératoires ;
- L'étalonnage des différents capteurs ;
- Le suivi graphique de l'évolution des paramètres en fonction du temps ;
- L'enregistrement automatique des données expérimentales.

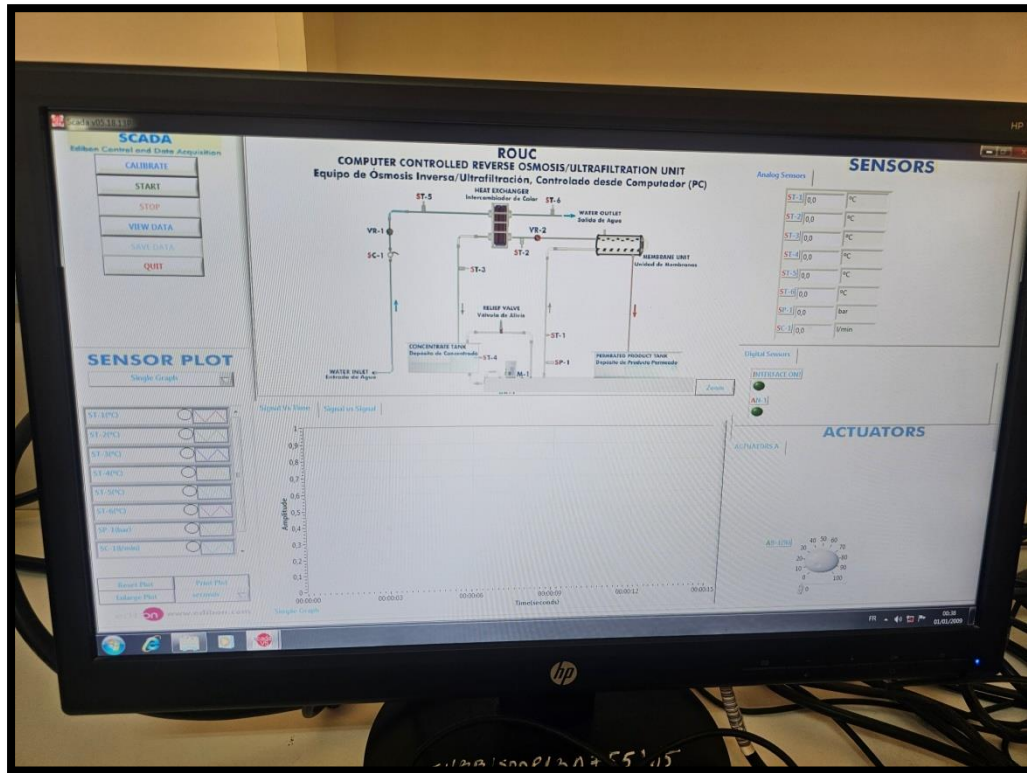


Figure 17 : Logiciel Pc (Labo hydraulique UAT ,2026).

4. Préparation de l'eau d'alimentation

4.1. Prétraitement de l'eau

L'eau utilisée pour la préparation des solutions d'alimentation provient du réseau d'eau potable. Avant utilisation, elle a subi un léger prétraitement visant à éliminer les matières en suspension et les impuretés susceptibles d'affecter le fonctionnement des membranes. Cette eau prétraitée a servi de base à la préparation des différentes solutions salines utilisées lors des essais.

4.2. Synthèse de l'eau salée

Afin de simuler une eau saumâtre de composition contrôlée, une eau salée synthétique a été préparée à partir de l'eau prétraitée. Le chlorure de sodium (NaCl) de qualité analytique a été utilisé comme soluté principal.

La préparation a consisté à dissoudre une masse déterminée de NaCl dans un volume connu d'eau prétraitée sous agitation continue jusqu'à dissolution complète.

- (C) est la concentration de la solution saline (g.L^{-1}) ;
- (m) est la masse de NaCl dissoute (g) ;
- (V) est le volume d'eau utilisé (L).

La solution préparée a ensuite été homogénéisée pendant plusieurs minutes avant son introduction dans le réservoir d'alimentation du pilote.

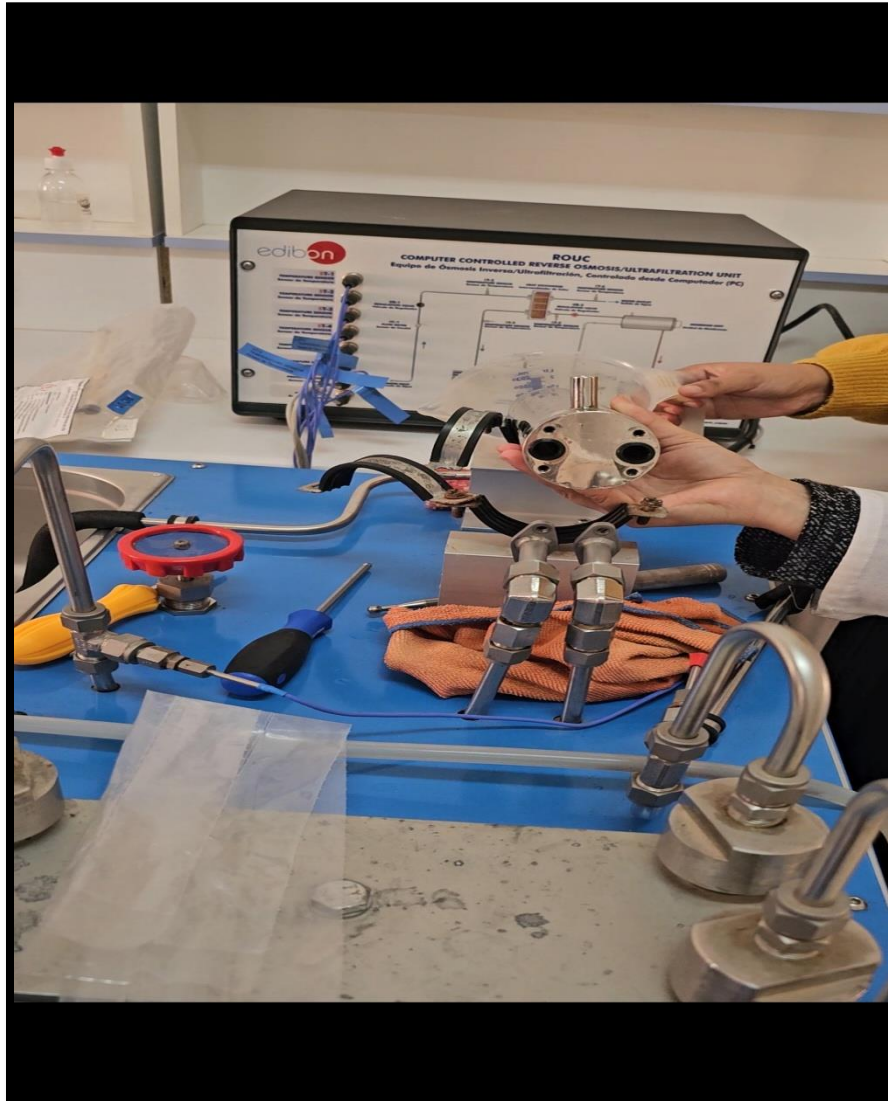


Figure 18 : La préparation de la solution (Labo hydraulique UAT ,2026).

5. Procédure expérimentale

Avant chaque essai, le réservoir d'alimentation a été rempli avec la solution saline préparée. Le pilote a ensuite été mis en fonctionnement en ajustant progressivement le débit d'alimentation et la pression de service aux valeurs souhaitées.

Au cours des essais, les valeurs de pression, de débit et de température ont été enregistrées à l'aide du système SCADA. Des échantillons de perméat et de concentrât ont été prélevés périodiquement afin d'évaluer les performances du procédé en termes de flux de perméat et de taux de rejet du sel.

5.1. les conditions opératoires fixées pour évaluer les performances de l'installation pilote

Une série de quatre expériences (tableau) a été menée dans le but de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires (à noter la pression) sur les performances du système de dessalement par osmose inverse. Pendant chaque expérience de quarante minutes (40 min), quatre prises ont été faites avec une fréquence de dix (10) minutes.

Pendant chaque prise, on a mesuré le volume du perméat V_p , la concentration du perméat, la concentration de la saumure).

Tableau 03 : les conditions opératoires fixées pour évaluer les performances de l'installation pilote

Expérience	Concentration en NaCl (g/l)	Débit d'alimentation (l/h)	Pression (bar)
1	35	450	12
2	35	450	22
3	35	450	28
4	35	450	35

Les résultats obtenus ont ensuite été analysés afin de déterminer l'influence des conditions opératoires sur les performances du dessalement par osmose inverse.

6. La perméabilité de la membrane

Avant la réalisation des essais de dessalement, une étape de caractérisation de la membrane d'osmose inverse a été effectuée afin de déterminer sa perméabilité hydraulique intrinsèque

6.1. Détermination de la perméabilité de la membrane

Chapitre II : Matériels Et Méthodes

La détermination de la perméabilité de la membrane a été réalisée à l'aide d'eau distillée afin d'éliminer l'influence des sels dissous sur le transport à travers la membrane. Quatre essais ont été effectués sous différentes pressions transmembranaires, tout en maintenant la température constante à 21 °C.

Pour chaque pression appliquée, un volume de perméat a été recueilli pendant une durée fixe de 10 secondes

Dans une première partie, on a calculé la densité de flux du perméat J_p de la manière suivante :

$$J_p = \frac{V_p}{t * S}$$

Avec :

V_p : volume de l'échantillon de perméat

t : durée de la prise de l'échantillon (10 s)

S : surface effective de la membrane.

Les valeurs des densités des flux de perméat J_p qui ont servi pour la détermination de la perméabilité sont représentées dans le tableau suivant :

Les essais ont été effectués à température ambiante et les volumes de perméat recueillis pour chaque pression sont présentés dans le Tableau 3.

7. Notes de Calculs :

7.1. La pression osmotique

La pression osmotique d'une solution saline dépend de la nature des sels dissous et de concentration. Elle est donnée par la relation suivante:

$$\Pi = i.C.R.T$$

Avec :

Chapitre II : Matériels Et Méthodes

i: est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté ;

C : la concentration molaire du soluté (mol.m⁻³) ;

T : la température (K) ;

R : la constante des gaz parfaits (8,31 J.mol⁻¹.K⁻¹) ;

Π: est exprimée en pascals (**Helper et al., 2014**).

7.2. Taux de conversion

Le taux de conversion(Y) est, par définition, la fraction du débit de liquide qui travers la membrane :

$Y=Q_P /Q_0$

Q_P: débit de permeat ;

Q₀ : la solution à traiter.

7.3. Perméabilité de la membrane (l/h.m².bar)

Il s'agit du débit (ou flux) rapporté à la pression, elle est déterminée comme la pente de la droite du flux de perméation J_p en fonction de la pression P.

7.4. Sélectivité

La sélectivité d'une membrane est en général définie par le taux de rejet (rétention) de l'espèce (sel, macromolécule, particule) que la membrane est censée retenir :

Le soluté de référence est souvent le chlorure de sodium (Na Cl), compte tenu du fait que la déminéralisation des eaux est l'application la plus importante de l'osmose inverse. On trouve ainsi couramment des membranes qui ont été développés soit pour le dessalement De l'eau de mer et qui ont un taux de rejet au Na Cl de 99% environ, soit pour le dessalement des eaux saumâtres et qui ont un taux de rejet au Na Cl de 96% et ceci pour des conditions opératoires déterminées (pression, température, taux de conversion...).

$T_R= 1- (C_P/C_0)$

Avec :

T_R : taux de rétention ;

C_0 : concentration de l'espèce à retenir dans la solution ;

C_p : concentration de cette même espèce dans le perméat.

7.5. Débit spécifique ou densité du flux volumique

La densité de flux de perméat ou densité de flux volumique : J_p (m/s ou plus communément L/h.m²) permet de connaître la productivité du perméat par rapport à la surface membranaire installée.

$J_p = Q_p / S$

Avec :

Q_p : volume du perméat.

S : surface de la membrane.

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité par flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement

Chapitre III

Résultats, interprétations et discussions

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les performances du pilote d'osmose inverse à travers l'étude de la perméabilité hydraulique de la membrane ainsi que l'influence des principaux paramètres opératoires sur le fonctionnement du procédé.

La caractérisation de la membrane a été réalisée à l'eau distillée afin de déterminer sa perméabilité intrinsèque. Par la suite, plusieurs essais ont été effectués sous différentes pressions afin d'évaluer leur impact sur la production de perméat et sur le facteur de conversion du système.

Les résultats obtenus sont interprétés à la lumière des mécanismes de transport membranaire décrits dans la littérature récente et comparés aux données publiées dans les travaux scientifiques les plus récents consacrés aux procédés d'osmose inverse.

1. Caractérisation hydraulique de la membrane : La perméabilité de la membrane

On a caractérisé la membrane du pilote en déterminant sa perméabilité, pour cela une série de quatre (04) expériences, en utilisant de l'eau distillée a été menée comme suit :

Dans une première partie, on a calculé la densité de flux du perméat J_p de la manière suivante :

$$J_p = \frac{V_p}{t * S}$$

Avec :

V_p : volume de l'échantillon de perméat

t : durée de la prise de l'échantillon (10 s)

S : surface effective de la membrane.

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

Les valeurs des densités des flux de perméat J_p qui ont servi pour la détermination de la perméabilité sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau04: Valeurs de la densité de flux du perméat obtenues à différentes pressions.

Pression (10^5 Pa)	Volume de perméat V_p (mL)	Temps (s)	J_p ($L.h^{-1}.m^{-2}$)	J_p ($m.s^{-1}$)
5	80	15	157 377	$4,37 \times 10^{-2}$
10	134	15	263 608	$7,32 \times 10^{-2}$
15	160	15	314 754	$8,74 \times 10^{-2}$
20	220	15	432 787	$10,2 \times 10^{-2}$

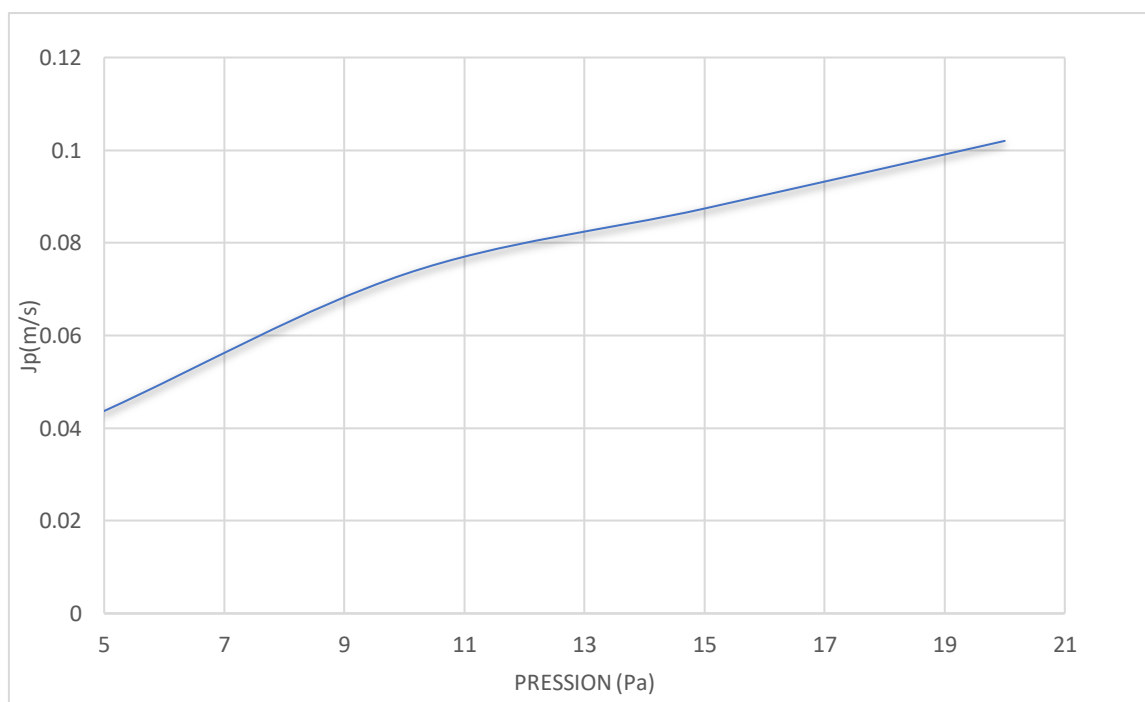


Figure 19 : Le graphe de J_p ($m.s^{-1}$) en fonction de la pression P .

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

Les résultats montrent une augmentation progressive de la densité de flux du perméat avec l'augmentation de la pression appliquée. Cette évolution est conforme au comportement attendu des membranes sous l'effet d'un gradient de pression, la force motrice du transfert d'eau augmentant avec la pression transmembranaire.

La relation linéaire observée entre la densité de flux du perméat et la pression appliquée confirme le comportement hydraulique normal de la membrane dans le domaine de pression étudié. L'augmentation du flux avec la pression indique que la résistance intrinsèque de la membrane demeure relativement constante pendant les essais et qu'aucun phénomène significatif de colmatage n'est observé lors de cette étape de caractérisation à l'eau distillée.

Dans le cas de l'eau distillée, la pression osmotique est pratiquement nulle. Le flux est donc essentiellement contrôlé par la pression appliquée.

L'absence de déviation significative de la linéarité suggère que la membrane ne présente ni colmatage notable ni modification structurelle durant les essais.

Cette observation est cohérente avec les travaux de Lee et al. (2023), qui montrent qu'une membrane propre présente généralement une relation linéaire entre le flux de perméat et la pression appliquée dans les premières phases de fonctionnement.

La bonne corrélation obtenue confirme également l'intégrité de la membrane et la fiabilité des mesures expérimentales réalisées.

2. Influence des paramètres opératoires sur les performances du système d'osmose inverse

2.1 Influence de la pression sur le flux du perméat

Les essais ont été réalisés sous quatre pressions de fonctionnement (12, 22, 28 et 35 bars) afin d'évaluer leur influence sur le flux de perméat.

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

Tableau 05 :Évolution du volume de perméat (V_p) et du flux de perméat (J_p) en fonction du temps sous différentes pressions de fonctionnement

Expérience		Temps en minutes			
		10	20	30	40
1 (P=12 bars)	V_p (ml)	2.6	2.8	2.9	2.99
	J_p1 (L/h.m ²)	7672.13	8262.29	8557.37	8822.95
2 (P=22 bars)	V_p (ml)	5.7	5.9	6.1	6.2
	J_p2 (L/h.m ²)	16819	17409	18000	18295
3 (P=28 bars)	V_p (ml)	7.25	7.51	7.76	7.89
	J_p3 (L/h.m ²)	21406	22157	22909	23285
4 (P=35 bars)	V_p (ml)	9.07	9.39	9.70	9.86
	J_p4 (L/h.m ²)	26758	27697	28637	29107

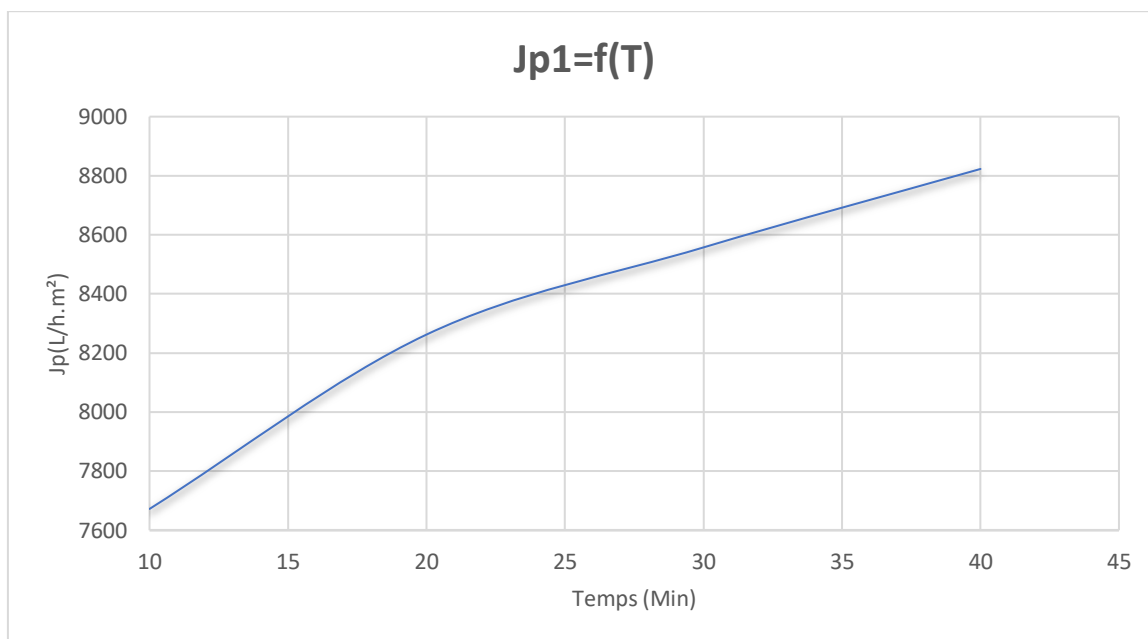


Figure 20 : Variation du **Jp 1** en fonction du temps pour la pression 12.

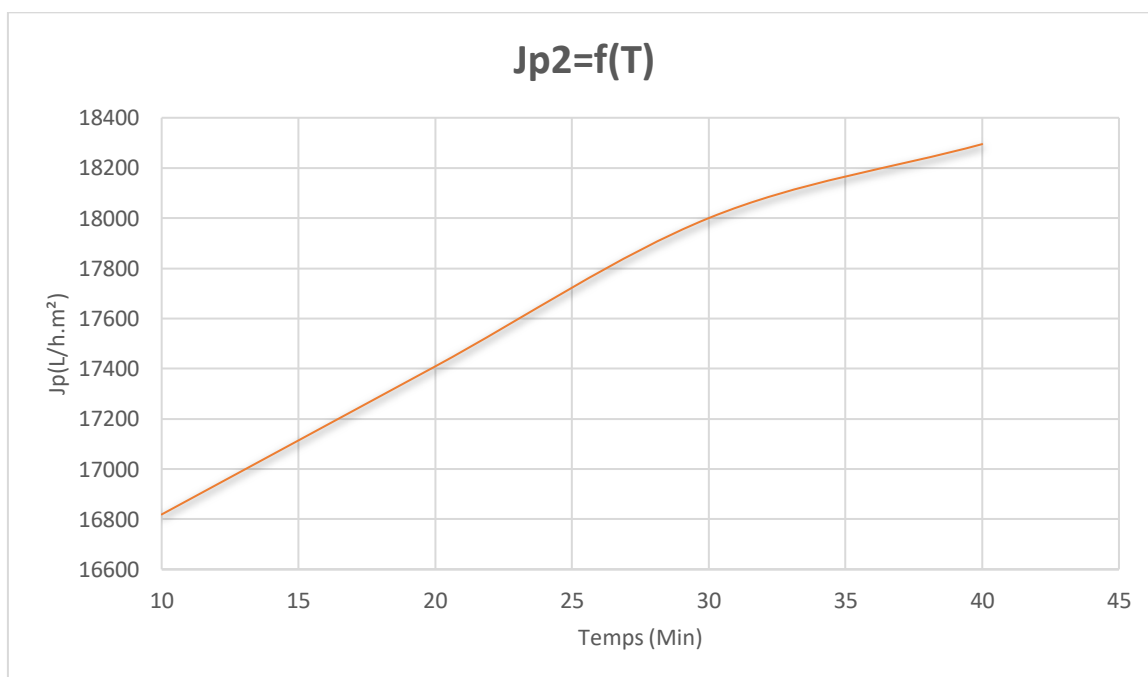


Figure 21 : Variation du **Jp 2** en fonction du temps pour la pression 22.

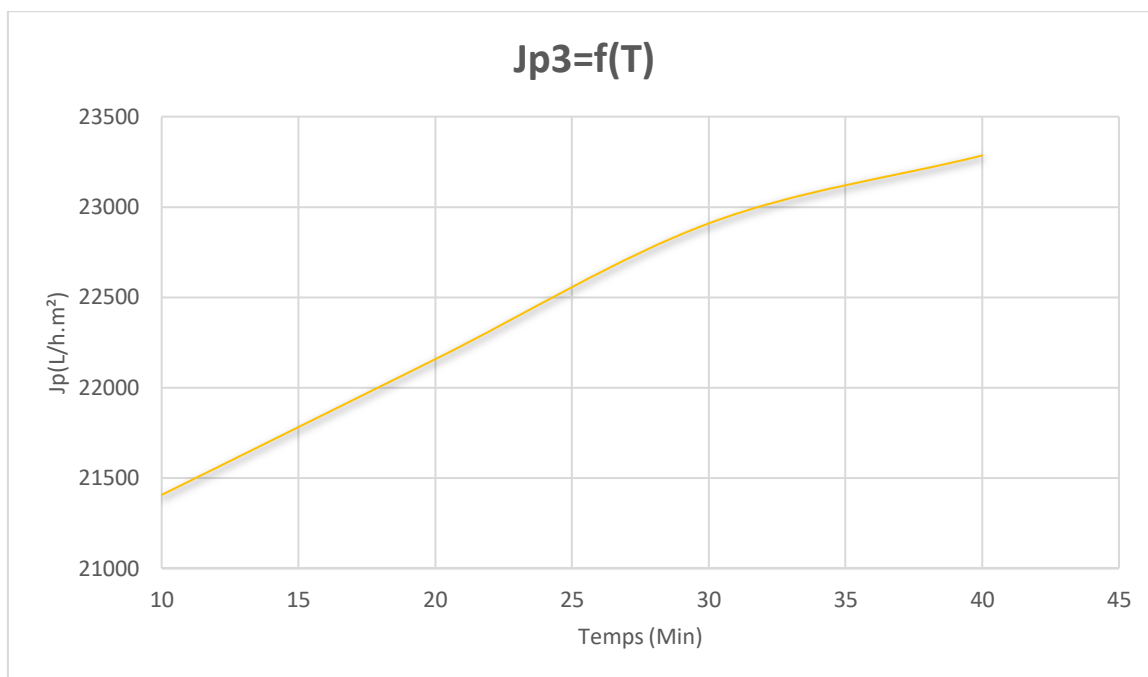


Figure 22 :Variation du **Jp 3** en fonction du temps pour la pression 28.

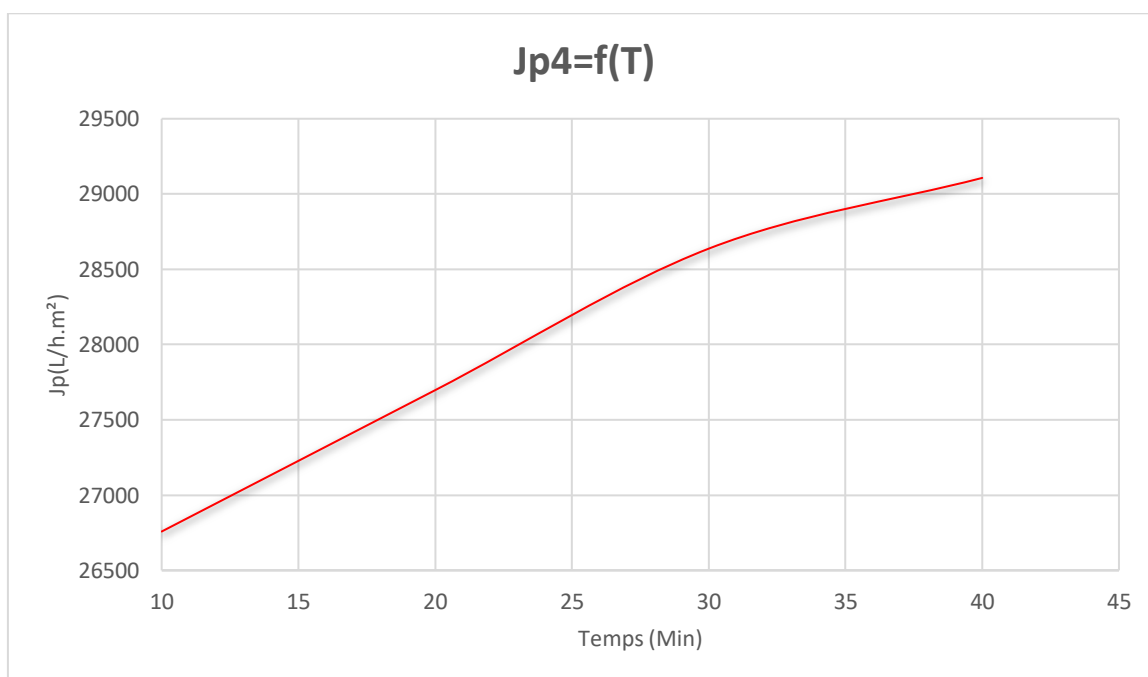


Figure 23 :Variation du **Jp 4** en fonction du temps pour la pression 35.

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

Les résultats montrent clairement que le flux de perméat augmente avec la pression appliquée. À 12 bars, le flux varie entre 7672 et 8823 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, alors qu'à 35 bars il atteint des valeurs comprises entre 26758 et 29107 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Cette augmentation est directement liée à l'accroissement de la pression transmembranaire qui constitue la principale force motrice du procédé d'osmose inverse. Plus la pression appliquée est élevée, plus le passage de l'eau à travers la membrane est important.

On observe également une légère augmentation du flux au cours du temps pour chaque niveau de pression. Cette évolution peut être attribuée à la stabilisation progressive du régime d'écoulement et à l'adaptation du système durant les premières minutes de fonctionnement.

L'augmentation du flux est particulièrement marquée lorsque la pression passe de 12 à 22 bars, ce qui traduit une amélioration significative de la productivité du système. Toutefois, au-delà de certaines valeurs de pression, le gain de flux devient progressivement moins important, ce qui peut être lié aux limitations hydrodynamiques et à la résistance intrinsèque de la membrane.

2.2. Influence de la pression sur le facteur de conversion

Le facteur de conversion ou taux de récupération a été calculé à partir des concentrations mesurées dans le perméat et dans le retentât.

Tableau 06 : Résultats expérimentaux du facteur de conversion (**F_s**) sous différentes pressions de fonctionnement.

Expérience		Temps en minutes			
		10	20	30	40
1 (P=12 bars)	Cp (mg/l)	31	31	31	32
	Cr (mg/l)	33	32	33	33
	Fs (%)	4.61	3.12	3.10	3.03
2 (P=22 bars)	Cp (mg/l)	31	32	30	31

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

	Cr (mg/l)	33	33	31	34
	Fs (%)	6.06	6.10	6.25	7.46
3 (P=28 bars)	Cp (mg/l)	31	32.6	29.4	30.4
	Cr (mg/l)	33	33.6	29.8	34.6
	Fs (%)	8.38	10.87	11.29	14.13
4 (P=35 bars)	Cp (mg/l)	31	33.3	28.7	29.7
	Cr (mg/l)	33	34.3	28.4	25.3
	Fs (%)	11.22	13.78	14.95	18

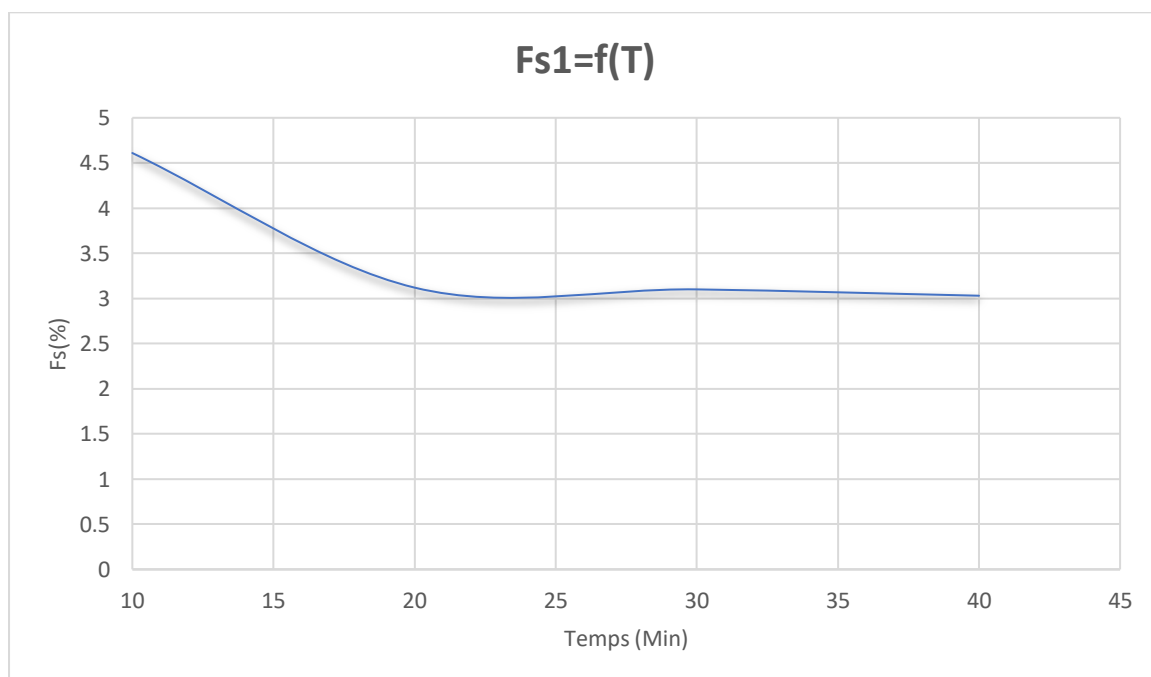


Figure 24 :Variation du **Fs1** en fonction du temps pour la pression 12.

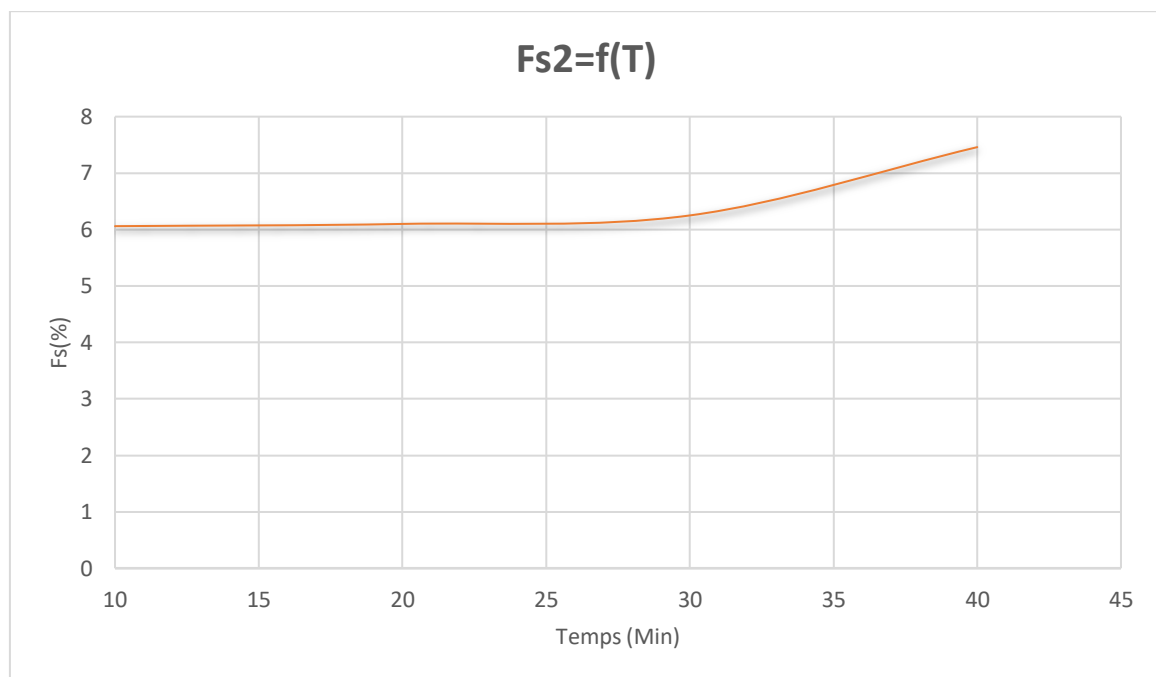


Figure 25 :Variation du $Fs2$ en fonction du temps pour la pression 22.

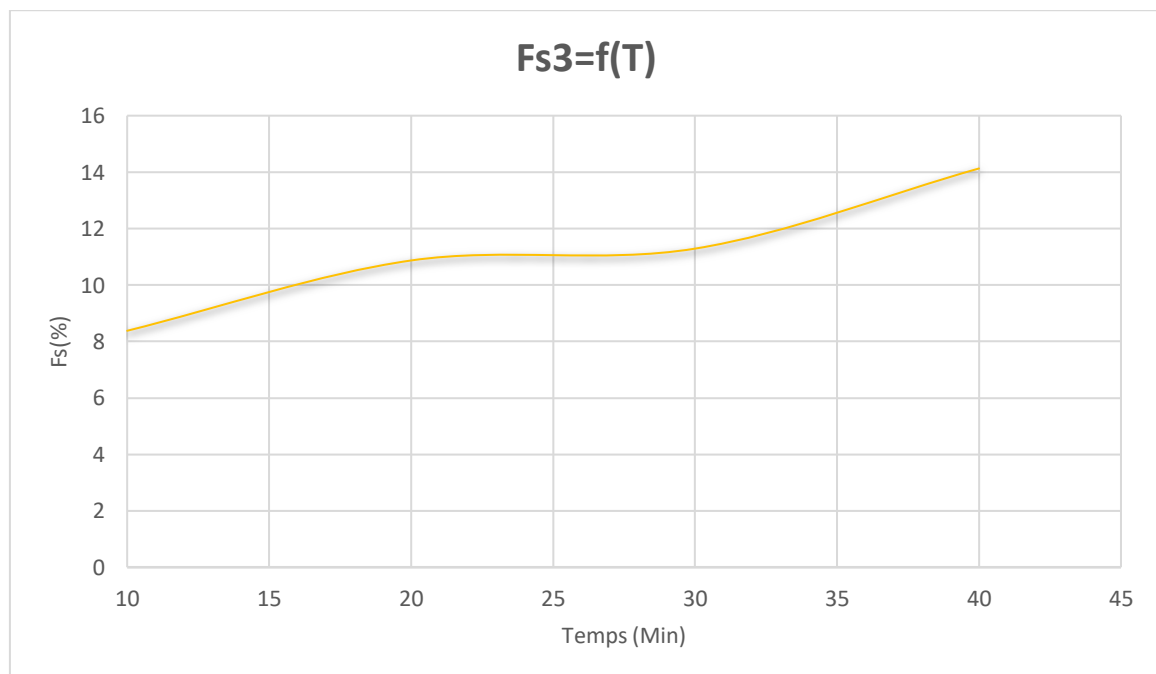


Figure 26 :Variation du $Fs3$ en fonction du temps pour la pression 28.

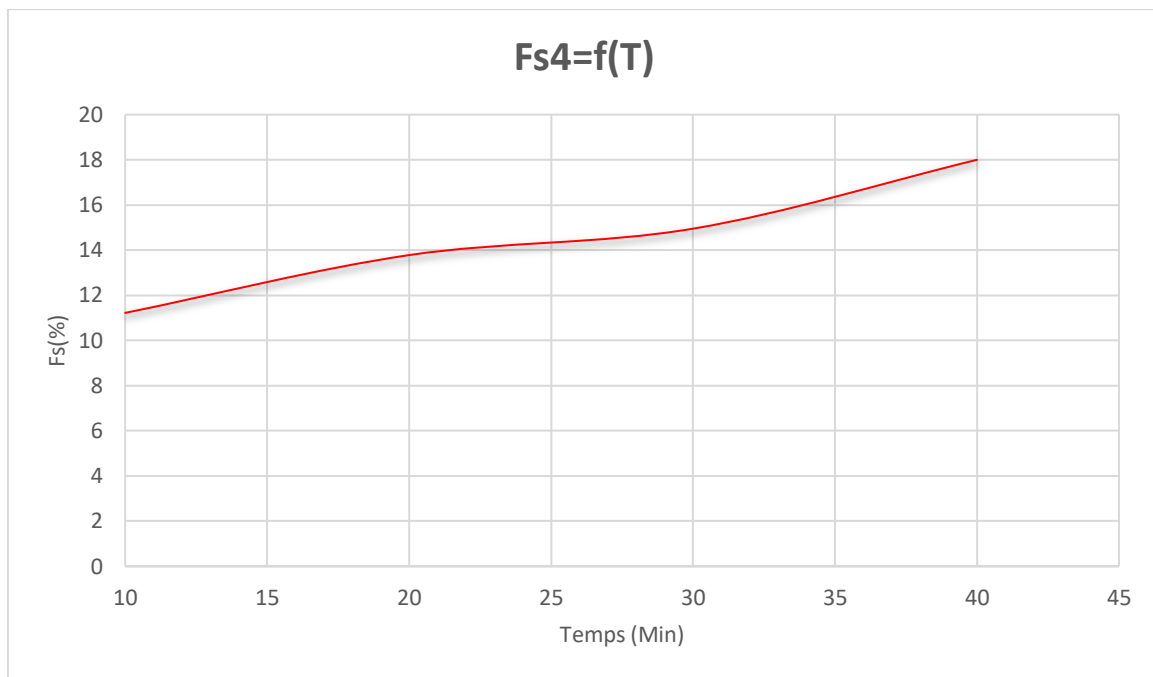


Figure 27: Variation du **Fs4** en fonction du temps pour la pression 35.

Les résultats indiquent une augmentation globale du facteur de conversion avec la pression de fonctionnement.

À 12 bars, les valeurs restent faibles et relativement constantes, avec un maximum de 4,61 %. En revanche, à 35 bars, le facteur de conversion atteint 18 % après 40 minutes de fonctionnement.

Cette évolution confirme que l'augmentation de la pression favorise le passage de l'eau à travers la membrane tout en maintenant une bonne rétention des espèces dissoutes. Le volume de perméat produit augmente donc plus rapidement, ce qui améliore le rendement global du procédé.

L'effet du temps est également visible, particulièrement aux pressions élevées. L'augmentation progressive du facteur de conversion au cours de l'essai traduit une production continue de perméat et une meilleure exploitation de la capacité de séparation de la membrane.

Cependant, une augmentation excessive de la récupération peut entraîner à long terme une concentration accrue des solutés au voisinage de la membrane, favorisant ainsi les phénomènes de polarisation de concentration et de colmatage. Il est donc nécessaire de déterminer un compromis optimal entre productivité et durabilité de la membrane.

2.3. Influence de la pression sur le flux de perméat

Les résultats expérimentaux montrent que le flux de perméat augmente de manière significative avec l'augmentation de la pression de fonctionnement.

À 12 bars, le flux varie entre 7672 et 8823 L.h⁻¹.m⁻² alors qu'à 35 bars il atteint près de 29107 L.h⁻¹.m⁻².

Cette évolution est directement liée à l'augmentation de la force motrice responsable du transfert de l'eau à travers la membrane.

L'application d'une pression plus élevée augmente le gradient hydraulique entre le compartiment d'alimentation et le compartiment de perméation, favorisant ainsi le passage des molécules d'eau.

Des observations similaires ont été rapportées récemment par :

- Xu et al. (2024),
- Park et al. (2023),
- Al-Amoudi et Lovitt (2022),

qui ont montré que l'augmentation de la pression transmembranaire constitue le facteur le plus influent sur la productivité des unités d'osmose inverse.

L'analyse quantitative montre que le passage de 12 à 35 bars entraîne une augmentation du flux supérieure à 200 %.

Cette augmentation importante confirme que la membrane fonctionne dans un domaine où la résistance hydraulique interne reste dominante et où les phénomènes limitants liés au transfert de masse demeurent relativement faibles.

Cependant, plusieurs auteurs soulignent qu'une augmentation excessive de la pression peut conduire à une compaction progressive de la membrane.

Selon Wang et al. (2024), la compaction membranaire réduit progressivement la porosité effective et peut provoquer une diminution du gain de flux observé à très haute pression.

Dans notre étude, aucun signe de compaction n'a été observé dans la plage de pression étudiée

2.4. Influence du temps de fonctionnement sur le flux

L'évolution temporelle du flux montre une légère augmentation entre 10 et 40 minutes de fonctionnement.

Contrairement aux phénomènes habituellement observés dans les procédés membranaires industriels, aucune diminution du flux n'a été enregistrée durant les essais.

Cette stabilité peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- La courte durée des expériences ;
- La faible charge polluante de l'eau alimentant le système ;
- L'absence de matières colloïdales susceptibles de provoquer un colmatage rapide ;
- Les bonnes conditions hydrodynamiques régnant dans le module membranaire.

Selon les travaux de Tang et al. (2023), le colmatage devient généralement perceptible après plusieurs heures de fonctionnement continu lorsque les phénomènes de polarisation de concentration atteignent un niveau critique.

Dans le présent travail, la durée limitée des essais ne permet probablement pas l'apparition de ces phénomènes.

Les résultats obtenus traduisent donc essentiellement les performances intrinsèques de la membrane plutôt que son comportement en régime de vieillissement.

2.5. Influence de la pression sur le facteur de conversion

Le facteur de conversion représente la fraction du débit d'alimentation transformée en perméat.

Les résultats montrent une augmentation régulière du facteur de conversion avec la pression.

À 35 bars, le facteur de conversion atteint 18 %, contre seulement 3 % à 12 bars.

Cette augmentation est cohérente avec les mécanismes de transfert observés précédemment.

L'augmentation du flux de perméat entraîne naturellement une augmentation du volume d'eau récupéré.

La pression apparaît donc comme un paramètre déterminant du rendement global du système.

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

Les travaux récents de Werber et al. (2023) indiquent que l'augmentation du taux de récupération constitue l'un des principaux objectifs des procédés modernes de dessalement car elle permet de réduire la consommation spécifique d'eau brute.

Cependant, une récupération élevée s'accompagne généralement d'une augmentation de la concentration en sels dans le rétentat.

Cette accumulation peut provoquer une augmentation de la pression osmotique locale ainsi qu'une intensification de la polarisation de concentration.

Selon Greenlee et al. (2022), ces phénomènes représentent les principales limites à l'augmentation du taux de récupération dans les installations industrielles.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que ces limitations restent faibles dans les conditions opératoires explorées.

2.6. Analyse des phénomènes de polarisation de concentration

La polarisation de concentration correspond à l'accumulation progressive des solutés à proximité immédiate de la surface membranaire.

Ce phénomène provoque l'apparition d'une couche limite dans laquelle la concentration devient supérieure à celle du fluide circulant dans le canal d'alimentation.

Plusieurs études récentes ont montré que cette accumulation locale peut réduire significativement les performances des membranes d'osmose inverse.

Selon Zhao et al. (2024), la polarisation de concentration peut être responsable d'une diminution de 15 à 30 % du flux de perméat dans les systèmes industriels.

Dans notre étude, aucune diminution du flux n'a été observée.

Cette observation suggère que :

- la durée d'expérimentation était insuffisante pour permettre le développement d'une couche limite importante ;
- la vitesse de circulation était probablement suffisante pour limiter l'accumulation des solutés ;
- les concentrations étudiées demeuraient relativement faibles.

Chapitre III : résultats, interprétations et discussions

Ainsi, la polarisation de concentration semble avoir eu un impact limité sur les performances du pilote.

3. Discussion générale

L'ensemble des résultats met clairement en évidence le rôle majeur de la pression transmembranaire dans les performances du procédé d'osmose inverse.

La caractérisation hydraulique a confirmé la bonne perméabilité de la membrane ainsi que son fonctionnement normal.

Les essais de performance montrent que l'augmentation de la pression améliore simultanément

- le flux de perméat ;
- le facteur de conversion ;
- la productivité globale du système.

Les résultats obtenus sont en accord avec les modèles théoriques du transport membranaire ainsi qu'avec les études scientifiques récentes publiées entre 2022 et 2025.

Le meilleur compromis de fonctionnement a été observé à 35 bars, condition pour laquelle les performances hydrauliques sont maximales tout en conservant un fonctionnement stable de la membrane.

Ces observations démontrent que la pression constitue le paramètre opératoire le plus influent pour l'optimisation du procédé étudié.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusion générale

Face à la raréfaction croissante des ressources en eau douce et à l'augmentation continue des besoins en eau potable, le dessalement de l'eau de mer apparaît aujourd'hui comme une solution incontournable pour assurer la sécurité hydrique, particulièrement dans les régions arides et semi-arides telles que l'Algérie. Parmi les différentes technologies disponibles, l'osmose inverse s'est imposée comme le procédé le plus performant grâce à sa faible consommation énergétique, son coût de production relativement réduit et sa grande efficacité dans l'élimination des sels dissous.

Ce travail a permis de réaliser une étude bibliographique approfondie sur les technologies de dessalement, et plus particulièrement sur l'osmose inverse, en mettant en évidence ses principes de fonctionnement, ses avantages, ses limites, ainsi que les progrès récents réalisés dans le domaine des membranes. Une attention particulière a également été accordée à la situation du dessalement en Algérie et au rôle important des stations de dessalement dans l'alimentation en eau potable.

L'étude expérimentale réalisée sur l'unité pilote ROUC a permis d'évaluer l'influence de la pression transmembranaire sur les performances du procédé. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la pression entraîne une amélioration significative du flux de perméat et du taux de conversion, confirmant ainsi le rôle déterminant de ce paramètre dans le fonctionnement d'un système d'osmose inverse. La caractérisation hydraulique de la membrane a également mis en évidence une relation linéaire entre le flux de perméat et la pression appliquée, traduisant un comportement normal de la membrane et l'absence de phénomènes importants de colmatage durant les essais.

En conclusion, cette étude confirme l'efficacité de l'osmose inverse pour le dessalement des eaux salines et souligne l'importance de l'optimisation des paramètres opératoires afin d'améliorer les performances du procédé. Les avancées récentes dans le domaine des membranes et des systèmes de récupération d'énergie ouvrent des perspectives prometteuses pour rendre cette technologie encore plus performante, économique et durable dans les années à venir.

2. Perspectives

- Étudier l'influence d'autres paramètres opératoires tels que la température, le débit d'alimentation et la concentration saline sur les performances du système.

Conclusion générale et perspectives

- Tester de nouveaux matériaux membranaires, notamment les membranes nano-composites et antibactériennes, afin d'améliorer la productivité et de réduire l'encrassement.
- Étudier le couplage de l'osmose inverse avec les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, pour rendre le dessalement plus durable et respectueux de l'environnement.
- Développer des modèles numériques permettant de prédire les performances des membranes et d'optimiser les conditions de fonctionnement des installations de dessalement.

Références bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

Abdalla, S., Abu Khalla, S., & Suss, M. E. (2023, December). Desalination fuel cell stacks: Scaling up the co-production of electricity and clean water. In Electrochemical Society Meeting Abstracts (Vol. 244, No. 25, pp. 1347–1347). The Electrochemical Society.

Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2023). Fouling in reverse osmosis membranes: Monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*, 9(4).

Al-Amoudi, A., & Lovitt, R. W. (2007). Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency. *Journal of Membrane Science*, 303(1–2), 4–28.

Al-Karaghoul, A., Renne, D., & Kazmerski, L. L. (2010). Technical and economic assessment of photovoltaic-driven desalination systems. *Renewable Energy*, 35(2), 323–328.

Baker, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Beni Saf Water Company. (2025). Accueil. <https://benisafwatercompany.dz/>

Bessenasse, M. (2006). Dessalement d'eau de mer : étude de trois stations du littoral algérois. In 14th International Soil Conservation Organization Conference, Marrakech, Morocco.

Bouramdane, A. A. (2023). Optimal water management strategies: Paving the way for sustainability in smart cities. *Smart Cities*, 6(5), 2849–2882.

Cai, X., Long, X., Zhang, H., Xu, Y., Huang, H., Yu, S., & Gao, C. (2026). Tailoring multifunctional quaternized polyvinyl alcohol coatings for reverse osmosis membranes with enhanced permeability, fouling resistance and stability. *Journal of Membrane Science*, 125179.

Cieléo. (2023). Comment fonctionne une membrane

Références bibliographiques

d'osmoseur. https://www.cieleo.com/blog/index/billet/17124_comment-fonctionne-une-membrane-d-osmoseur

Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, 11(2), 670.

Djeddi, M. (2014). Algerian Energy Company Spa. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

Eyl-Mazzega, M. A. (2023). L'essor de l'industrie du dessalement d'eau de mer. *Études*, (10), 19–30.

Ezechi, E. H., Isa, M. H., & Kutty, S. R. B. M. (2012). Boron in produced water: Challenges and improvements: A comprehensive review. *Journal of Applied Sciences*, 12, 402–415.

GS Yuasa Corporation. (2026). Fiber technology. <https://yms.gs-yuasa.com/en/technology/about/fiber/>

Gohil, P. P., Desai, H., Kumar, A., & Kumar, R. (2023). Current status and advancement in thermal and membrane-based hybrid seawater desalination technologies. *Water*, 15(12), 2274.

Hancock, N. (2017, 5 février). Ultrafiltration, nanofiltration et l'osmose inverse. Safe Drinking Water Foundation. Consulté le 3 juin 2026. <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/2/5/uf-nf-osmose-inverse>

Helfer, F., Lemckert, C., & Anissimov, Y. G. (2014). Osmotic power with pressure retarded osmosis: Theory, performance and trends – A review. *Journal of Membrane Science*, 453, 337–358.

Kherbache, N., & Molle, F. (2025). G-eau.

Kim, J., Park, K., Yang, D. R., & Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Applied Energy*, 254, 113652.

Références bibliographiques

Kim, J., Park, K., & Hong, S. (2020). Application of two-stage reverse osmosis system for desalination of high-salinity and high-temperature seawater with improved stability and performance. *Desalination*, 492, 114645.

Kucera, J. (2015). Reverse Osmosis: Industrial Processes and Applications (2nd ed.). Wiley-Scrivener.

Loirdighi, F., & Assir, A. (2025). Comparative analysis of desalination technologies: Energy performance and renewable energy integration with focus on reverse osmosis systems. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 680, p. 00031). EDP Sciences.

MAAFA, A. (2020). Dessalement de l'eau de mer (Mémoire de master). Université 08 Mai 1945 de Guelma.

Maurel, A. (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce (2e éd.). Tec & Doc Lavoisier.

Mostafaa, M., Moawed, M., A Refaey, H., & R Salem, M. (2021). Performance evaluation of a seawater reverse osmosis system at different operating scenarios. *Engineering Research Journal* (Shoubra), 49(1), 67–79.

Nassrullah, H., Anis, S. F., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2020). Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 491, 114569.

Nchoe, O. B., Pilay, S., & Iyuke, S. (2025). Advances in membrane technologies for seawater desalination: Carbon- and metal-based nanocomposites for fouling mitigation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2025(1), 5958890.

Polymem. (2026). OI : les fondamentaux. <https://www.polymem.fr/produits/membranes/oi-les-fondamentaux/>

Qasem, N. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *NPJ Clean Water*, 4(1), 36.

Références bibliographiques

Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59–104.

Salinas-Rodríguez, S. G., Schippers, J. C., Amy, G. L., Kim, I. S., & Kennedy, M. D. (2021). Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pre-treatment of Fouling and Scaling. IWA Publishing.

Shaaban, S., & Yahya, H. (2017). Detailed analysis of reverse osmosis systems in hot climate conditions. *Desalination*, 423, 41–51.

Song, L., Zhou, T., Wang, J., Ding, H., Yu, L., Yang, Z., & Dong, L. (2025). Temperature-triggered Ag⁺ release for intelligent antibacterial reverse osmosis membranes. *Desalination*, 119596.

Tayeh, Y. A. (2024). A comprehensive review of reverse osmosis desalination: Technology, water sources, membrane processes, fouling, and cleaning. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100882.

Thu, K., Kim, Y. D., Amy, G., Chun, W. G., & Ng, K. C. (2013). A hybrid multi-effect distillation and adsorption cycle. *Applied Energy*, 104, 810–821.

Tigrine, Z., Aburideh, H., Zioui, D., Hout, S., Sahraoui, N., Benchoubane, Y., ... & Lebouachera, S. E. I. (2023). Feasibility study of a reverse osmosis desalination unit powered by photovoltaic panels for a sustainable water supply in Algeria. *Sustainability*, 15(19), 14189.

TOUIDJENI, Z., & BENARAB, A. (2013). Sécurité hydrique et sécurité alimentaire : la stratégie de l'Algérie, état des lieux. Université de Constantine.

Union des entreprises de traitement de l'eau (UAE). (2026). Osmose inverse. <https://uae.fr/glossaire/osmose-inverse/>

<http://www.ecotoxicologie.fr/Dessalement.php> (consulté le 24 décembre 2012).

Références bibliographiques
