

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire de Master Professionnel

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Dessalement et Traitement des Eaux

Thème:

Conception et dimensionnement d'un système d'OI par IMS-design

Présenté par :

DRICI Bilel

Encadré par :

Dr. BOUGHRARA Boudjema

Soutenue le : 17/06/2026 devant le jury composé de :

Dr. OTMANI Lhadi	Président	MCB	Université Chadli ben Djedid El-Tarf
Dr. BOUOUDEN Walid	Examineur	MCB	Université Chadli ben Djedid El-Tarf
Dr. BOUGHRARA Boudjema	Encadreur	MCA	Université Chadli ben Djedid El-Tarf

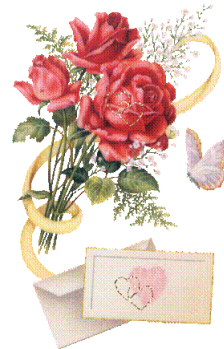
DEDICACE

Je dédie ce travail tout d'abord à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a guidé, m'a éclairé le chemin et m'a donné la force nécessaire pour mener à bien ce travail.

*Je dédie également ce travail à **mes parents**, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours. Une pensée particulière va aussi à **ma femme**, pour sa patience, son encouragement et sa présence à mes côtés.*

*Je le dédie également à mon **frère Rafik** ainsi qu'à **mes sœurs**, pour leur soutien et leur affection.*

*Enfin, je dédie ce travail à **ma famille**, à mes amis **Hichem, Zinou et Anes**, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*



 **Billel**

Remerciements

Avant tout, nous remercions **Dieu le Tout-Puissant** qui nous a éclairé le chemin et nous a donné la force nécessaire pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur **BOUGHRARA Boudjema**, qui a accepté de suivre, d'encadrer et d'évaluer ce travail. Nous lui adressons nos sincères remerciements et notre profond respect pour son aide, ses conseils et son accompagnement tout au long de ce projet.

Nous remercions également le département **de Génie des Procédés**, ainsi que tous les **enseignants** qui ont contribué à notre formation, et les membres du jury qui ont accepté d'évaluer et de valider ce travail.



Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Billel

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE	
Remerciements	
TABLE DES MATIÈRES	i
Liste des Tableaux	Error! Bookmark not defined.
Listes abervations	Error! Bookmark not defined.
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 : PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DE MER ET OSMOSE INVERS	
1.1. Propriétés physico-chimiques de l'eau de mer	4
1.1.1. Définition et répartition mondiale.....	4
1.1.2. Composition ionique, salinité, alcalinité et dureté.....	5
1.1.3. Distribution spatiale de la salinité	7
1.1.4. Stratification thermique des océans	8
1.1.5. Cycle hydrologique.....	9
1.1.6. Grandeurs physiques caractéristiques.....	10
1.2. Osmose inverse	13
1.2.1. Définition de l'osmose	13
1.2.2. Définition de l'osmose inverse	14
1.2.3. Les différents types d'osmose inverse	15
1.2.4. Schéma d'une installation d'osmose inverse	16
1.2.5. Applications de l'osmose inverse	16
1.2.6. Éléments membranaires pour l'osmose inverse (RO)	17
1.2.7. Éléments membranaires pour la nanofiltration (NF)	19
1.2.8. Éléments membranaires pour l'ultrafiltration (UF)	21
1.2.9. Comparaison des procédés membranaires.....	22
CHAPITRE2 : SIMULATION DES PROCÉDÉS D'OSMOSE INVERSE PAR IMS DESIGN	
2.1. Définition de la simulation de processus	25
2.2. Présentation du logiciel IMS Design	26
2.3. Paramètres de fonctionnement du logiciel IMS Design	29
2.3.1. Paramètres de l'eau d'alimentation	29
2.3.2. Paramètres opérationnels	29
2.3.3. Contraintes techniques	30
2.4. Étapes de simulation	30
2.5. Technologies complémentaires	32
2.5.1. Récupération d'énergie (ERD).....	32
2.5.2. Gestion des concentrats	33
CHAPITRE3 : RÉSULTATS ET ANALYSE DES PERFORMANCES MEMBRANAIRES	
3.1. Déroulement d'une simulation.....	35

3.2. Résultats détaillés des simulations	38
3.3. Synthèse des résultats numériques	67
3.4. Discussion des résultats	69
3.5. Évaluation de la qualité d'eau filtrée	70
3.6. Analyse des processus et synthèse comparative	70
CONCLUSION GÉNÉRALE	
<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i>	
<i>Résumé :</i>	

Figure 1. Répartition de l'eau douce et de l'eau salée sur Terre.....	5
Figure 2. Ions principaux présents dans l'eau de mer	7
Figure 3. Variation de la salinité en fonction de la latitude	8
Figure 4. Profil thermique de l'océan selon la profondeur.....	9
Figure 5. Cycle hydrologique global de l'eau	10
Figure 6. Relation entre l'alcalinité, le pH et le risque d'entartrage (LSI)	11
Figure 7. Influence de la température sur le flux de perméat normalisé	12
Figure 8. Principe de l'osmose naturelle	14
Figure 9. Principe de l'osmose inverse sous pression.....	15
Figure 10. Schéma fonctionnel d'une unité d'osmose inverse.....	16
Figure 11. Structure microscopique d'une membrane semi-perméable.....	18
Figure 12. Configuration d'un module membranaire spiralé	19
Figure 13. Configuration d'un module à fibres creuses (souvent utilisé en NF et UF)	20
Figure 14. Configuration d'un module tubulaire (adaptée aux eaux très chargées)	21
Figure 15. Échelle comparative des tailles de pores : MF, UF, NF et RO	23
Figure 16. Sélectivité des membranes RO, NF et UF	23
Figure 17. Principe général de la simulation de processus	26
Figure 18. Interface principale du logiciel IMS Design	27
Figure 19. Organigramme des étapes de simulation sous IMS Design	32
Figure 20. Schéma d'un système d'osmose inverse avec récupérateur d'énergie (ERD)	33
Figure 21. Saisie des paramètres de l'eau d'alimentation.....	36
Figure 22. Configuration du système	36
Figure 23. Résultats du calcul.....	37
Figure 24. Post-traitement et analyse énergétique.....	37

Tableau 1 : Composition chimique moyenne de l'eau de mer.....	6
Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques de l'eau de mer à 25 °C.....	13
Tableau 3 : Classification des eaux selon leur salinité	17
Tableau 4 : Comparaison technique des procédés MF, UF, NF et RO	22
Tableau 5 : Caractéristiques techniques des membranes SWC	28
Tableau 6 : Performances des membranes sans ERD (Basic Design)	76
Tableau 7: Performances des membranes avec ERD (Pressure/Work Exchanger)	77
Tableau 8: TDS du perméat et conformité OMS (avec ERD)	78
Tableau 9 : Synthèse comparative des cinq membranes (avec ERD)	80

BWRO	Brackish Water Reverse Osmosis (Osmose inverse pour eau saumâtre)
CIP	Cleaning In Place (Nettoyage en place)
ERD	Energy Recovery Device (Récupérateur d'énergie)
IMS Design	Integrated Membrane System Design
LD	Low Differential / Low Fouling (Faible perte de charge)
LSI	Langelier Saturation Index (Indice de saturation de Langelier)
MAX	Membrane optimisée haute performance
MF	Microfiltration
NF	Nanofiltration
OI	Osmose inverse
OMS	Organisation mondiale de la santé
pH	Potentiel hydrogène
PX	Pressure Exchanger (Échangeur de pression)
RO	Reverse Osmosis (Osmose inverse)
SEC	Specific Energy Consumption (Consommation énergétique spécifique)
SWC	Sea Water Cap (Membrane pour eau de mer)
TDS	Total Dissolved Solids (Solides dissous totaux)
UF	Ultrafiltration
ZLD	Zero Liquid Discharge (Zéro rejet liquide)

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

L'eau est une ressource essentielle à la vie humaine, au développement économique et à la stabilité des écosystèmes. Pourtant, seulement 2,5 % de l'eau présente sur Terre est douce, et plus des deux tiers de cette fraction sont piégés sous forme de glaces polaires et de glaciers. L'eau douce directement accessible à l'homme ne représente ainsi qu'une infime partie des ressources mondiales. Face à la croissance démographique, à l'industrialisation et aux effets du changement climatique, la pression sur les ressources en eau conventionnelles ne cesse d'augmenter, rendant indispensable le recours à des sources non conventionnelles, parmi lesquelles le dessalement de l'eau de mer occupe une place centrale.

L'eau de mer couvre 71 % de la surface terrestre et représente 97,5 % de l'eau totale de la planète. Sa salinité moyenne est de 35 g/L, avec une pression osmotique d'environ 28 bars à 25 °C. Parmi les technologies de dessalement, l'osmose inverse (OI) s'est imposée comme la solution la plus performante et la plus répandue, permettant d'atteindre des taux de rejet des sels supérieurs à 99,4 % et de produire une eau parfaitement conforme aux normes de potabilité de l'Organisation mondiale de la santé (TDS < 500 mg/L). Cependant, la conception d'une installation d'osmose inverse nécessite une maîtrise fine des propriétés physico-chimiques de l'eau de mer (température, pH, alcalinité, dureté, composition ionique), ainsi qu'une compréhension approfondie des phénomènes de transport membranaire, des risques d'entartrage, notamment carbonaté, et des performances énergétiques.

Dans ce contexte, l'utilisation d'outils de simulation numérique est devenue incontournable pour le dimensionnement et l'optimisation des procédés membranaires. Le logiciel IMS Design (Hydranautics / Nitto Denko), gratuit et largement utilisé en bureau d'études, permet de modéliser avec précision le comportement des membranes, de prédire la qualité du perméat, la consommation énergétique spécifique (SEC) et les risques d'entartrage, tout en intégrant des options avancées comme les récupérateurs d'énergie (ERD), capables de réduire la SEC de 28 à 30 %.

Le présent travail s'inscrit dans cette démarche de conception assistée par simulation. L'objectif principal est de dimensionner un système d'osmose inverse pour le dessalement d'eau de mer en comparant cinq membranes commerciales de la série SWC (SWC4-LD, SWC4 MAX, SWC5-LD, SWC5 MAX et SWC6 MAX), selon deux configurations : sans et avec récupération d'énergie. L'étude vise à identifier la membrane offrant le meilleur compromis entre qualité d'eau produite, consommation énergétique et contraintes opérationnelles.

Pour ce faire, le mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les propriétés physico-chimiques essentielles de l'eau de mer ainsi que les principes fondamentaux de l'osmose inverse, de la nanofiltration (NF) et de l'ultrafiltration (UF).

Le deuxième chapitre décrit la méthodologie de simulation sous IMS Design, les paramètres d'entrée, les étapes de calcul et les technologies complémentaires (ERD, gestion des concentrats).

Le troisième chapitre expose les résultats détaillés des simulations, analyse les performances selon la pression d'alimentation, le TDS du perméat, la SEC et l'indice LSI, puis propose une membrane recommandée ainsi que des préconisations opérationnelles pour le prétraitement, la maintenance et la gestion des saumures.

Cette étude, à la fois théorique et appliquée, fournit ainsi une base méthodologique solide pour le dimensionnement rationnel d'une unité de dessalement par osmose inverse, en parfaite adéquation avec les pratiques industrielles actuelles.

***CHAPITRE 1 : PROPRIÉTÉS
PHYSICO-CHIMIQUES DE
L'EAU DE MER ET OSMOSE
INVERS***

Introduction

L'eau de mer constitue une ressource abondante mais salée, dont le dessalement est indispensable pour répondre aux besoins en eau douce. L'osmose inverse est aujourd'hui la technologie la plus performante pour y parvenir.

Ce chapitre en pose les bases théoriques. La première section présente les propriétés physico-chimiques essentielles de l'eau de mer : composition ionique, salinité, température, pH, alcalinité, dureté et pression osmotique.

La seconde section décrit le principe de l'osmose inverse, ses différentes gammes de pression, les caractéristiques des membranes (RO, NF, UF) et leurs applications. Ces connaissances fondamentales sont nécessaires avant d'aborder, dans le chapitre suivant, la simulation et le dimensionnement d'une installation.

1.1. Propriétés physico-chimiques de l'eau de mer

1.1.1. Définition et répartition mondiale

L'eau de mer est une solution aqueuse complexe contenant une grande variété de sels minéraux dissous, de gaz dissous (oxygène, dioxyde de carbone) et de matières organiques en suspension [3]. Elle couvre environ 71 % de la surface terrestre et représente 97,5 % des ressources en eau de la planète [3]. Cette répartition montre que l'eau douce accessible à l'homme est extrêmement limitée, puisqu'elle ne représente que 2,5 % de l'eau totale, dont une grande partie est piégée dans les glaciers et les calottes polaires. Cette rareté justifie le développement des technologies de dessalement, au premier rang desquelles l'osmose inverse [3].

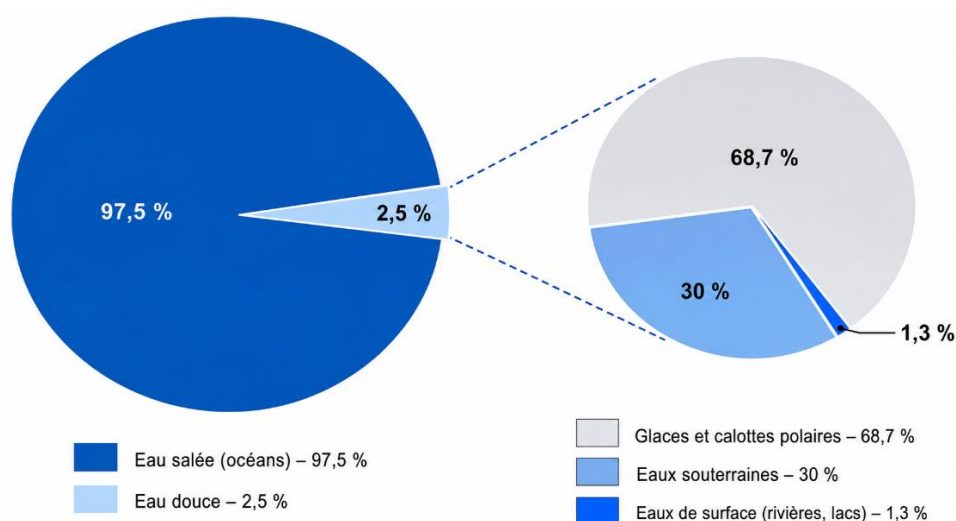


Figure 1. Répartition de l'eau douce et de l'eau salée sur Terre

1.1.2. Composition ionique, salinité, alcalinité et dureté

La salinité moyenne de l'eau de mer est d'environ 35 grammes par litre (g/L), soit 3,5 % de sels dissous. La salinité est définie comme la quantité totale de sels dissous dans un kilogramme d'eau de mer, exprimée en grammes par kilogramme (g/kg) ou en parties par mille (‰) [4]. Les principaux ions présents sont le chlorure (Cl^-) et le sodium (Na^+), qui représentent à eux seuls plus de 85 % de la masse totale des sels dissous. Le chlorure est présent à une concentration d'environ 19 000 mg/L, tandis que le sodium atteint 10 500 mg/L [4]. Les autres ions comme le sulfate (2 700 mg/L), le magnésium (1 350 mg/L), le calcium (400 mg/L) et le potassium (380 mg/L) sont présents en quantités moindres mais jouent un rôle important dans les phénomènes d'entartrage (dépôts de sels minéraux) et de colmatage (accumulation de matières organiques ou colloïdales) des membranes [4].

L'alcalinité de l'eau de mer est principalement due aux ions bicarbonate (HCO_3^- , 140 mg/L) et carbonate (CO_3^{2-}). Sa valeur typique est d'environ 2,5 meq/L (soit environ 125 mg/L en équivalent CaCO_3) [4]. L'alcalinité est un paramètre critique car elle est directement liée au risque d'entartrage carbonaté (CaCO_3) sur les membranes [5].

La dureté totale est définie comme la concentration en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). Dans l'eau de mer, la dureté totale est d'environ 6 500 mg/L en équivalent CaCO_3 [4].

La dureté contribue à l'entartrage (CaCO_3 , CaSO_4) et nécessite un prétraitement chimique (ajout d'antitartre ou adoucisseur) [5].

Ion	Symbole	Concentration (mg/L)	Pourcentage (%)
Chlorure	Cl^-	19 000	55,0
Sodium	Na^+	10 500	30,6
Sulfate	SO_4^{2-}	2 700	7,7
Magnésium	Mg^{2+}	1 350	3,7
Calcium	Ca^{2+}	400	1,2
Potassium	K^+	380	1,1
Bicarbonate	HCO_3^-	140	0,4
Autres	-	530	1,5
Total	-	35 000	100

Tableau 1. Composition chimique moyenne de l'eau de mer

Le tableau ci-dessus montre clairement la dominance des ions chlorure et sodium dans l'eau de mer. Cette composition ionique est fondamentale car elle détermine la pression osmotique de l'eau de mer, qui est d'environ 28 bars à 25 °C [4].

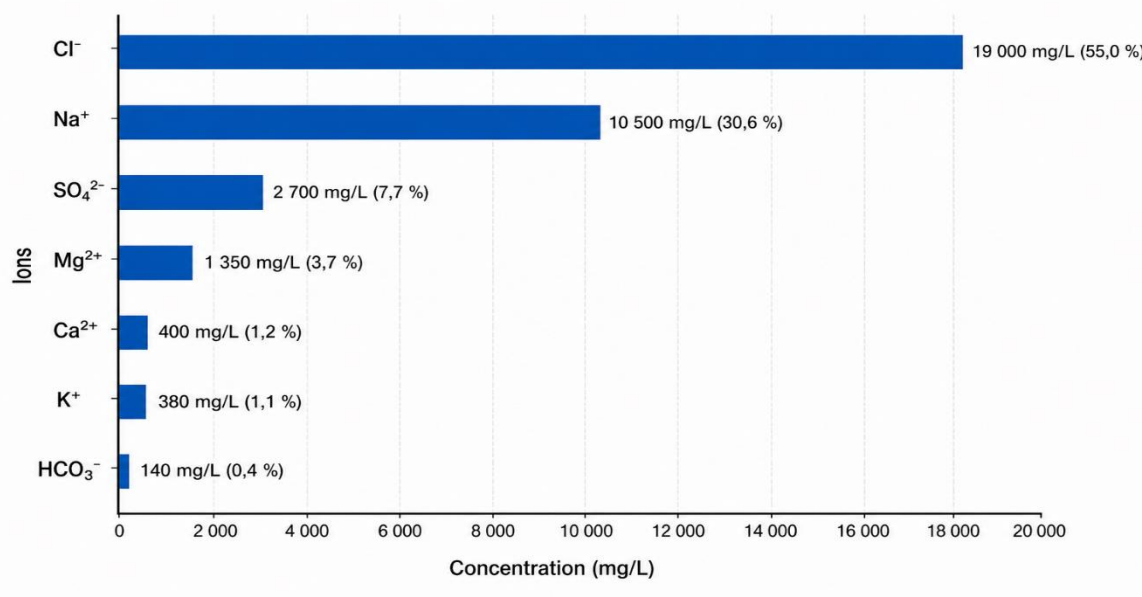


Figure 2. Ions principaux présents dans l'eau de mer

1.1.3. Distribution spatiale de la salinité

La salinité de l'eau de mer n'est pas uniforme à la surface du globe. Elle varie principalement en fonction de la latitude, de l'évaporation, des précipitations et de l'apport d'eau douce par les rivières [4]. Aux latitudes tropicales (environ 30° Nord et Sud), l'évaporation intense concentre les sels, augmentant la salinité jusqu'à 37 ‰. Aux latitudes équatoriales, les précipitations abondantes diluent l'eau, diminuant la salinité à environ 34 ‰. Aux pôles, la fonte des glaces réduit la salinité locale à environ 32 ‰ [4].

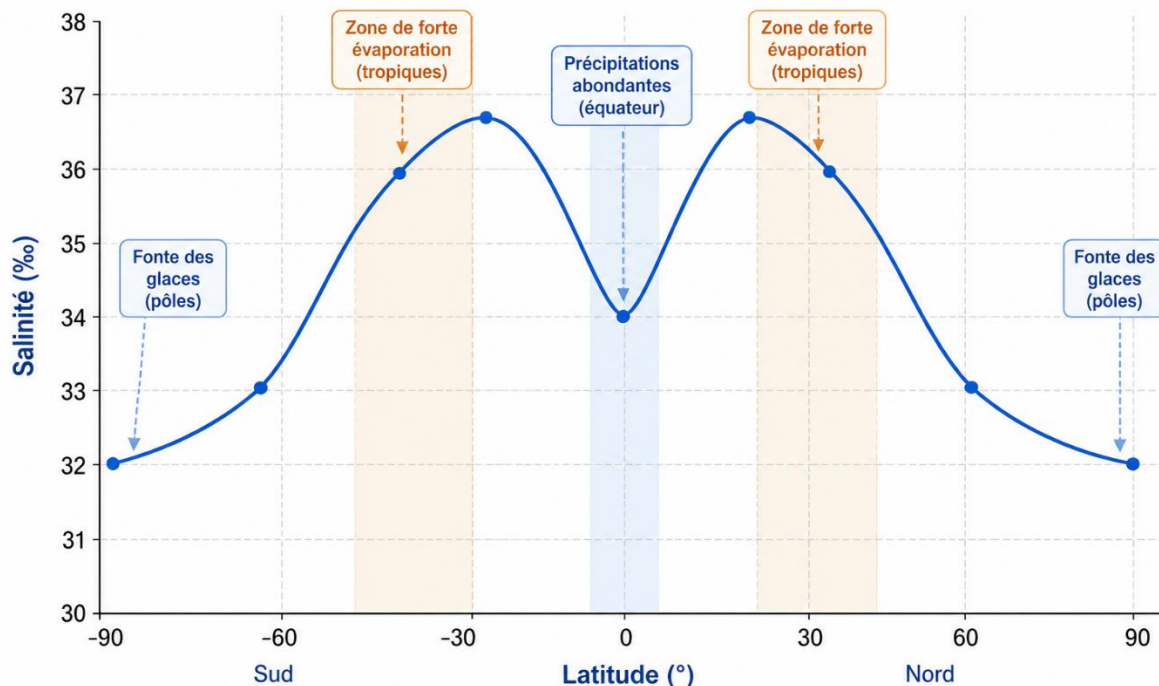


Figure 3. Variation de la salinité en fonction de la latitude

1.1.4. Stratification thermique des océans

La température de l'eau de mer diminue avec la profondeur. On distingue trois couches principales [5] :

- **La couche de surface (0 à 200 m) :** eau chaude et homogène, généralement comprise entre 20 et 25 °C.
- **La thermocline (200 à 1 000 m) :** zone de transition où la température diminue rapidement, pouvant passer de 20 °C à 5 °C sur quelques centaines de mètres.
- **La couche profonde (au-delà de 1 000 m) :** eau froide et stable, typiquement entre 2 et 4 °C [5].

La température de l'eau d'alimentation influence directement la performance des membranes d'osmose inverse. Plus l'eau est froide, plus sa viscosité est élevée, ce qui réduit le flux de perméat (exprimé en $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). Une diminution de 1 °C réduit le flux d'environ 3 % à pression constante [5][6].

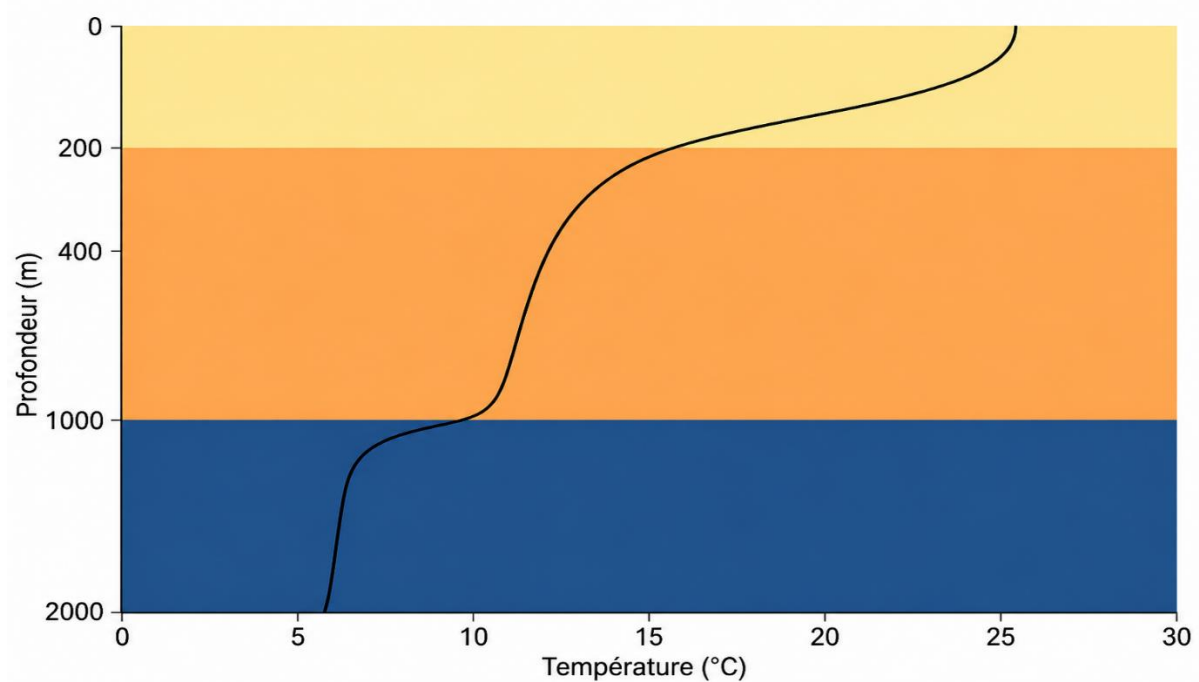


Figure 4. Profil thermique de l'océan selon la profondeur

1.1.5. Cycle hydrologique

Le cycle de l'eau décrit le mouvement continu de l'eau sur, sous et au-dessus de la surface terrestre [3]. L'eau de mer s'évapore sous l'effet du soleil, forme des nuages, puis retombe sous forme de précipitations sur les continents et les océans [5]. Les précipitations alimentent les rivières, les lacs et les nappes souterraines, avant que l'eau ne retourne finalement à l'océan. Ce cycle est essentiel pour la régulation du climat et la disponibilité des ressources en eau douce [3][5].

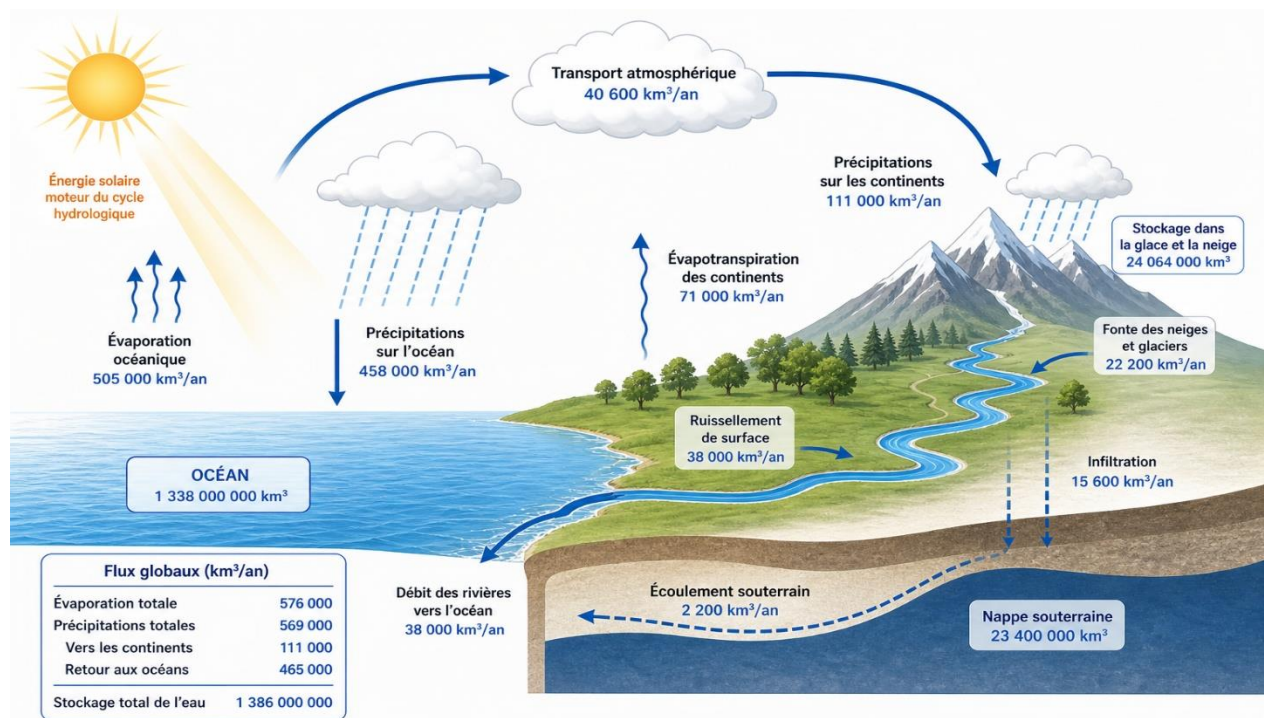


Figure 5. Cycle hydrologique global de l'eau

1.1.6. Grandeurs physiques caractéristiques

Outre la salinité et la température, l'eau de mer possède d'autres propriétés importantes pour le dessalement [5].

Le pH de l'eau de mer est légèrement basique, typiquement compris entre 7,5 et 8,4, avec une valeur moyenne de 8,1 à 25 °C [5]. Le pH est un paramètre critique car il influence à la fois la solubilité des sels (risque d'entartrage carbonaté) et la stabilité chimique des membranes en polyamide. Les membranes d'osmose inverse ont une plage de pH optimale comprise entre 6,5 et 8,0 ; en dehors de cette plage, on observe une hydrolyse accélérée de la couche active [6].

L'indice de saturation de Langelier (LSI) est calculé pour prédire le risque d'entartrage carbonaté. Il est défini par :

$$LSI = pH - pH_s$$

où pH_s est le pH de saturation du carbonate de calcium ($CaCO_3$). Ce pH_s dépend de l'alcalinité, de la dureté calcique, de la salinité et de la température [5].

- LSI positif ($LSI > 0$) : risque d'entartrage carbonaté (précipitation de $CaCO_3$).
- LSI négatif ($LSI < 0$) : eau agressive (corrosion).

Dans les installations d'osmose inverse, la pratique industrielle recommande un LSI du concentrat compris entre $-0,2$ et $+0,2$ en présence d'inhibiteur de tartre (antitartre). Sans antitartre, le LSI de l'alimentation doit rester inférieur à 0. Une valeur systématiquement inférieure à $-0,5$ est trop conservatrice et peut induire une corrosivité inutile des équipements en acier inoxydable [8][12].

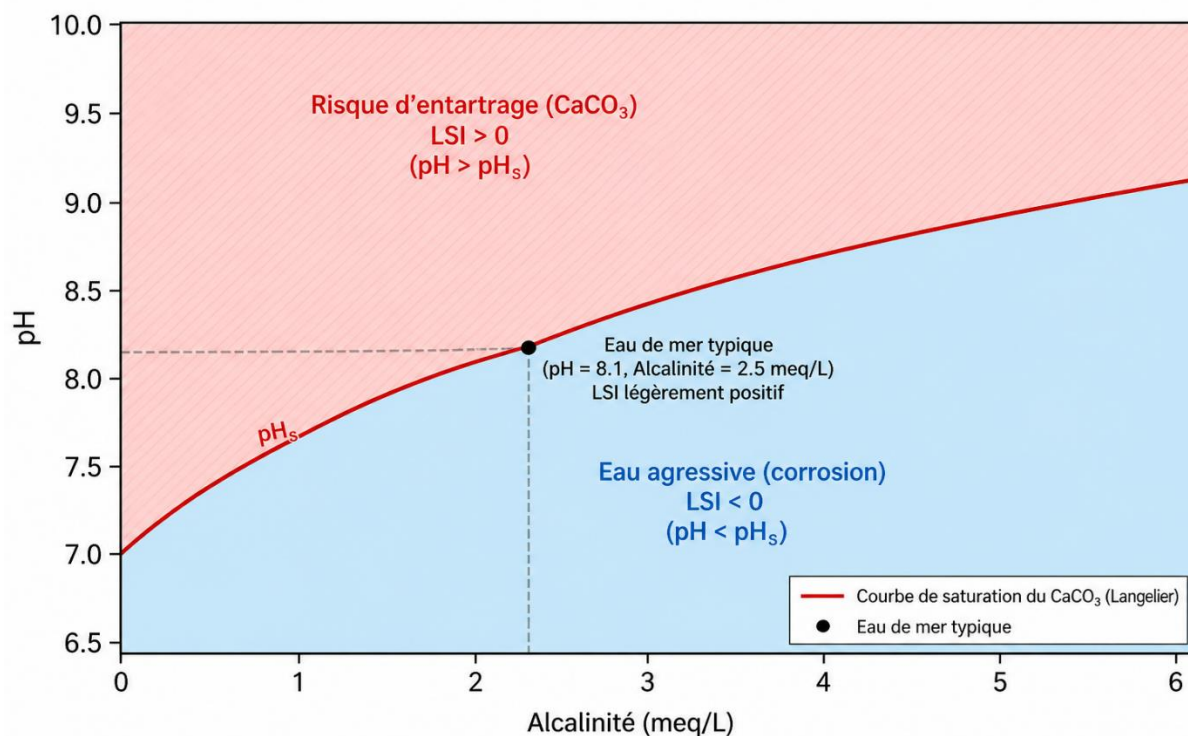


Figure 6. Relation entre l'alcalinité, le pH et le risque d'entartrage (LSI)

La densité de l'eau de mer varie entre 1,020 et 1,030 g/cm³ à 25 °C (température de référence usuelle). Elle augmente avec la salinité et diminue avec la température [5]. La densité est un paramètre important pour le dimensionnement des pompes et des canalisations, car elle détermine la pression hydrostatique et les pertes de charge dans le système. À titre de comparaison, l'eau douce a une densité de 1,000 g/cm³ à 4 °C, ce qui signifie que l'eau de mer est environ 2,5 % plus dense.

La conductivité électrique, proportionnelle à la salinité, vaut environ 50 mS/cm pour l'eau de mer à 35 g/L. Elle est couramment utilisée comme indicateur en ligne de la qualité de l'eau dans les installations de dessalement [5].

La pression osmotique est la propriété la plus fondamentale pour l'osmose inverse. Elle représente la pression qu'il faudrait appliquer pour arrêter le flux d'osmose naturelle. Pour l'eau de mer à 35 g/L et 25 °C, la pression osmotique est d'environ 28 bars [5]. Cette valeur est la

référence minimale pour le dimensionnement de la pompe haute pression. À titre de comparaison, une eau saumâtre à 5 g/L a une pression osmotique d'environ 4 bars seulement.

La pression osmotique est calculée par la formule de van 't Hoff :

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

où :

- π : pression osmotique (bar),
- i : nombre d'ions dissociés par molécule de sel (pour NaCl, $i = 2$ selon la théorie de van 't Hoff),
- C : concentration molaire (mol/L),
- R : constante des gaz parfaits ($0,083145 \text{ L} \cdot \text{bar} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [6],
- T : température absolue (en kelvins). Il est impératif d'utiliser $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$; à 25°C , $T = 298,15 \text{ K}$. L'oubli de cette conversion conduit à une erreur systématique sur la valeur de π [6].

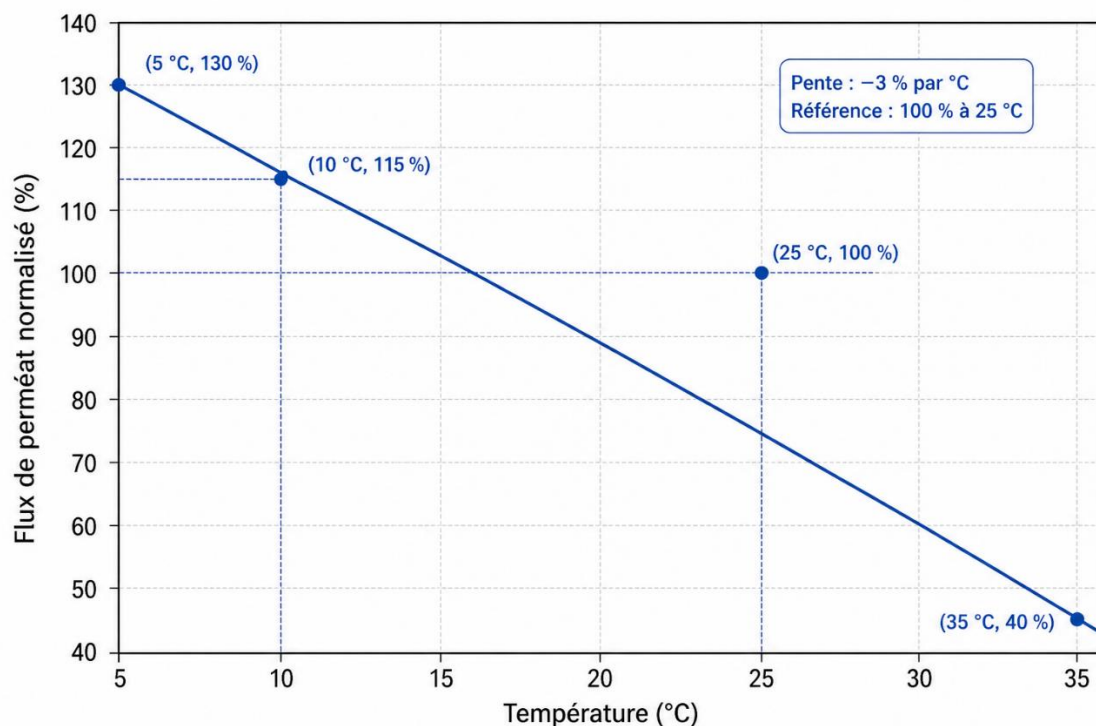


Figure 7. Influence de la température sur le flux de perméat normalisé

L'ensemble des grandeurs physiques et chimiques présentées dans cette section est regroupé dans le tableau ci-dessous. Ces valeurs constituent les paramètres fondamentaux de l'eau de mer à prendre en compte pour tout projet de dessalement.

Propriété	Symbole	Valeur typique	Unité
Salinité	S	35	g/kg (‰)
pH	pH	8,1	-
Alcalinité	Alk	2,5	meq/L
Dureté totale	TH	6 500	mg/L (eq CaCO ₃)
Densité (à 25 °C)	ρ	1,025	g/cm ³
Conductivité	EC	50	mS/cm
TDS	TDS	35 000	mg/L
Pression osmotique	π	28	bar

Tableau 2. Propriétés physico-chimiques de l'eau de mer à 25 °C

1.2. Osmose inverse

1.2.1. Définition de l'osmose

L'osmose est un phénomène naturel de diffusion de l'eau à travers une membrane semi-perméable. Une membrane semi-perméable permet le passage du solvant (l'eau) mais retient les solutés (les sels dissous) [6]. L'eau se déplace spontanément de la solution la moins concentrée en sels vers la solution la plus concentrée afin d'équilibrer les concentrations. Ce mouvement est dû à une différence de potentiel chimique entre les deux solutions [6].

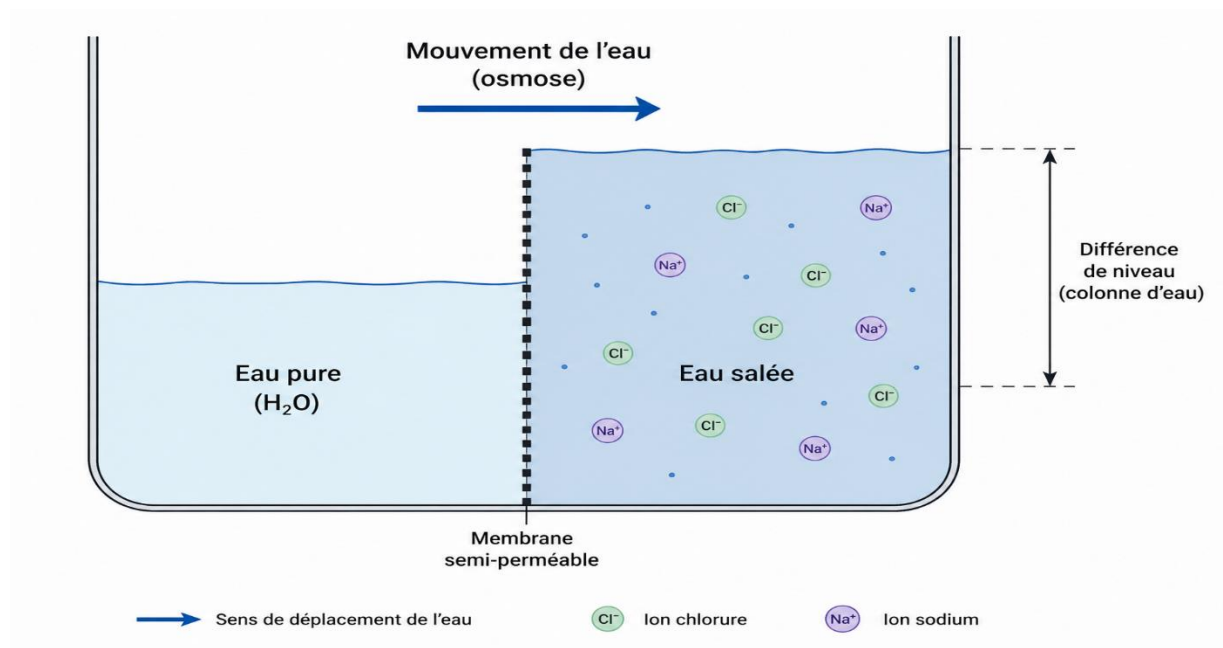


Figure 8. Principe de l'osmose naturelle

1.2.2. Définition de l'osmose inverse

L'osmose inverse (OI) est un procédé de séparation membranaire qui inverse le flux naturel de l'osmose [6]. En appliquant une pression hydraulique supérieure à la pression osmotique sur la solution la plus concentrée (eau salée), on force l'eau à traverser la membrane dans le sens inverse : l'eau migre de la solution concentrée vers la solution diluée (le perméat). Les sels dissous sont retenus et évacués sous forme de concentrat (saumure) [7].

Pour l'eau de mer ayant une salinité de 35 g/L, la pression osmotique de l'eau d'alimentation est d'environ 28 bars, et la pression de fonctionnement (pression appliquée) est généralement comprise entre 55 et 80 bars.

La différence ($P_{\text{appliquée}} - \pi$) constitue la pression nette de filtration (NDP) qui génère le flux de perméat. Il convient de noter que la pression osmotique doit être évaluée côté concentrat, où elle peut atteindre 40–55 bars selon le taux de récupération (40–50 %), et non uniquement côté alimentation. Le dimensionnement de la pompe haute pression doit tenir compte de cette valeur majorée [1][7].

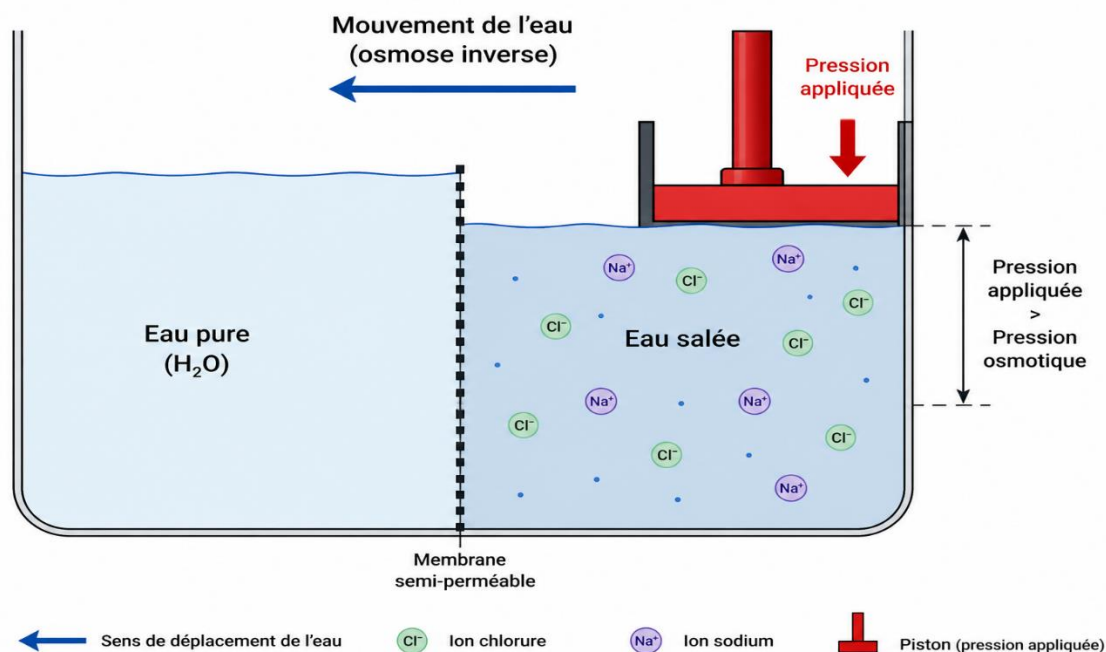


Figure 9. Principe de l'osmose inverse sous pression

1.2.3. Les différents types d'osmose inverse

Selon la salinité de l'eau d'alimentation, la pression de fonctionnement et la configuration, on distingue plusieurs types d'osmose inverse :

- **Osmose inverse basse pression (BP-RO)** : appliquée aux eaux saumâtres légères (salinité < 5 g/L). Pression de 10 à 20 bars. Dessalement partiel, faible consommation énergétique.
- **Osmose inverse moyenne pression (MP-RO)** : pour eaux saumâtres (5 à 15 g/L). Pression de 20 à 40 bars. Configuration la plus courante.
- **Osmose inverse haute pression (HP-RO)** : pour eau de mer (30 à 50 g/L). Pression de 55 à 80 bars. Technologie standard du dessalement maritime.
- **Osmose inverse très haute pression (VHP-RO)** : pour saumures (> 50 g/L) dans les procédés zéro rejet liquide (ZLD). Pressions de 80 à 120 bars.

Des configurations multi-étagées (recyclage du concentrat ou plusieurs passes) améliorent le taux de récupération ou la qualité du perméat.

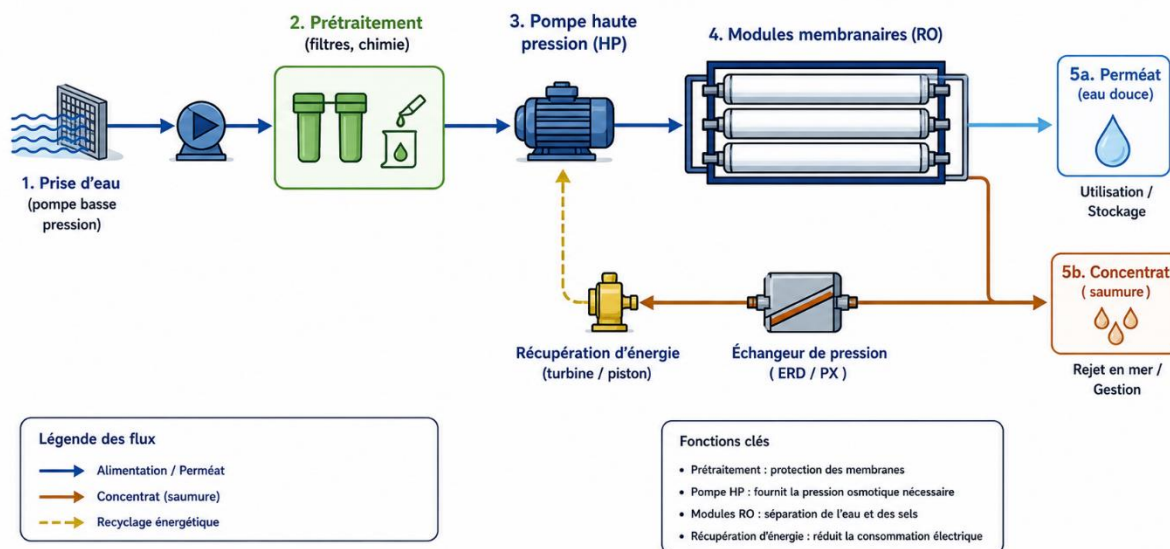


Figure 10. Schéma fonctionnel d'une unité d'osmose inverse

1.2.4. Schéma d'une installation d'osmose inverse

Une installation typique de dessalement par osmose inverse comprend plusieurs étapes successives [1] :

- **Prétraitement** : filtration physique (filtre à sable, cartouche) et traitement chimique (ajustement du pH, ajout d'antitartre) pour éliminer les particules, les colloïdes et prévenir l'entartrage [8].
- **Pompe haute pression** : élève la pression à 55–80 bars pour l'eau de mer.
- **Modules membranaires** : retiennent les sels et produisent le perméat [1].
- **Récupération d'énergie** : turbine ou échangeur de pression, réduit la consommation de 30 à 60 %.
- **Post-traitement** : reminéralisation et désinfection du perméat [1][8].

1.2.5. Applications de l'osmose inverse

L'osmose inverse est utilisée dans de nombreux domaines [9] :

- **Dessalement d'eau de mer** : production d'eau potable, rejet des sels > 99,4 % — TDS final typique 150–400 mg/L pour les installations SWRO modernes (conforme à la norme OMS < 500 mg/L) [1].
- **Traitement des eaux saumâtres (1–10 g/L)** : pressions plus faibles (15–30 bars).

- **Production d'eau ultra-pure** : industries pharmaceutique et électronique (rejet > 99,9 %).
- **Traitement des eaux usées industrielles** : recyclage.
- **Agroalimentaire** : concentration de jus, déminéralisation du lactosérum [9].

Type d'eau	Salinité (g/L)	Exemple	Traitement typique
Eau douce	< 0,5	Rivière	UF + désinfection
Eau saumâtre légère	0,5 – 3	Eau souterraine	NF ou basse pression OI
Eau saumâtre	3 – 15	Puits côtier	OI moyenne pression (20–40 bar)
Eau saumâtre sévère	15 – 30	Rejet industriel	OI haute pression (50–60 bar)
Eau de mer	30 – 50	Océan	OI haute pression (55–80 bar)
Saumure	> 50	Rejet d'OI	Évaporation ou OI très haute pression

Tableau 3 .Classification des eaux selon leur salinité

Ce tableau montre que la salinité détermine directement le type d'osmose inverse [9].

1.2.6. Éléments membranaires pour l'osmose inverse (RO)

Les membranes d'osmose inverse ont des pores inférieurs à 0,5 nm [6]. Elles retiennent plus de 99 % des sels dissous, des bactéries, des virus et des molécules organiques. Elles sont composites : une couche active en polyamide d'épaisseur comprise entre 0,1 et 0,3 µm déposée sur un support microporeux en polysulfone (environ 50 µm), lui-même renforcé par un tissu polyester [6][10].

L'épaisseur de la couche active en polyamide est comprise entre 0,1 et 0,3 µm selon les fabricants. La valeur inférieure de 0,05 µm parfois citée correspond uniquement à la zone dense la plus fine de la couche, et non à l'épaisseur totale de la couche polyamide.

La configuration dominante est le module spiralé : des feuilles de membrane enroulées autour d'un tube collecteur, offrant une grande surface (plusieurs centaines de m² par module) dans un volume compact.

Les modules spiralés industriels standard mesurent 1,016 m (40 pouces) de longueur, pour des diamètres de 0,1 m (éléments 4") ou 0,2 m (éléments 8") selon le modèle et l'application. Les éléments 4" sont courants en pilotes et petites installations ; les éléments 8" équipent la majorité des grandes usines de dessalement [11].

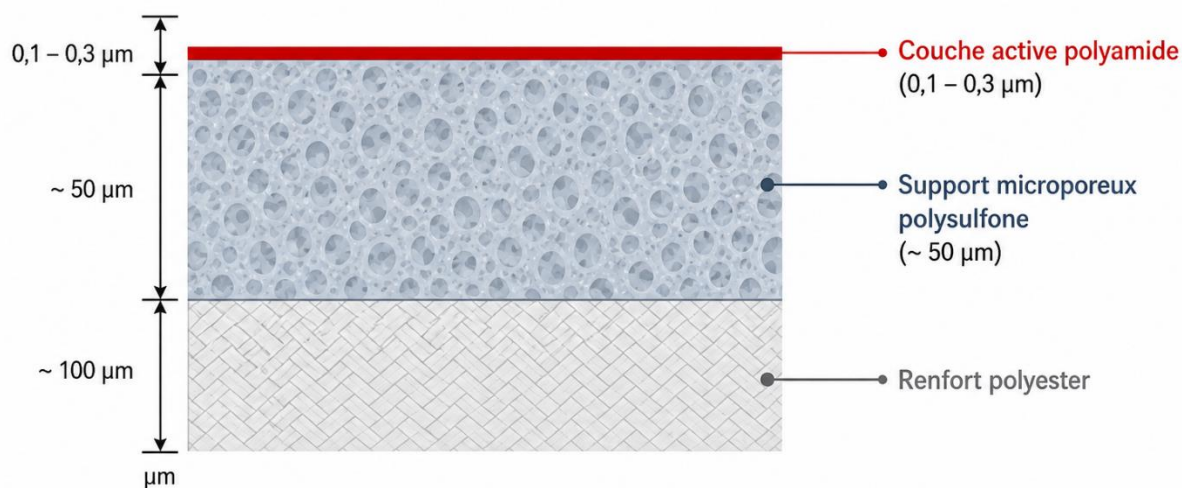


Figure 11. Structure microscopique d'une membrane semi-perméable

Cette structure à trois couches (polyamide, polysulfone, polyester) est essentielle : la couche active ultra-fine assure la sélectivité, tandis que le support microporeux apporte la résistance mécanique sans laquelle la membrane ne supporterait pas les pressions de 55 à 80 bars. La figure suivante montre comment ces membranes sont assemblées en module industriel.

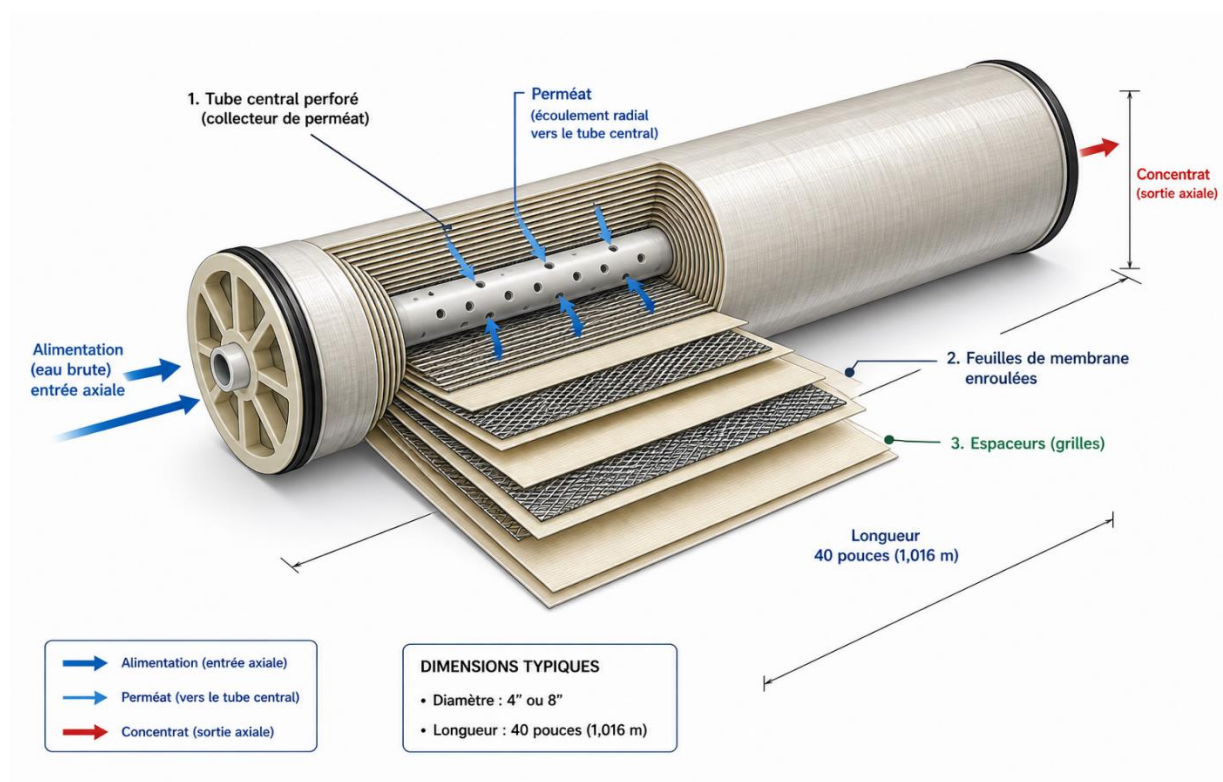


Figure 12. Configuration d'un module membranaire spiralé

L'enroulement en spirale permet de compacter plusieurs centaines de mètres carrés de membrane dans un élément de 1,016 m de long. L'alimentation circule axialement, le perméat rejoint le tube central radialement, et le concentrat sort à l'extrémité opposée.

1.2.7. Éléments membranaires pour la nanofiltration (NF)

La nanofiltration (NF) a des pores de 0,5 à 2 nm [6]. Elle rejette sélectivement les ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) à 80–98 %, les molécules organiques de masse molaire > 200 g/mol, ainsi que les bactéries et virus.

Le rejet des ions monovalents (Na^+ , Cl^-) en nanofiltration est typiquement compris entre 10 % et 50 %, avec une forte dépendance au fabricant, au pH et aux conditions opératoires. Certaines membranes NF de type « tight » peuvent atteindre 70 % de rejet de NaCl. Il convient donc d'éviter d'indiquer une fourchette trop étroite (20–50 %) qui ne reflète pas la diversité des membranes commerciales disponibles [6].

La pression de fonctionnement est de 5 à 20 bars. Les principales applications sont l'adoucissement (réduction de la dureté), l'élimination des pesticides et la décoloration [6][12].

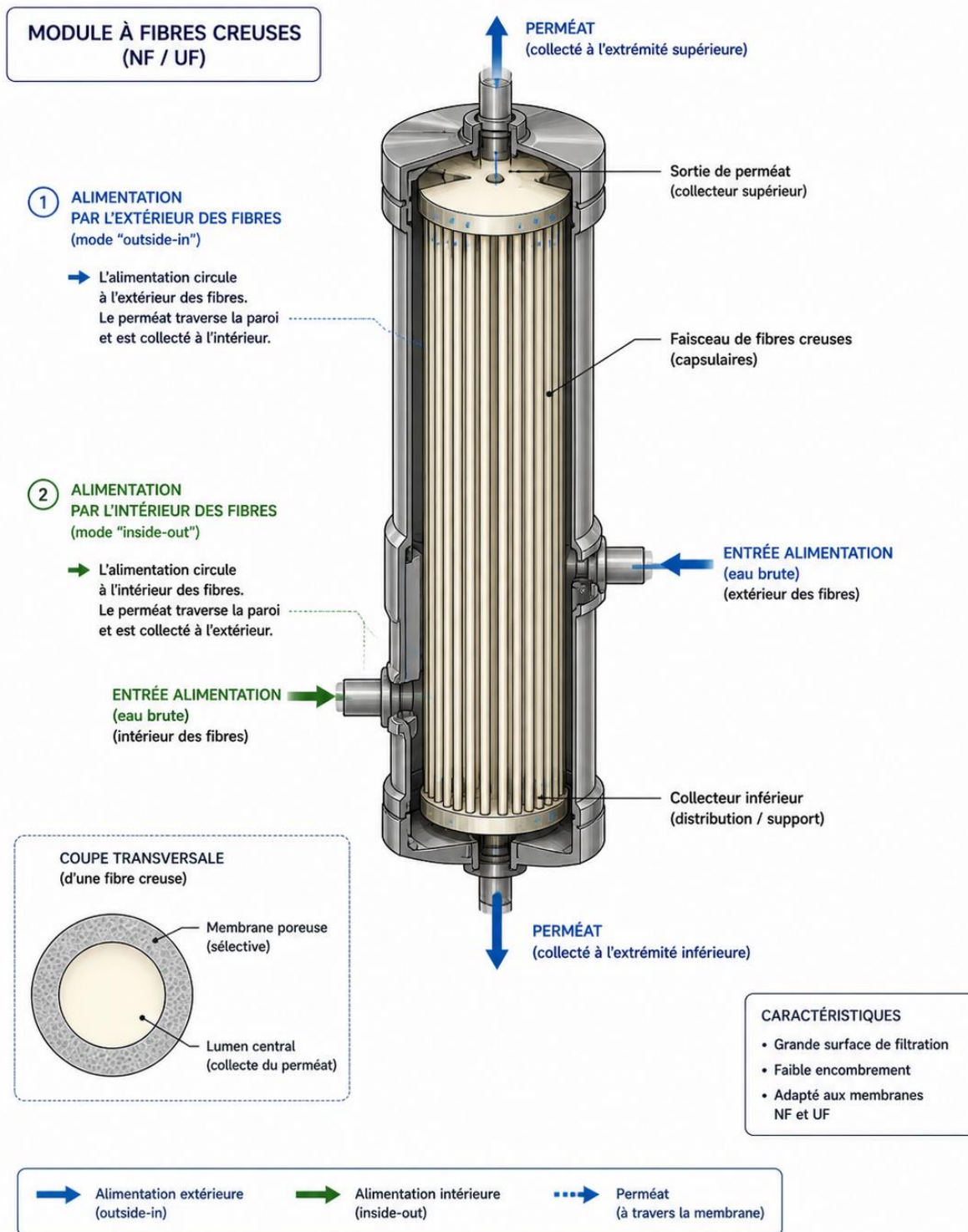


Figure 13. Configuration d'un module à fibres creuses (souvent utilisé en NF et UF)

Ce module à fibres creuses est particulièrement adapté à la NF car il offre une grande surface de filtration dans un volume réduit et permet un nettoyage par rétrolavage efficace.

Contrairement au module spiralé, il tolère des eaux plus chargées, mais sa sensibilité au colmatage est plus élevée.

1.2.8. Éléments membranaires pour l'ultrafiltration (UF)

L'ultrafiltration (UF) possède des pores de 2 à 100 nm [6]. Elle retient les bactéries, les virus (partiellement, selon leur taille), les colloïdes, les particules en suspension et les macromolécules (protéines, polysaccharides). En revanche, elle laisse passer tous les sels dissous. La pression de fonctionnement est faible : 1 à 10 bars. L'UF est très largement utilisée comme prétraitement avant RO pour abaisser l'indice de densité de silt ($SDI < 3$), protégeant ainsi les membranes RO du colmatage particulaire [6][10].

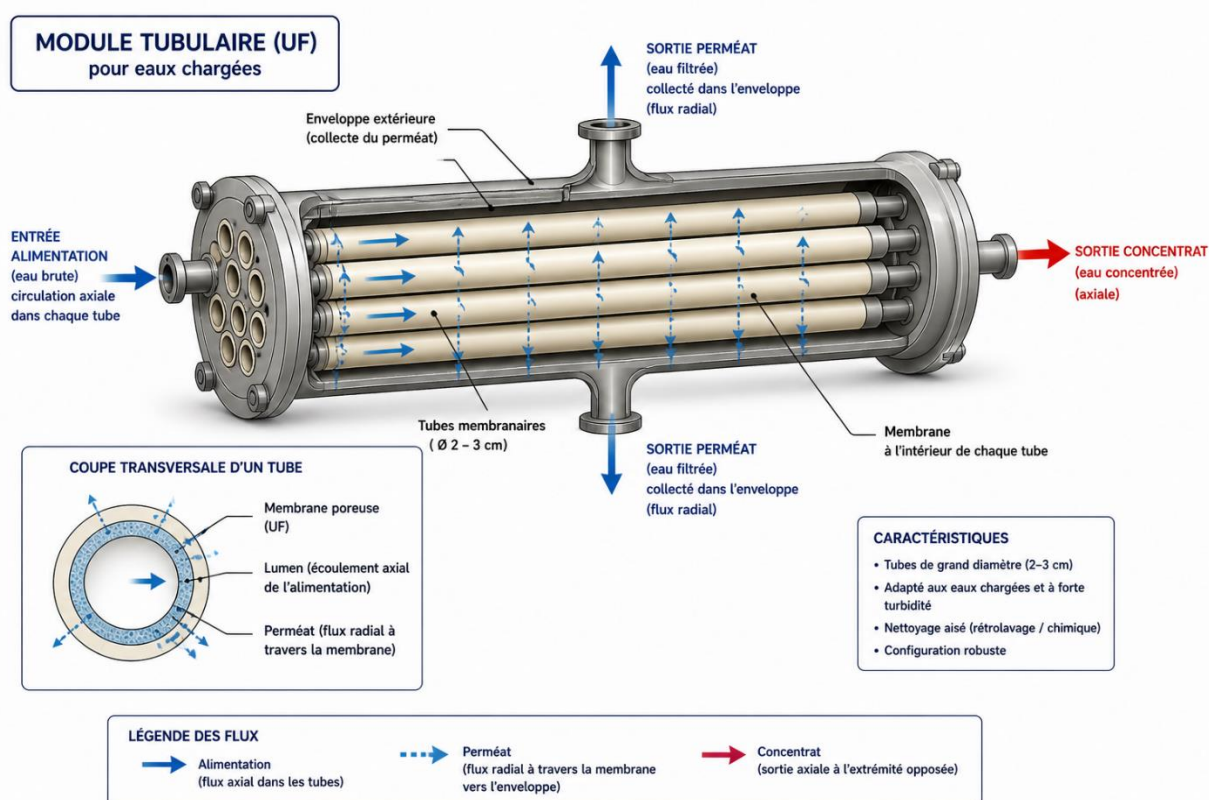


Figure 14. Configuration d'un module tubulaire (adaptée aux eaux très chargées)

La configuration tubulaire est choisie pour les eaux de mer très chargées ou les effluents industriels car elle autorise une circulation à haute vitesse tangentielle, limitant l'accumulation de particules à la surface de la membrane. Son inconvénient est une densité de surface plus faible que les modules spiralés ou à fibres creuses.

1.2.9. Comparaison des procédés membranaires

La sélectivité augmente quand la taille des pores diminue [6] : MF (clarification), UF (épuration), NF (adoucissement), RO (dessalement).

Paramètre	MF	UF	NF	RO
Taille des pores (nm)	100 – 10 000	2 – 100	0,5 – 2	< 0,5
Pression (bar)	0,1 – 2	1 – 10	5 – 20	10 – 80
Rejet de sels (%)	0	0	20 – 80	> 99
Rejet ions divalents	0	0	> 90	> 99
Rejet des bactéries	Oui	Oui	Oui	Oui
Rejet des virus	Non	Partiel	Oui	Oui
Flux de perméat (L/m ² /h)	500 – 2000	100 – 500	40 – 80	15 – 25
Applications principales	Clarification	Épuration	Adoucissement	Dessalement

Tableau 4 .Comparaison technique des procédés MF, UF, NF et RO

Le flux de perméat RO pour le dessalement d'eau de mer (SWRO) est typiquement de 15–25 L/m²/h en conditions standard. La valeur basse de 10 L/m²/h correspond à une eau très froide ou à des membranes très colmatées ; la valeur de 30 L/m²/h est davantage représentative du dessalement d'eau saumâtre (BWRO) à basse pression [1][8].

L'osmose inverse est le seul procédé avec un rejet de sels > 99 %, ce qui en fait la technologie de choix pour le dessalement [6][10].

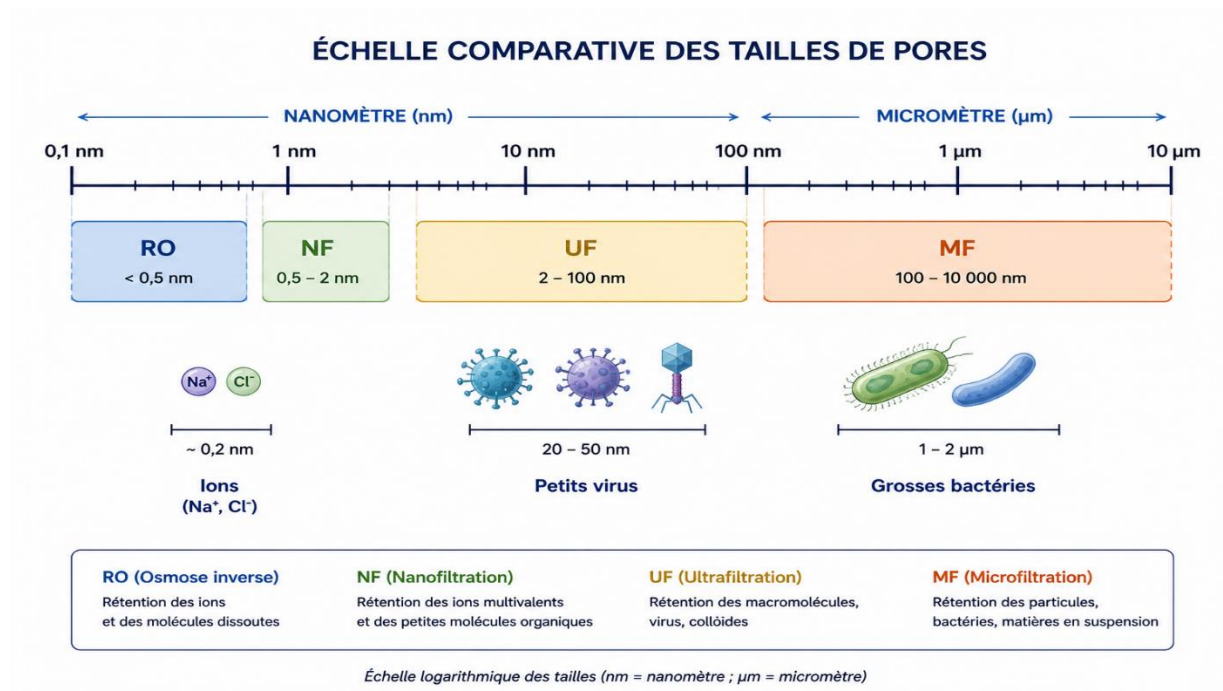


Figure 15. Échelle comparative des tailles de pores : MF, UF, NF et RO

Cette échelle logarithmique permet de visualiser d'un coup d'œil les domaines d'action de chaque procédé par rapport aux dimensions des polluants. On constate que seule la RO couvre la totalité des sels dissous (ions). La figure suivante précise les taux de rejet spécifiques.

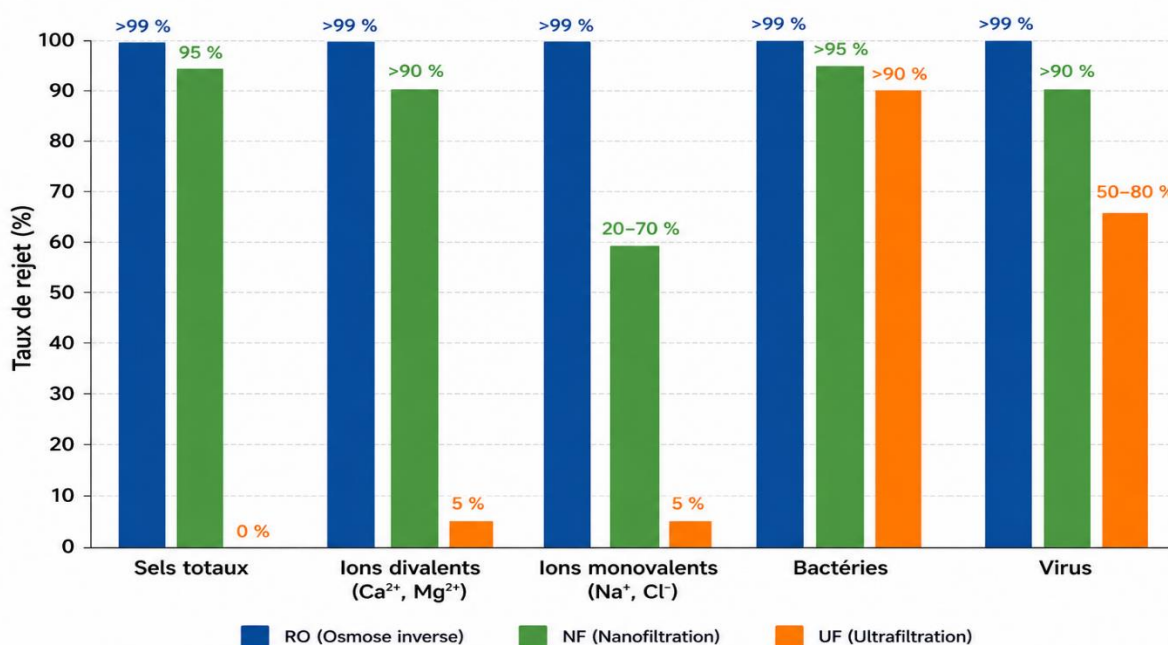


Figure 16. Sélectivité des membranes RO, NF et UF

La RO rejette uniformément > 99 % de tous les sels ; la NF discrimine entre ions divalents (fort rejet) et monovalents (faible rejet) ; l'UF n'arrête aucun sel. Ce comportement est fondamental pour choisir le bon procédé selon l'objectif : dessalement total (RO), adoucissement (NF) ou simple clarification (UF).

Conclusion

L'analyse des propriétés physico-chimiques de l'eau de mer révèle une solution complexe dont les paramètres – salinité (35 g/L), température, pH, alcalinité, dureté – influencent directement la faisabilité du dessalement.

La pression osmotique de 28 bars à 25 °C constitue le seuil théorique à franchir, mais l'exploitation industrielle requiert des pressions de 55 à 80 bars pour inverser le flux naturel et obtenir un rejet de sels supérieur à 99 %.

La maîtrise de l'indice de saturation de Langelier (LSI) évite l'entartrage carbonaté, tandis que le choix de la membrane – RO (< 0,5 nm), NF (0,5–2 nm) ou UF (2–100 nm) – dépend de l'objectif : dessalement, adoucissement ou clarification.

Ces bases théoriques permettent désormais d'aborder, dans le chapitre suivant, la simulation pratique et le dimensionnement d'une installation d'osmose inverse.

***CHAPITRE 2 : SIMULATION
DES PROCÉDÉS D'OSMOSE
INVERSE PAR IMS DESIGN***

Introduction

Savoir comment se comporte l'eau de mer ne suffit pas à construire une usine de dessalement. Entre la théorie et la réalité, il existe un fossé que seule la simulation peut combler. Le choix d'une membrane, la pression à appliquer, le taux de récupération à viser : toutes ces décisions sont interdépendantes. Les calculer à la main est impossible. Les ignorer conduit à l'échec technique ou économique. Ce chapitre présente l'outil qui répond à ce besoin : le logiciel IMS Design. Après une définition de la simulation de processus, il détaille le fonctionnement du logiciel, ses paramètres et sa méthodologie.

2.1. Définition de la simulation de processus

La simulation de processus est une technique numérique qui consiste à reproduire le comportement d'un système industriel à partir d'un modèle mathématique. Dans le domaine du dessalement par osmose inverse, cette approche permet d'évaluer les performances d'une installation sans avoir à construire un prototype réel, ce qui réduit considérablement les coûts et les délais de conception [13].

Les modèles mathématiques utilisés reposent essentiellement sur le modèle de solution-diffusion, qui décrit le transfert d'eau et de sels à travers une membrane semi-perméable sous l'effet d'un gradient de pression et d'un gradient de concentration. Ce modèle est complété par des équations de conservation de la masse, des bilans hydrauliques et des lois de perte de charge dans les modules et les canalisations [6,14].

La simulation permet de calculer plusieurs grandeurs essentielles pour le dimensionnement : le débit de perméat, la qualité de l'eau produite (exprimée par le TDS résiduel), la pression osmotique moyenne, le taux de récupération ainsi que la consommation énergétique spécifique (SEC). Elle permet également de tester différentes configurations membranaires et d'anticiper les risques d'entartrage ou de colmatage [1,15,16].

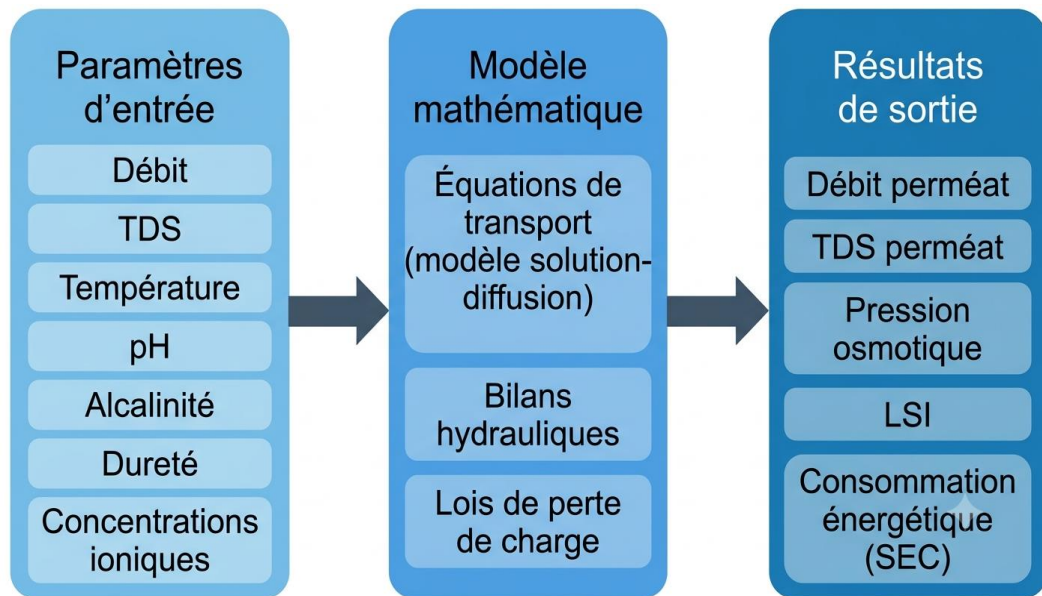


Figure 17. Principe général de la simulation de processus

2.2. Présentation du logiciel IMS Design

IMS Design (Integrated Membrane System Design) est un logiciel développé par Hydranautics, une division du groupe Nitto Denko, spécialisée dans la fabrication de membranes pour le traitement de l'eau, notamment pour l'osmose inverse (RO), la nanofiltration (NF) et l'ultrafiltration (UF) [8]. Il est conçu pour assister les ingénieurs et les concepteurs dans le dimensionnement, la configuration et l'optimisation de systèmes membranaires [17].

Le logiciel est gratuit, régulièrement mis à jour par le fabricant, et largement utilisé dans les bureaux d'études ainsi que dans les projets de dessalement d'eau de mer [18]. Sa base de données intègre l'ensemble des membranes commercialisées par Hydranautics, avec leurs caractéristiques techniques précises : surface active, taux de rejet nominal, pression maximale admissible, plage de température de fonctionnement, etc.

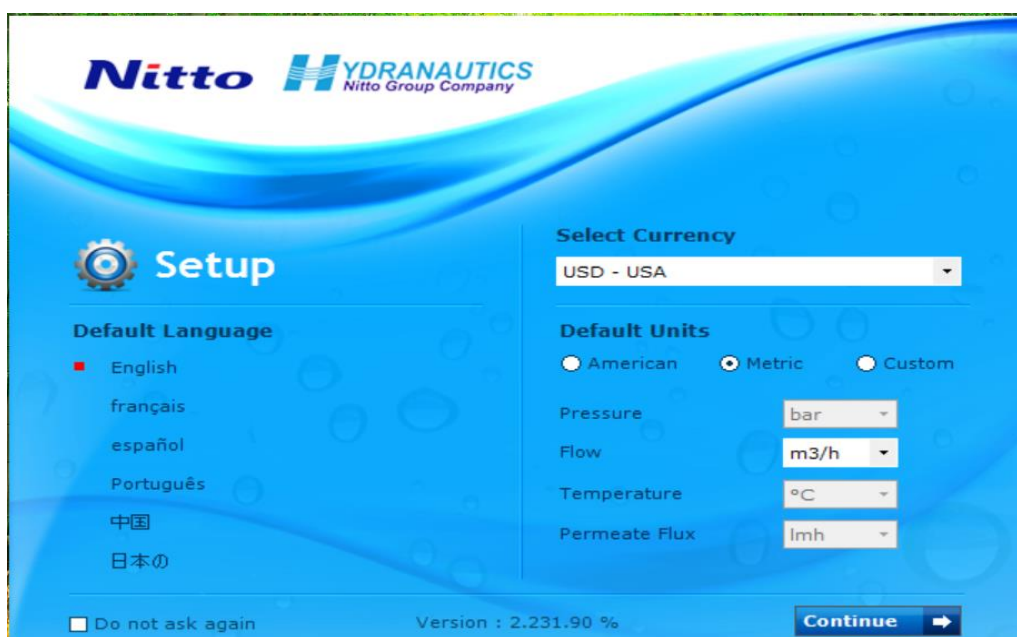


Figure 18. Interface principale du logiciel IMS Design

L'interface principale du logiciel se présente sous la forme d'une fenêtre unique organisée en plusieurs onglets. L'onglet Feed Water permet de saisir les caractéristiques de l'eau à traiter. L'onglet System Layout sert à configurer l'architecture de l'installation. L'onglet Membrane Library donne accès à la base de données des membranes Hydranautics. Cette organisation facilite la navigation et rend la prise en main rapide, même pour un utilisateur novice.

Parmi les fonctionnalités principales du logiciel, on peut citer la sélection automatique de membranes adaptées à la qualité de l'eau d'alimentation, la modélisation précise du système membranaire (nombre d'éléments par tube sous pression, nombre de tubes en parallèle, nombre de passes, configurations en série ou en parallèle), les calculs énergétiques et hydrauliques (pression de service, perte de charge, consommation énergétique spécifique), l'analyse qualitative de l'eau (salinité du perméat, rejets ioniques, taux de récupération), la prédiction du risque d'entartrage (scaling) pour des composés comme le carbonate de calcium, le sulfate de baryum ou la silice, ainsi que la génération automatique de rapports détaillés [19-20].

Le logiciel fonctionne selon quatre grandes étapes successives :

- **Analyse** : saisie des caractéristiques de l'eau brute (composition chimique, température, pH, etc.)

- **Dimensionnement** : définition des paramètres opérationnels (débit de perméat, type de membrane, nombre d'étages, etc.)
- **Calcul** : résolution des équations et affichage des résultats (pression, énergie, qualité de l'eau, bilans ioniques)
- **Post-traitement** : simulation du traitement du perméat et analyse des coûts énergétiques

Les membranes utilisées dans ce travail appartiennent à la série **SWC (Sea Water Composite)** d'Hydranautics, spécialement conçues pour le dessalement d'eau de mer à haute pression. Cinq références sont étudiées, se distinguant par leur technologie et leur profil de performance. La mention **LD (Low Differential / Low Fouling)** indique une technologie qui réduit les pertes de charge et améliore la résistance au colmatage. Les membranes **MAX** sont des versions optimisées offrant un meilleur compromis entre débit de perméat et consommation énergétique.

Membrane	Surface active (m ²)	Rejet nominal (%)	Pression max (bar)	Technologie
SWC4-LD	37,1	99,8	82,7	Low Fouling / LD
SWC4 MAX	37,1	99,8	82,7	Optimisée
SWC5-LD	37,1	99,8	82,7	Low Fouling / LD
SWC5 MAX	37,1	99,8	82,7	Optimisée haut débit
SWC6 MAX	37,1	99,7	82,7	Haute performance

Tableau 5. Caractéristiques techniques des membranes SWC

Le logiciel présente plusieurs atouts. Il est gratuit, son interface est conviviale et interactive, ce qui facilite la prise en main même pour les utilisateurs peu expérimentés. Il permet l'importation et l'exportation de projets complets au format .ims, facilitant la collaboration entre bureaux d'études. Sa base de données est complète et régulièrement mise à jour.

Cependant, IMS Design présente quelques limites qu'il est important de connaître. Il ne prend en charge que les membranes Hydranautics ; les membranes d'autres fabricants ne sont pas intégrées. Il s'agit d'une modélisation théorique en régime stationnaire, qui suppose un fonctionnement idéal et continu, sans perturbation hydraulique ou biologique. Les phénomènes dynamiques tels que le colmatage biologique ou l'impact des variations de débit réel ne sont pas entièrement modélisés. Enfin, le logiciel ne permet pas la simulation directe du prétraitement chimique [8,20].

2.3. Paramètres de fonctionnement du logiciel IMS Design

Avant de lancer une simulation, il est essentiel de renseigner un ensemble de paramètres d'entrée précis. La qualité des résultats dépend directement de la justesse de ces données. Ces paramètres sont regroupés en trois catégories : les caractéristiques de l'eau d'alimentation, les conditions opératoires souhaitées et les contraintes techniques. Les valeurs numériques utilisées dans ce travail sont celles établies dans le chapitre 1 [4-5].

2.3.1. Paramètres de l'eau d'alimentation

Les caractéristiques de l'eau d'alimentation constituent le premier groupe de paramètres. Elles comprennent le débit d'alimentation, la salinité (TDS), la température, le pH, l'alcalinité, la dureté calcique, la conductivité, ainsi que les concentrations ioniques spécifiques (Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , HCO_3^-). Ces valeurs sont issues de l'analyse de l'eau de mer type présentée au chapitre 1 [4-5].

2.3.2. Paramètres opérationnels

Les conditions opératoires sont définies par l'utilisateur en fonction des objectifs du projet.

La **pression d'alimentation** est optimisée automatiquement par le logiciel pour chaque membrane. Pour l'eau de mer, elle se situe généralement dans une plage de 45 à 55 bars, valeur suffisante pour vaincre la pression osmotique (environ 28 bars) et assurer un débit de perméat satisfaisant.

Le **taux de récupération** (ou taux de conversion) est le rapport entre le débit de perméat et le débit d'alimentation. Il est exprimé par la formule suivante :

$$Y(\%) = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100$$

où Q_p est le débit de perméat (m^3/h) et Q_f le débit d'alimentation (m^3/h). Dans ce travail, le taux de récupération est fixé à 45 %. Un taux trop élevé augmenterait la concentration en sels côté concentrat et favoriserait l'entartrage ; un taux trop bas diminuerait la productivité de l'installation.

Le **nombre d'éléments par tube sous pression** est de 6, configuration standard pour les éléments de 8 pouces. Le **nombre de tubes sous pression en parallèle** est adapté à la capacité de production visée, et la configuration retenue est un simple passage (single pass).

2.3.3. Contraintes techniques

Des contraintes techniques sont fixées pour garantir la fiabilité du système et la conformité aux normes de qualité de l'eau.

La **qualité du perméat** doit satisfaire aux normes de potabilité : la concentration en sel ne doit pas dépasser 500 milligrammes par litre, valeur recommandée par l'Organisation mondiale de la santé pour l'eau potable.

La **pression maximale admissible** ne doit pas dépasser 82,7 bars. Cette limite est celle des membranes de la série SWC. Au-delà de cette pression, la membrane risque d'être endommagée (compaction de la couche active) et ses performances se dégradent irréversiblement.

L'**indice de saturation de Langelier (LSI)** doit être maintenu entre $-0,5$ et $+0,5$. Un LSI positif indique un risque d'entartrage carbonaté (précipitation de CaCO_3). Un LSI négatif indique une eau agressive (corrosion). L'objectif est de se rapprocher de zéro.

Si l'une de ces contraintes n'est pas respectée, le logiciel affiche un avertissement et invite l'utilisateur à modifier ses paramètres [20,22].

2.4. Étapes de simulation

La simulation dans IMS Design suit une démarche progressive et structurée, permettant de concevoir un système de dessalement optimisé en fonction des conditions spécifiques du site et des performances souhaitées [21].

Étape 1 – Saisie des données de l'eau brute

L'utilisateur renseigne les paramètres physico-chimiques de l'eau d'alimentation : température, TDS, pH, alcalinité, dureté calcique, conductivité et concentrations ioniques spécifiques. Ces

données sont issues du chapitre 1. Le logiciel calcule alors automatiquement la pression osmotique, la force ionique et l'indice de saturation de Langelier (LSI) [22].

Étape 2 – Choix du type de membrane

L'utilisateur sélectionne une membrane parmi la base de données Hydranautics. Les membranes de la série SWC (Sea Water Cap) sont spécialement conçues pour le dessalement d'eau de mer. Leurs caractéristiques (surface active, taux de rejet, pression maximale) sont automatiquement chargées par le logiciel [8].

Étape 3 – Configuration du système

L'utilisateur définit l'architecture de l'unité d'osmose inverse : nombre de tubes sous pression, nombre d'éléments par tube, nombre de passes, taux de récupération cible (45 %) et débit d'alimentation [19].

Étape 4 – Définition des limites de conception

On fixe les contraintes techniques pour garantir la fiabilité de l'installation : pression maximale d'opération (82,7 bars), concentration maximale en sel dans le perméat (500 mg/L), et LSI acceptable (entre -0,5 et +0,5) [20].

Étape 5 – Lancement de la simulation

Une fois tous les paramètres renseignés, l'utilisateur lance le calcul en cliquant sur la fonction Run Simulation. Le logiciel résout alors les équations de transport et d'équilibre hydraulique par itérations. La convergence est généralement obtenue en quelques secondes. En cas de non-convergence, un message d'alerte invite l'utilisateur à vérifier la cohérence des données saisies [21].

Étape 6 – Analyse des résultats

À l'issue du calcul, IMS Design génère automatiquement une série de résultats présentés sous forme de tableaux et de graphiques. Les principaux indicateurs à examiner sont : le débit de perméat, le TDS résiduel du perméat, le taux de rejet global, la pression osmotique moyenne, l'indice de saturation de Langelier (LSI), la consommation énergétique spécifique (SEC), ainsi que les bilans ioniques détaillés. Des avertissements sont affichés en cas de dépassement des seuils fixés [22].

Étape 7 – Optimisation par itérations

Si les résultats ne sont pas satisfaisants (par exemple un TDS du perméat trop élevé, un LSI positif indiquant un risque d'entartrage, ou une consommation énergétique excessive), l'utilisateur peut modifier un ou plusieurs paramètres (pression d'alimentation, type de

membrane, taux de récupération, nombre d'étages) et relancer la simulation. Cette démarche itérative permet d'affiner progressivement la conception jusqu'à l'obtention des performances souhaitées.

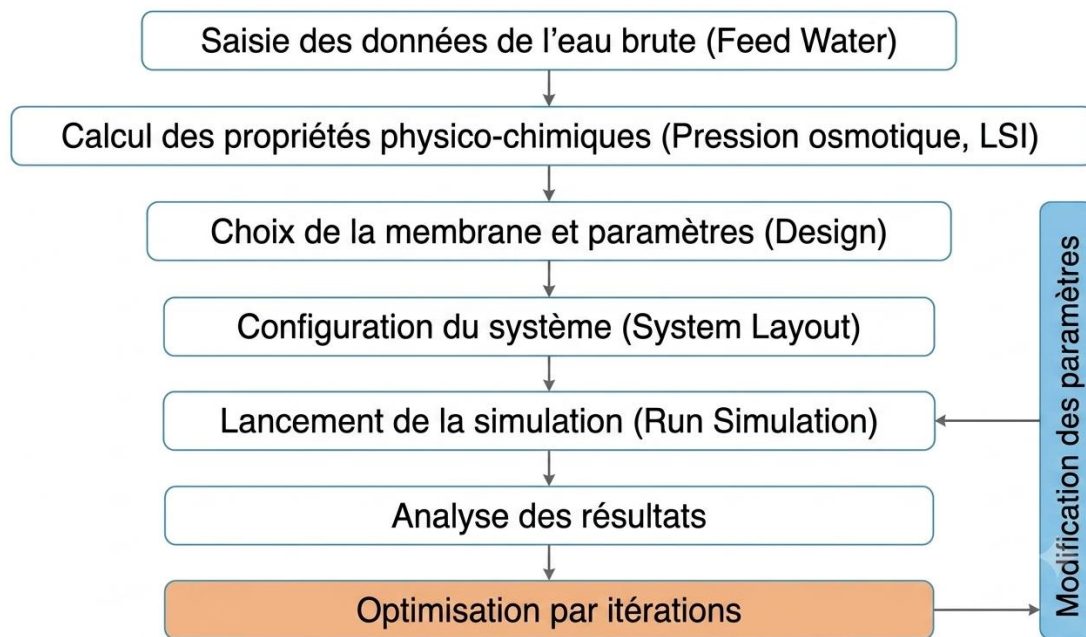


Figure 19. Organigramme des étapes de simulation sous IMS Design

2.5. Technologies complémentaires

2.5.1. Récupération d'énergie (ERD)

L'osmose inverse est un procédé énergivore. Une part importante de l'énergie consommée par la pompe haute pression se retrouve dans le concentrat, qui quitte le système à une pression encore élevée. Pour réduire la consommation électrique spécifique (SEC), les installations modernes intègrent des **récupérateurs d'énergie (Energy Recovery Devices, ERD)**.

IMS Design propose deux modes de simulation : le mode **Basic Design** (sans récupération d'énergie) et le mode **Pressure/Work Exchanger** (avec ERD). Cette distinction permet de quantifier l'impact de l'ERD sur la consommation énergétique. Les ERD les plus efficaces sont les échangeurs de pression isothermes (Pressure Exchanger, PX), qui transfèrent l'énergie hydraulique du concentrat directement à l'eau d'alimentation entrante, avec un rendement pouvant atteindre 95 % [20].

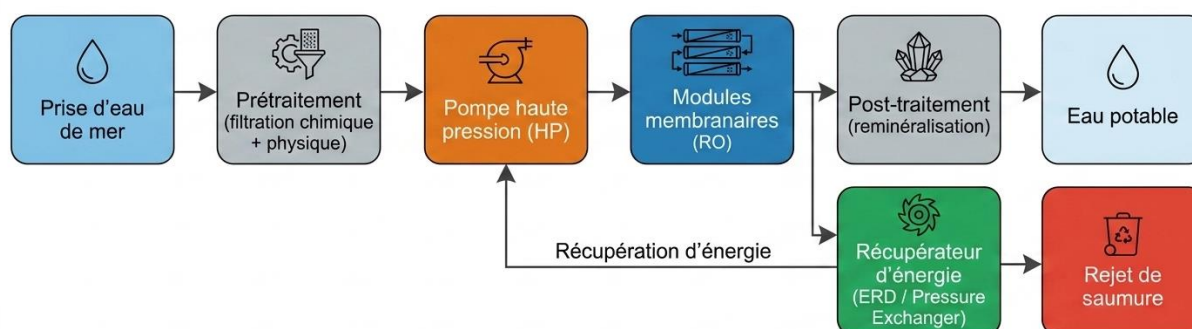


Figure 20. Schéma d'un système d'osmose inverse avec récupérateur d'énergie (ERD)

2.5.2. Gestion des concentrats

Le concentrat (saumure) rejeté par une installation d'osmose inverse a une salinité plus élevée que l'eau de mer d'origine (environ deux fois plus concentré pour un taux de récupération de 50 %). Une mauvaise gestion des concentrats peut avoir un impact environnemental négatif sur les écosystèmes marins. IMS Design permet de simuler le débit et la composition du concentrat, ce qui aide à dimensionner des systèmes de dilution ou de valorisation (extraction de sels, réutilisation industrielle) [8,20].

Conclusion

Construire sans simuler, c'est parier sur l'incertitude. Ce chapitre a présenté la simulation de processus comme une méthode incontournable pour le dimensionnement des installations d'osmose inverse. Le logiciel IMS Design, outil de référence d'Hydranautics, permet d'intégrer les paramètres de l'eau d'alimentation, de sélectionner des membranes adaptées et de respecter des contraintes techniques rigoureuses. La description des quatre grandes étapes du logiciel – analyse, dimensionnement, calcul et post-traitement – a montré sa capacité à modéliser des

systèmes complexes. Les sept étapes de simulation décrites, de la saisie des données à l'optimisation par itérations, constituent une démarche claire et reproductible. Enfin, les technologies complémentaires que sont la récupération d'énergie (ERD) et la gestion des concentrats viennent renforcer l'efficacité énergétique et environnementale des projets de dessalement. Fort de ces bases méthodologiques, le chapitre 3 confrontera ces outils à des cas concrets de simulation.

***CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET
ANALYSE DES PERFORMANCES
MEMBRANAIRES***

Introduction

Après avoir établi les bases théoriques de l'eau de mer et de l'osmose inverse, puis présenté la méthodologie de simulation sous IMS Design, ce chapitre passe à la phase pratique. Il applique les outils et les paramètres définis précédemment pour comparer cinq membranes de la série SWC (SWC4-LD, SWC4 MAX, SWC5-LD, SWC5 MAX, SWC6 MAX), dans deux configurations : sans récupérateur d'énergie (Basic Design) et avec récupérateur d'énergie (Pressure/Work Exchanger). Les résultats sont analysés selon quatre critères : pression d'alimentation, qualité du perméat (TDS), consommation énergétique spécifique (SEC) et risque d'entartrage. L'objectif est d'identifier la configuration la plus performante pour le dessalement d'eau de mer.

3.1. Déroulement d'une simulation

Afin d'illustrer le fonctionnement du logiciel IMS Design, les captures d'écran ci-dessous présentent les principales phases de simulation, réalisées pour la membrane SWC5 MAX à titre d'exemple.

Saisie des paramètres de l'eau d'alimentation

L'utilisateur renseigne les caractéristiques de l'eau brute (température, TDS, pH, alcalinité, dureté, ions). Ces données sont celles du chapitre 1. Le logiciel calcule alors automatiquement la pression osmotique.

The screenshot displays the IMSDesign software interface. The top menu bar includes 'About', 'Online Help', and 'Design Guidelines'. Below it, a toolbar contains icons for 'New', 'Open', 'Save', 'Custom Ions', 'Multiple Analysis', 'Open', 'Save As', 'Reset', 'Print', and 'Standard Calculator'. The main workspace is divided into several sections:

- Project Information:** Project: imsdn, Calculated by: ing billal, Temperature: 25.0 °C, Water Type: Sea Surface Conventional, Date: 19/05/2026.
- Water Quality Parameters:** pH: 8.04, CO3: 19.536 mg/l, CO2: 0.807 mg/l, NH3: 0.00 mg/l, E Conductivity: 53245 µs/cm.
- Cations Table:**

	mg/l	mg/l CaCO3
Ca	340.66	851.65
Mg	1482.54	6075.98
Na	9655.80	20990.87
K	289.34	370.02
NH4	0.00	0.00
Ba	0.000	0.00
Sr	0.000	0.00
Cu+2	1.460	2.30
Mn+2	3.500	6.37
Fe+2	2.900	5.19
Total	mg/l	566.03
- Anions Table:**

	mg/l	mg/l CaCO3
HCO3	172.46	141.36
SO4	2767.63	2882.95
Cl	19224.54	27115.01
F	2.12	3.58
NO3	0.51	0.41
PO4	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00
B	10.10	0.00
	0.000	0.00
	0.000	0.00
Total	mg/l	603.56
- Saturations Table:**

Calculated TDS	33973 mg/l	CaSO4	18.1 %
Osmotic pressure	24.5 bar	BaSO4	0.0 %
Ca3(PO4)2 SI	0.00	SrSO4	0.0 %
CCPP	39.94 mg/l	CaF2	65.6 %
		Silica	0.0 %

The bottom status bar shows: Analysis: New | Design: SWC5 MAX | Version: 2.231.90 | Email: support@imsdesign.com | Screen resolution: 1366 X 768 | Font Size: 100 % (96 DPI).

Figure 21. Saisie des paramètres de l'eau d'alimentation

Configuration du système

L'utilisateur définit le nombre de tubes sous pression, le nombre d'éléments par tube et le taux de récupération (45 %). La configuration retenue est un simple passage.

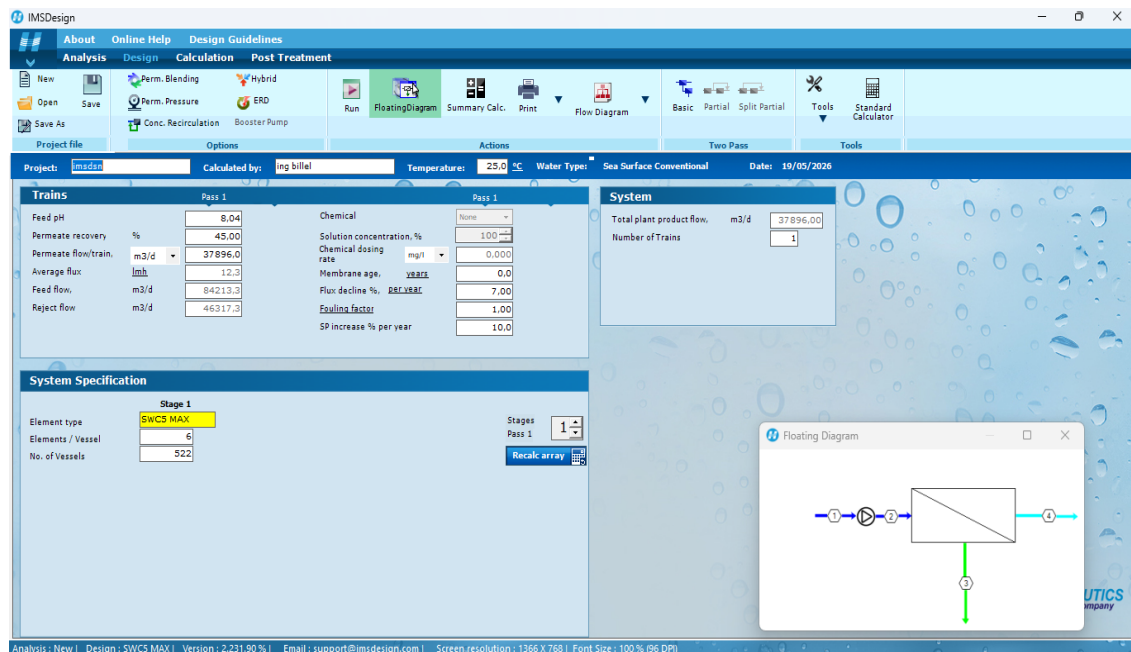


Figure 22. Configuration du système

Lancement du calcul

Le logiciel résout les équations de transport et affiche les résultats : pression, débit, TDS, SEC, LSI.

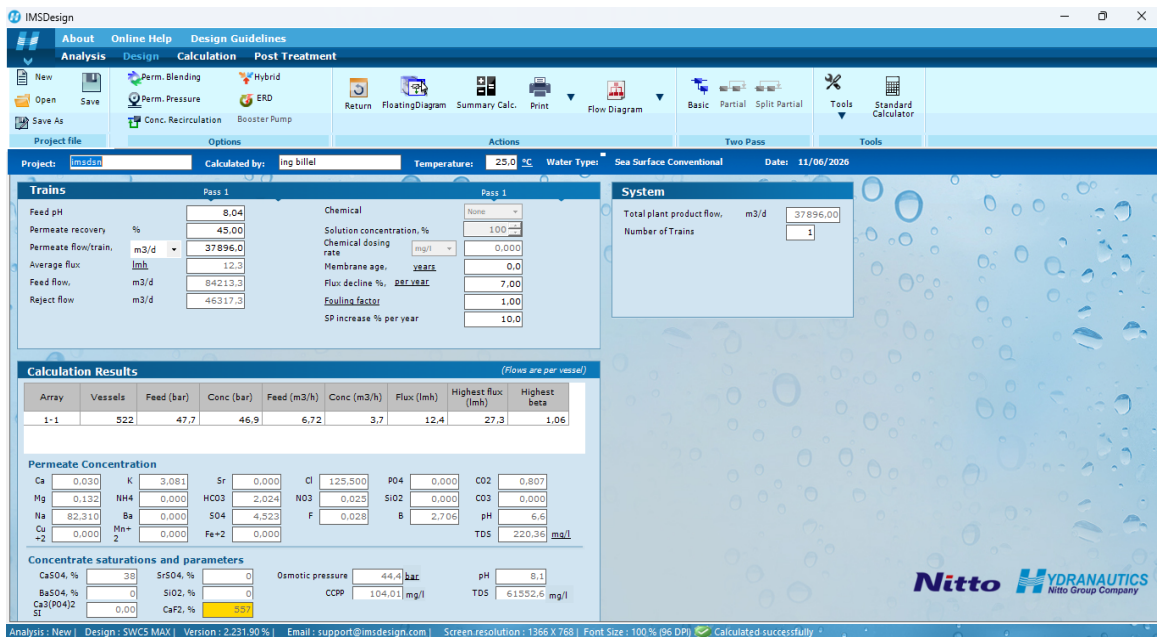


Figure 23 .Résultats du calcul

Post-traitement et analyse énergétique

Le logiciel permet d'analyser les coûts énergétiques et les traitements complémentaires du perméat.

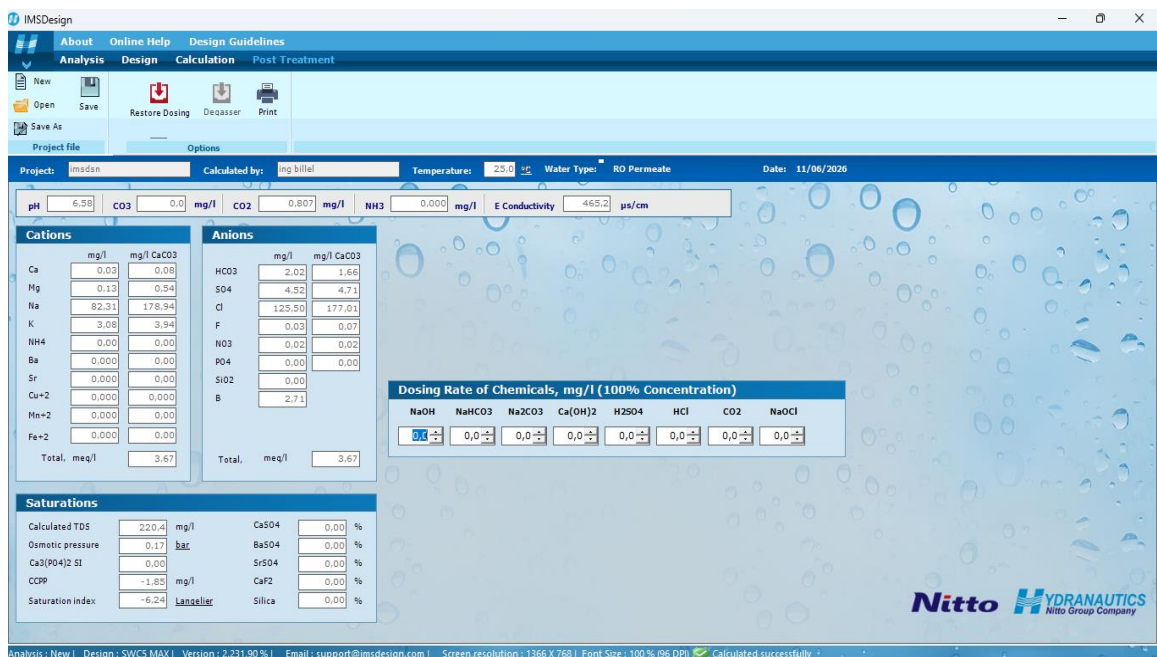


Figure 24. Post-traitement et analyse énergétique

Created on: 19/05/2026 12:03:02



Page : 2/3

Project name						imdsdn								Page : 2/3			
Calculated by						ing billet		Permeate flow/train						37896,0 m3/d			
HP Pump flow						3508,52 m3/h		Raw water flow/train						84213,3 m3/d			
Feed pressure						51,5 bar		Permeate recovery						45,00 %			
Feed temperature						25,0 °C(77,0°F)		Element age						0,0 years			
Feed water pH						8,04		Flux decline %, per year						7,0			
Chem dose, mg/l, -						H2SO4		Fouling factor						1,00			
Specific energy						3,96 kwh/m3		SP increase, per year						10,0 %			
Pass NDP						17,6 bar											
Average flux rate						13,5 lmh											
														Feed type		Sea Surface Conventional	
Pass -	Perm.	Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure			Perm.	Element	Element	PV# x			
Stage	Flow	Feed	Conc			Max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantity	Elem #			
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh		bar	bar	bar	mg/l						
1-1	1578,2	6,7	3,7	13,6	0,4	24,3	1,05	0	0	51,1	138,4	SWC4-LD	3132	522 x 6M			
Pass -	Element	Feed	Pressure	Conc		NDP	Water	Water	Beta	Permeate (Stagewise cumulative)							
Stage	no.	Pressure	Drop	Osmo.			Flow	Flux		TDS	Ca	Mg	Na	Cl			
		bar	bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh									
1-1	1	51,5	0,11	28,3	23,9	0,9	24,3	1,05	58,4	0,008	0,035	21,845	33,301				
1-1	2	51,4	0,09	32,3	19,9	0,7	19,2	1,04	69,8	0,01	0,042	26,116	39,813				
1-1	3	51,3	0,08	36,1	16,1	0,5	14,6	1,03	83,5	0,011	0,05	31,222	47,6				
1-1	4	51,2	0,06	39,4	12,3	0,4	10,5	1,03	99,9	0,014	0,06	37,353	56,948				
1-1	5	51,2	0,06	42,2	9,3	0,3	7,5	1,03	118,3	0,016	0,071	44,26	67,482				
1-1	6	51,1	0,05	44,5	7	0,2	5,4	1,02	138,4	0,019	0,083	51,775	78,944				

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version: 2.231.90

Email : imsd-support@hydramaticsprojections.net

 www.membranes.com  +1 760 901 2500 

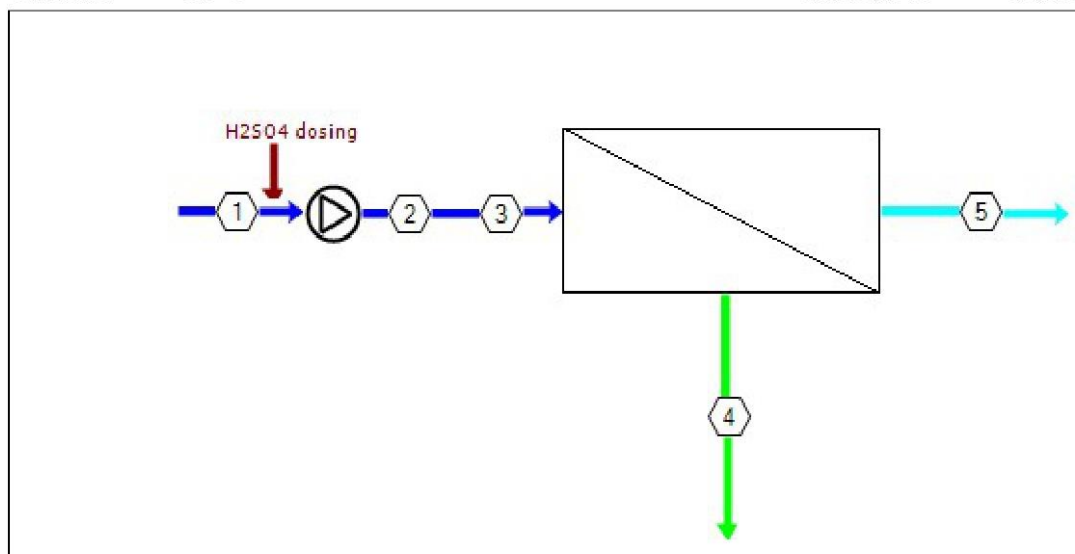
Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:03:02

Nitto HYDRANAUTICS
 Nitto Group Company

Basic Design

 Project name: imsdn
 Temperature: 25,0 °C

 Page: 3/3
 Element age, P1: 0,0 years


Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	3509	51,5	33973	8,04	53245
3	1930	51,1	61618	8,12	93486
4	1579	0	138	6,38	293

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version: 2.231.90 %

Email: imsd-support@hydranauticsprojections.net

www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:15:21


 Nitro HYDRANAUTICS
Nitro Group Company

Pressure/Work Exchanger

Project name	imdsdn		Page : 1/4
Calculated by	ing billet	Permeate flow/train	37896,0 m3/d
HP Pump flow	1597,37 m3/h	Raw water flow/train	84213,3 m3/d
Feed pressure	52,8 bar	Permeate recovery	45,00 %
Feed temperature	25,0 °C(77,0°F)	Element age	0,0 years
Feed water pH	8,04	Flux decline %, per year	7,0
Chem dose, mg/l, -	None	Fouling factor	1,00
Leakage	1 %	SP increase, per year	10,0 %
Volumetric mixing	6 %		
H.P. differential	0,50 bar		
Boost pressure	0,95 bar		
Specific energy	1,89 kwh/m3		
Pass NDP	17,9 bar		
Average flux rate	13,5 l/mh		

		Feed type				Sea Surface Conventional			
Pass -	Perm.	Flow / Vessel	Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure	Perm.	Element
Stage	Flow	Feed	Conc		Max		Perm.	Boost	Conc
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh	bar	bar	bar
1-1	1578,1	6,7	3,7	13,6	0,4	24,6	1,05	0	52,4

	Raw Water	Blended Water	Feed Water	Permeate Water	Concentrate	ERD Reject
Ion (mg/l)						
Hardness, as CaCO3	6927,63	7124,40	7124,40	0,399	12948,1	12586,83
Ca	340,66	350,34	350,34	0,020	636,7	618,95
Mg	1482,54	1524,65	1524,65	0,085	2770,9	2693,63
Na	9655,80	9928,56	9928,56	53,286	18001,3	17500,55
K	289,34	297,50	297,50	1,995	539,1	524,09
NH4	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,00
Sr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,00
Cu+2	1,460	1,501	1,501	0,000	2,7	2,7
Mn+2	3,500	3,599	3,599	0,000	6,5	6,4
Fe+2	2,900	2,982	2,982	0,000	5,4	5,3
H	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
CO3	19,54	20,88	20,88	0,000	60,6	58,16
HCO3	172,46	175,89	175,89	1,300	277,2	270,94
SO4	2767,63	2846,16	2846,16	2,927	5170,4	5026,25
Cl	19224,54	19768,29	19768,29	81,252	35861,8	34863,58
F	2,12	2,18	2,18	0,018	3,9	3,84
NO3	0,51	0,52	0,52	0,016	0,9	0,91
PO4	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
OH	0,11	0,11	0,11	0,000	0,2	0,19
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
B	10,10	10,34	10,34	1,494	17,6	17,13
CO2	0,81	0,82	0,82	0,82	1,05	1,03
NH3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS	33973,10	34933,40	34933,40	142,39	63355,23	61592,29
pH	8,04	8,04	8,04	6,39	8,12	8,12

Saturations	Raw Water	Feed Water	Concentrate	Limits
CaSO4 / ksp * 100, %	18	19	40	400
SrSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	1200
BaSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	10000
SiO2 saturation, %	0	0	0	140
CaF2 / ksp * 100, %	66	72	627	50000
Ca3(PO4)2 saturation index	0,0	0,0	0,0	2,4
CCPP, mg/l	39,94	41,85	107,49	850
Ionic strength	0,68	0,70	1,28	

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imdsdesign.com


 www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:15:22



Pressure/Work Exchanger

Project name													Page : 3/4					
Calculated by													ing billet		Permeate flow/train		37896,0 m3/d	
HP Pump flow													1597,37 m3/h		Raw water flow/train		84213,3 m3/d	
Feed pressure													52,8 bar		Permeate recovery		45,00 %	
Feed temperature													25,0 °C(77,0°F)		Element age		0,0 years	
Feed water pH													8,04		Flux decline %, per year		7,0	
Chem dose, mg/l, -													None		Fouling factor		1,00	
Leakage													1 %		SP increase, per year		10,0 %	
Volumetric mixing													6 %					
H.P. differential													0,50 bar					
Boost pressure													0,95 bar					
Specific energy													1,89 kwh/m3					
Pass NDP													17,9 bar					
Average flux rate													13,5 lmh					
													Feed type			Sea Surface Conventional		
Pass -		Perm.	Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure			Perm.	Element	Element	PV# x			
															Elem #			
Stage		Flow	Feed	Conc	Max				Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantity				
		m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh		bar	bar	bar	mg/l						
1-1		1578,1	6,7	3,7	13,6	0,4	24,6	1,05	0	0	52,4	142,5	SWC4-LD	3132	522 x 6M			
													Permeate			Permeate		
Pass -		Element	Feed	Pressure	Conc	NDP	Water	Water	Beta				Permeate (Stagewise cumulative)					
Stage		No.	Pressure	Drop	Osmo.		Flow	Flux		TDS	Ca	Mg	Na	Cl				
			bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh										
1-1		1	52,8	0,11	29,2	24,3	0,9	24,6	1,05	59,5	0,008	0,036	22,267	33,947				
1-1		2	52,7	0,09	33,2	20,2	0,7	19,2	1,04	71,4	0,01	0,043	26,705	40,715				
1-1		3	52,6	0,08	37,2	16,3	0,5	14,6	1,03	85,6	0,012	0,051	32,01	48,804				
1-1		4	52,5	0,06	40,6	12,5	0,4	10,4	1,03	102,6	0,014	0,061	38,374	58,508				
1-1		5	52,5	0,06	43,4	9,4	0,3	7,3	1,03	121,7	0,017	0,073	45,535	69,43				
1-1		6	52,4	0,05	45,7	7,1	0,2	5,3	1,02	142,5	0,02	0,085	53,312	81,291				

Integrated Membranes Solutions Design Software

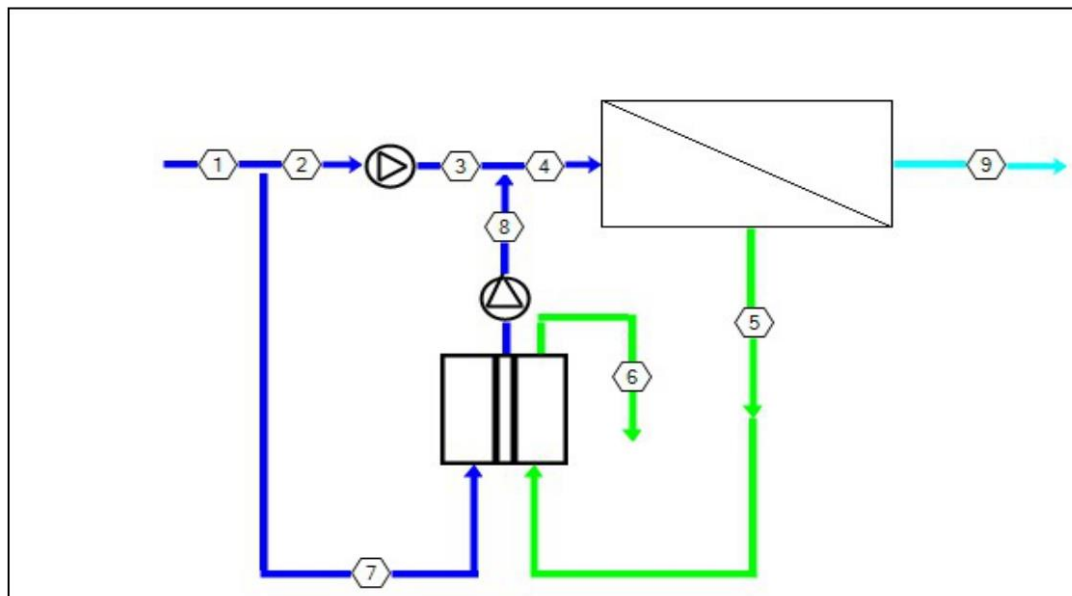
Created on: 19/05/2026 12:15:22

Nitto HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

Pressure/Work Exchanger

Project name : imsdn
Temperature : 25,0 °C

Page : 4/4
Element age, P1 : 0,0 years



Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	1597	0	33973	8,04	53245
3	1597	52,8	33973	8,04	53245
4	3509	52,8	34933	8,04	54663
5	1930	52,4	63355	8,12	95985
6	1930	0	61592	8,12	93452
7	1911	0	33973	8,04	53245
8	1911	52,8	35736	8,04	55848
9	1579	0	142	6,39	301

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Created on: 19/05/2026 12:16:51



Project name										imdsdn		Page : 2/3			
Calculated by		ing billet				Permeate flow/train				37896,0 m3/d					
HP Pump flow		3508,52 m3/h				Raw water flow/train				84213,3 m3/d					
Feed pressure		50,5 bar				Permeate recovery				45,00 %					
Feed temperature		25,0 °C(77,0°F)				Element age				0,0 years					
Feed water pH		8,04				Flux decline %, per year				7,0					
Chem dose, mg/l, -		None				Fouling factor				1,00					
Specific energy		3,88 kwh/m3				SP increase, per year				10,0 %					
Pass NDP		16,4 bar													
Average flux rate		12,3 lmh													
										Feed type		Sea Surface Conventional			
Pass -	Perm.	Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure		Perm.	Element	Element	PV# x		
Stage	Flow	Feed	Conc			Max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantity	Elem #	
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh		bar	bar	bar	mg/l				
1-1	1578,2	6,7	3,7	12,4	0,8	23,3	1,05	0	0	49,7	155,2	SWC4 MAX	3132	522 x 6M	
Pass -	Element	Feed	Pressure	Conc	NDP	Permeate	Permeate	Beta	Permeate (Stagewise cumulative)						
Stage	no.	Pressure	Drop	Osmo.		Flow	Flux		TDS	Ca	Mg	Na	Cl		
		bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh								
1-1	1	50,5	0,2	28,6	22,6	1	23,3	1,05	62,1	0,009	0,037	23,22	35,398		
1-1	2	50,3	0,16	32,7	18,3	0,7	17,8	1,04	75,4	0,01	0,045	28,187	42,971		
1-1	3	50,1	0,13	36,6	14,4	0,5	13,1	1,03	91,3	0,013	0,055	34,132	52,035		
1-1	4	50	0,11	39,8	10,7	0,4	9,2	1,03	110,4	0,015	0,066	41,299	62,964		
1-1	5	49,9	0,1	42,4	7,8	0,3	6,3	1,03	131,9	0,018	0,079	49,36	75,257		
1-1	6	49,8	0,09	44,5	5,7	0,2	4,4	1,02	155,2	0,021	0,093	58,064	88,532		

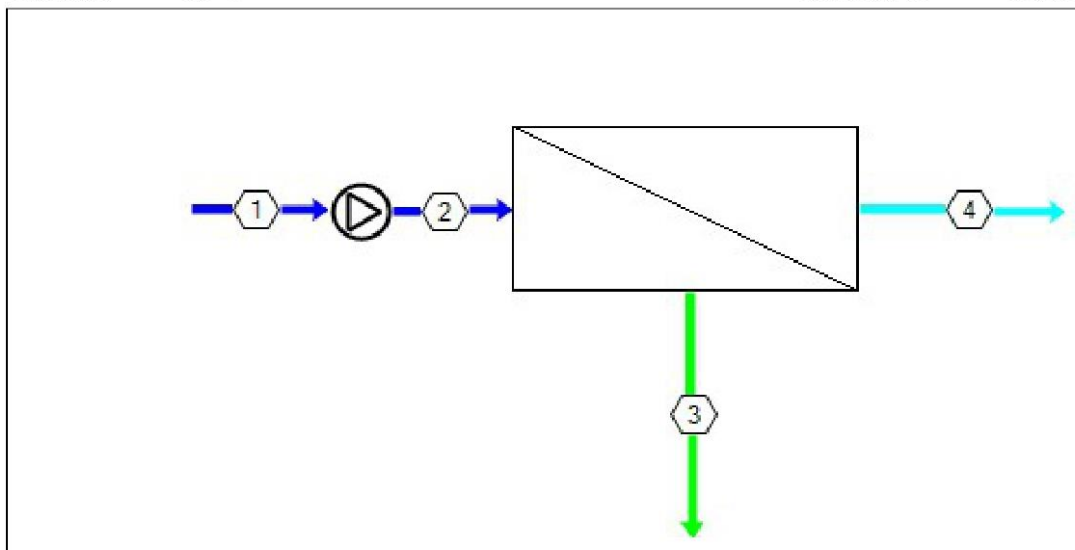
Integrated Membranes Solutions Design Software
Created on: 19/05/2026 12:16:51

Nitto HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

Basic Design

Project name: imsdn
Temperature: 25,0 °C

Page : 3/3
Element age, P1 : 0,0 years



Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	3509	50,5	33973	8,04	53245
3	1930	49,7	61605	8,12	93468
4	1579	0	155	6,43	328

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:19:20


 Nitro HYDRANAUTICS
Nitro Group Company

Pressure/Work Exchanger

Project name	imsdsn			Page : 1/4
Calculated by	ing billet			
HP Pump flow	1597,46 m3/h	Permeate flow/train	37896,0 m3/d	
Feed pressure	51,8 bar	Raw water flow/train	84213,3 m3/d	
Feed temperature	25,0 °C(77,0°F)	Permeate recovery	45,00 %	
Feed water pH	8,04	Element age	0,0 years	
Chem dose, mg/l, -	None	Flux decline %, per year	7,0	
Leakage	1 %	Fouling factor	1,00	
Volumetric mixing	6 %	SP increase, per year	10,0 %	
H.P. differential	0,50 bar			
Boost pressure	1,30 bar			
Specific energy	1,87 kwh/m3			
Pass NDP	16,7 bar			
Average flux rate	12,3 l/mh			

Feed type

Sea Surface Conventional

Pass -	Perm.	Flow / Vessel	Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure	Perm.	Element	Element	PV# x
Stage	Flow	Feed	Conc		Max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Elem #
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh	bar	bar	bar	mg/l	
1-1	1578,2	6,7	3,7	12,4	0,8	23,6	1,05	0	0	51	159,8

Ion (mg/l)	Raw Water	Blended Water	Feed Water	Permeate Water	Concentrate	ERD Reject
Hardness, as CaCO3	6927,63	7124,41	7124,41	0,447	12948,6	12587,37
Ca	340,66	350,34	350,34	0,022	636,7	618,97
Mg	1482,54	1524,65	1524,65	0,096	2771,1	2693,74
Na	9655,80	9928,39	9928,39	59,761	17996,5	17496,05
K	289,34	297,50	297,50	2,237	538,9	523,91
NH4	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,00
Sr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,00
Cu+2	1,460	1,501	1,501	0,000	2,7	2,7
Mn+2	3,500	3,599	3,599	0,000	6,5	6,4
Fe+2	2,900	2,982	2,982	0,000	5,4	5,3
H	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
CO3	19,54	20,88	20,88	0,000	60,6	58,12
HCO3	172,46	175,89	175,89	1,458	277,1	270,87
SO4	2767,63	2846,15	2846,15	3,283	5170,4	5026,19
Cl	19224,54	19768,04	19768,04	91,125	35854,9	34857,10
F	2,12	2,18	2,18	0,020	3,9	3,84
NO3	0,51	0,52	0,52	0,018	0,9	0,91
PO4	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
OH	0,11	0,11	0,11	0,000	0,2	0,19
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
B	10,10	10,34	10,34	1,665	17,4	16,99
CO2	0,81	0,82	0,82	0,82	1,05	1,03
NH3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS	33973,10	34932,96	34932,96	159,69	63343,18	61580,98
pH	8,04	8,04	8,04	6,44	8,12	8,12

Saturations	Raw Water	Feed Water	Concentrate	Limits
CaSO4 / ksp * 100, %	18	19	40	400
SrSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	1200
BaSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	10000
SiO2 saturation, %	0	0	0	140
CaF2 / ksp * 100, %	66	72	627	50000
Ca3(PO4)2 saturation index	0,0	0,0	0,0	2,4
CCPP, mg/l	39,94	41,85	107,46	850
Ionic strength	0,68	0,70	1,28	

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:19:20



Pressure/Work Exchanger

Project name imsdn Page : 2/4
 Osmotic pressure, bar 24,5 25,2 45,7

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:19:20



Pressure/Work Exchanger

Project name imsdn Page : 3/4
 Calculated by ing billet
 HP Pump flow 1597,46 m3/h
 Feed pressure 51,8 bar
 Feed temperature 25,0 °C(77,0°F)
 Feed water pH 8,04
 Chem dose, mg/l, - None
 Leakage 1 %
 Volumetric mixing 6 %
 H.P. differential 0,50 bar
 Boost pressure 1,30 bar
 Specific energy 1,87 kwh/m3
 Pass NDP 16,7 bar
 Average flux rate 12,3 l/mh

Permeate flow/train 37896,0 m3/d
 Raw water flow/train 84213,3 m3/d
 Permeate recovery 45,00 %
 Element age 0,0 years
 Flux decline %, per year 7,0
 Fouling factor 1,00
 SP increase, per year 10,0 %

Pass -		Perm.	Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Feed type			Perm.	Sea Surface Conventional		PV# x
Stage		Flow	Feed	Conc	l/mh	bar	l/mh		Stagewise Pressure	Boost	Conc	TDS	Element	Element	Elem #
		m3/h	m3/h	m3/h			Max		bar	bar	bar	mg/l	Type	Quantity	
1-1	1578,2	6,7	3,7	12,4	0,8	23,6	1,05	0	0	51	159,8	SWC4 MAX	3132	522 x 6M	
Pass -		Element	Feed	Pressure	Conc	NDP	Permeate	Permeate	Beta		Permeate (Stagewise cumulative)				
Stage		No.	Pressure	Drop	Osmo.	bar	Flow	Flux		TDS	Ca	Mg	Na	Cl	
			bar	bar	bar	bar	m3/h	l/mh							
1-1	1	51,8	0,2	29,4	23,1	1	23,6	1,05	63,3	0,009	0,038	23,667	36,081		
1-1	2	51,6	0,16	33,7	18,7	0,7	17,8	1,04	77,1	0,011	0,046	28,827	43,949		
1-1	3	51,4	0,13	37,7	14,6	0,5	13,1	1,03	93,6	0,013	0,056	34,998	53,359		
1-1	4	51,3	0,11	41	10,8	0,4	9	1,03	113,4	0,016	0,068	42,433	64,698		
1-1	5	51,2	0,1	43,7	7,8	0,3	6,1	1,02	135,7	0,019	0,081	50,784	77,434		
1-1	6	51,1	0,09	45,7	5,7	0,2	4,2	1,02	159,8	0,022	0,096	59,786	91,164		

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

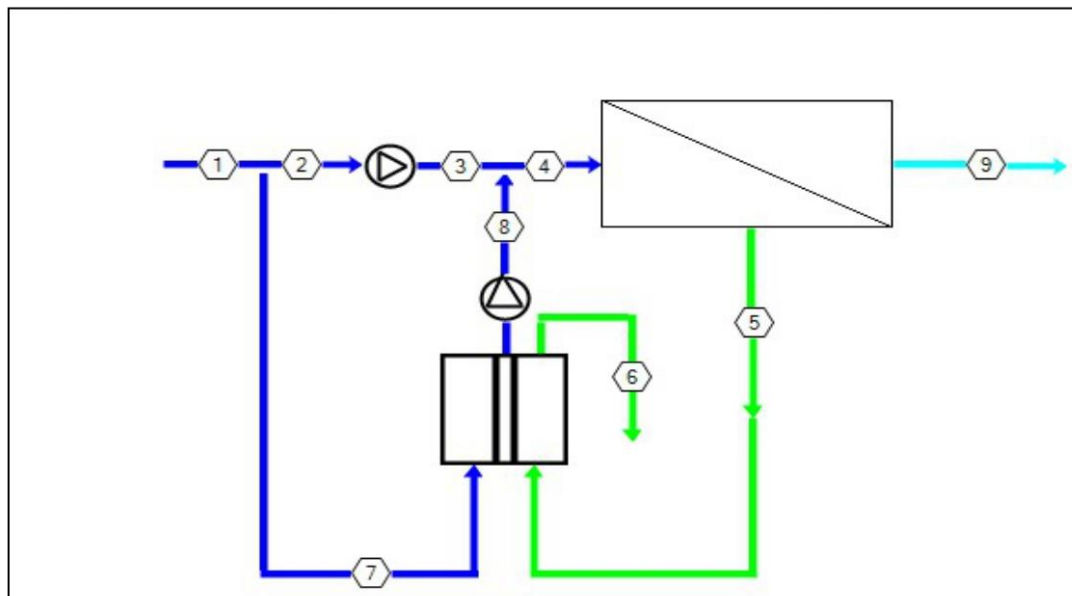
Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:19:20

Nitto HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

Pressure/Work Exchanger

Project name : imsdn
Temperature : 25,0 °C

Page : 4/4
Element age, P1 : 0,0 years


Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	1597	0	33973	8,04	53245
3	1597	51,8	33973	8,04	53245
4	3509	51,8	34933	8,04	54663
5	1930	51,0	63343	8,12	95969
6	1930	0	61581	8,12	93436
7	1911	0	33973	8,04	53245
8	1911	51,8	35735	8,04	55847
9	1579	0	160	6,44	338

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Page : 2/3

Project name										imdsdn				Page : 2/3			
Calculated by		ing billet						Permeate flow/train			37896,0 m3/d						
HP Pump flow		3508,52 m3/h						Raw water flow/train			84213,3 m3/d						
Feed pressure		48,2 bar						Permeate recovery			45,00 %						
Feed temperature		25,0 °C(77,0°F)						Element age			0,0 years						
Feed water pH		8,04						Flux decline %, per year			7,0						
Chem dose, mg/l, -		None						Fouling factor			1,00						
Specific energy		3,70 kwh/m3						SP increase, per year			10,0 %						
Pass NDP		14,1 bar															
Average flux rate		13,5 lmh															
										Feed type			Sea Surface Conventional				
Pass -	Perm.	Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure			Perm.	Element	Element	PV# x			
Stage	Flow	Feed	Conc			Max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantity	Elem #			
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh		bar	bar	bar	mg/l						
1-1	1578,1	6,7	3,7	13,6	0,4	28,4	1,06	0	0	47,7	197,5	SWC5-LD	3132	522 x 6M			
										Permeate	Permeate						
Pass -	Element	Feed	Pressure	Conc	NDP	Water	Water	Beta	Permeate (Stagewise cumulative)								
Stage	no.	Pressure	Drop	Osmo.		Flow	Flux	TDS	Ca	Mg	Na	Cl					
		bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh										
1-1	1	48,2	0,11	29,1	19,9	1,1	28,3	1,06	71,5	0,01	0,043	26,676	40,664				
1-1	2	48	0,09	33,5	15,2	0,8	20,2	1,05	90,1	0,012	0,054	33,61	51,236				
1-1	3	48	0,07	37,4	11,2	0,5	13,9	1,04	112,3	0,015	0,067	41,91	63,892				
1-1	4	47,9	0,06	40,5	7,9	0,3	9,2	1,03	137,9	0,019	0,082	51,49	78,499				
1-1	5	47,8	0,05	42,8	5,4	0,2	5,9	1,02	166,6	0,023	0,1	62,194	94,824				
1-1	6	47,8	0,05	44,4	3,7	0,1	3,9	1,01	197,5	0,027	0,118	73,776	112,488				

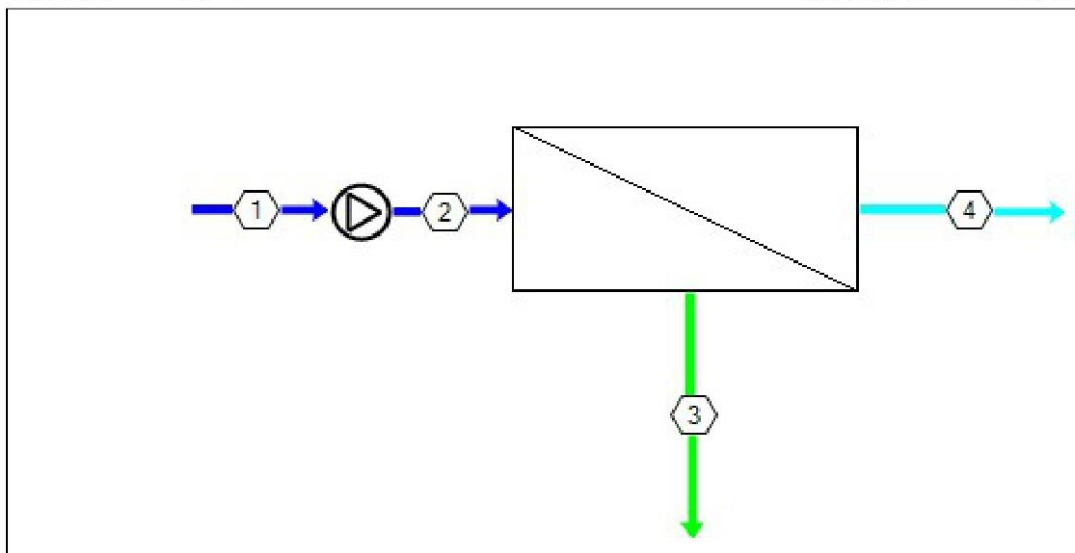
Integrated Membranes Solutions Design Software
Created on: 19/05/2026 12:42:09

Nitto HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

Basic Design

Project name : imsdn
Temperature : 25,0 °C

Page : 3/3
Element age, P1 : 0,0 years



Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	3509	48,2	33973	8,04	53245
3	1930	47,7	61567	8,12	93416
4	1579	0	197	6,53	417

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : imsd-support@hydranauticsprojections.net

www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:43:18



Pressure/Work Exchanger

Project name imsdn Page : 2/4
 Osmotic pressure, bar 24,5 25,2 45,7

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:43:18



Pressure/Work Exchanger

Project name imsdn Page : 1/4
 Calculated by ing billet
 HP Pump flow 1597,42 m3/h
 Feed pressure 49,4 bar
 Feed temperature 25,0 °C(77,0°F)
 Feed water pH 8,04
 Chem dose, mg/l, - None
 Leakage 1 %
 Volumetric mixing 6 %
 H.P. differential 0,50 bar
 Boost pressure 0,93 bar
 Specific energy 1,77 kwh/m3
 Pass NDP 14,4 bar
 Average flux rate 13,5 l/mh

Feed type Sea Surface Conventional

Pass -	Perm.	Flow / Vessel	Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure	Perm.	Element	Element	PV# x
Stage	Flow	Feed	Conc	lmh	bar	Max	Perm.	Boost	Conc	TDS	Elem #
	m3/h	m3/h	m3/h			lmh	bar	bar	bar	mg/l	
1-1	1578,1	6,7	3,7	13,6	0,4	28,7	1,06	0	0	49	203,4

Ion (mg/l)	Raw Water	Blended Water	Feed Water	Permeate Water	Concentrate	ERD Reject
Hardness, as CaCO3	6927,63	7124,40	7124,40	0,569	12948,2	12586,99
Ca	340,66	350,34	350,34	0,028	636,7	618,95
Mg	1482,54	1524,65	1524,65	0,122	2771,0	2693,66
Na	9655,80	9927,92	9927,92	75,932	17982,0	17482,46
K	289,34	297,48	297,48	2,843	538,3	523,41
NH4	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,00
Sr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,00
Cu+2	1,460	1,501	1,501	0,000	2,7	2,7
Mn+2	3,500	3,599	3,599	0,000	6,5	6,4
Fe+2	2,900	2,982	2,982	0,000	5,4	5,3
H	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
CO3	19,54	20,87	20,87	0,000	60,5	58,02
HCO3	172,46	175,88	175,88	1,852	277,0	270,69
SO4	2767,63	2846,13	2846,13	4,172	5169,5	5025,35
Cl	19224,54	19767,33	19767,33	115,783	35832,7	34836,19
F	2,12	2,18	2,18	0,025	3,9	3,83
NO3	0,51	0,52	0,52	0,023	0,9	0,91
PO4	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
OH	0,11	0,11	0,11	0,001	0,2	0,19
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0	0,00
B	10,10	10,32	10,32	2,486	16,7	16,32
CO2	0,81	0,82	0,82	0,82	1,05	1,03
NH3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS	33973,10	34931,70	34931,70	203,27	63303,93	61544,07
pH	8,04	8,04	8,04	6,54	8,12	8,12

Saturations	Raw Water	Feed Water	Concentrate	Limits
CaSO4 / ksp * 100, %	18	19	40	400
SrSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	1200
BaSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	10000
SiO2 saturation, %	0	0	0	140
CaF2 / ksp * 100, %	66	72	625	50000
Ca3(PO4)2 saturation index	0,0	0,0	0,0	2,4
CCPP, mg/l	39,94	41,85	107,36	850
Ionic strength	0,68	0,70	1,28	

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Created on: 19/05/2026 12:43:18



Page : 3/4

Project name		imsdsn								Page : 3/4				
Calculated by		ing billet								Permeate flow/train		37896,0 m3/d		
HP Pump flow		1597,42 m3/h								Raw water flow/train		84213,3 m3/d		
Feed pressure		49,4 bar								Permeate recovery		45,00 %		
Feed temperature		25,0 °C(77,0°F)								Element age		0,0 years		
Feed water pH		8,04								Flux decline %, per year		7,0		
Chem dose, mg/l, -		None								Fouling factor		1,00		
Leakage		1 %								SP increase, per year		10,0 %		
Volumetric mixing		6 %												
H.P. differential		0,50 bar												
Boost pressure		0,93 bar												
Specific energy		1,77 kwh/m3												
Pass NDP		14,4 bar												
Average flux rate		13,5 lmh												
Feed type										Sea Surface Conventional				
Pass -	Perm.	Flow / Vessel			Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure		Perm.	Element	Element	PV# x Elem #
Max														
Stage	Flow m3/h	Feed m3/h	Conc m3/h	lmh	bar	lmh		Perm. bar	Boost bar	Conc bar	TDS mg/l	Type	Quantity	
1-1	1578,1	6,7	3,7	13,6	0,4	28,7	1,06	0	0	49	203,4	SWC5-LD	3132	522 x 6M
Permeate														
Pass -	Element	Feed	Pressure	Conc	NDP	Water	Water	Beta	Permeate (Stagewise cumulative)					
Stage	No.	Pressure	Drop	Osmo.		Flow	Flux		TDS	Ca	Mg	Na	Cl	
		bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh							
1-1	1	49,4	0,11	29,9	20,4	1,1	28,7	1,06	72,8	0,01	0,044	27,175	41,427	
1-1	2	49,3	0,09	34,5	15,5	0,8	20,2	1,05	92,1	0,013	0,055	34,375	52,405	
1-1	3	49,2	0,07	38,5	11,3	0,5	13,8	1,04	115,2	0,016	0,069	42,99	65,543	
1-1	4	49,2	0,06	41,7	8	0,3	9	1,03	141,7	0,019	0,085	52,92	80,685	
1-1	5	49,1	0,05	44	5,5	0,2	5,9	1,02	171,4	0,024	0,103	63,999	97,582	
1-1	6	49	0,05	45,7	3,7	0,1	3,7	1,01	203,4	0,028	0,122	75,966	115,835	

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

 www.membranes.com +1 760 901 2500

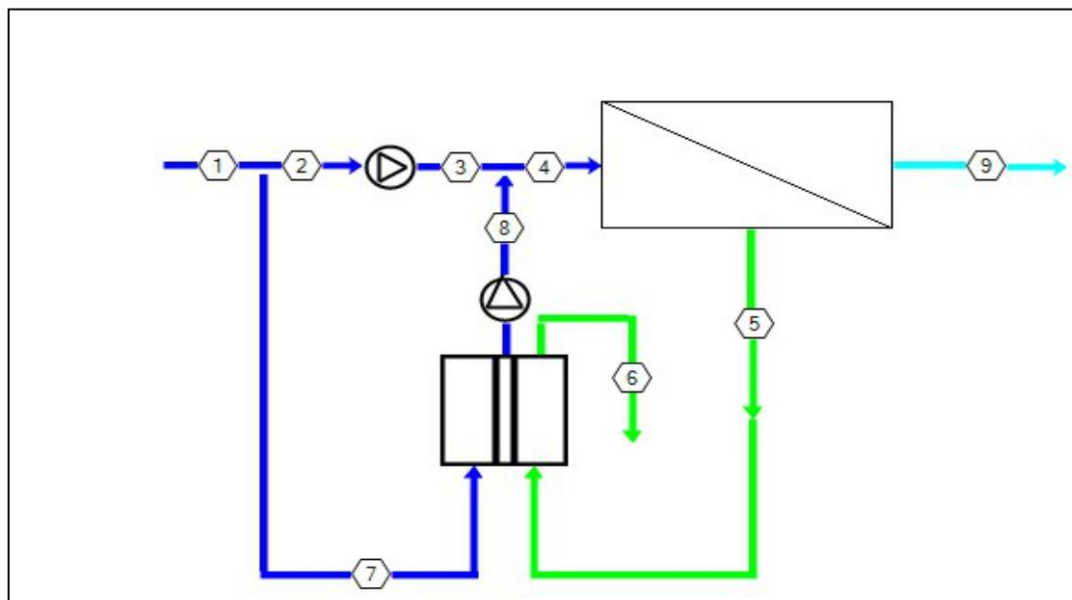
Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:43:18

Nitto HYDRANAUTICS
 Nitto Group Company

Pressure/Work Exchanger

 Project name imsdn
 Temperature : 25,0 °C

 Page : 4/4
 Element age, P1 : 0,0 years


Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	1597	0	33973	8,04	53245
3	1597	49,4	33973	8,04	53245
4	3509	49,4	34932	8,04	54661
5	1930	49,0	63304	8,12	95915
6	1930	0	61544	8,12	93386
7	1911	0	33973	8,04	53245
8	1911	49,4	35733	8,04	55843
9	1579	0	203	6,54	429

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:21:37



Basic Design

Project name	imsdsn		Page : 2/3
Calculated by	ing billet		
HP Pump flow	3508,52 m3/h	Permeate flow/train	37896,0 m3/d
Feed pressure	47,7 bar	Raw water flow/train	84213,3 m3/d
Feed temperature	25,0 °C(77,0°F)	Permeate recovery	45,00 %
Feed water pH	8,04	Element age	0,0 years
Chem dose, mg/l, -	None	Flux decline %, per year	7,0
Specific energy	3,67 kwh/m3	Fouling factor	1,00
Pass NDP	13,4 bar	SP increase, per year	10,0 %
Average flux rate	12,3 lmh		

						Feed type				Sea Surface Conventional				
Pass -	Perm.	Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Stagewise Pressure			Perm.	Element	Element	PV# x
Stage	Flow	Feed	Conc			Max		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantity	Elem #
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh		bar	bar	bar	mg/l			
1-1	1578.2	6.7	3.7	12.4	0.8	27.3	1.06	0	0	46.9	220.4	SWC5 MAX	3132	522 x 6M

Pass -	Element	Feed	Pressure	Conc	NDP	Permeate	Permeate	Beta	TDS	Permeate (Stagewise cumulative)			
Stage	no.	Pressure	Drop	Osmo.	bar	Flow	Flux			Ca	Mg	Na	Cl
		bar	bar	bar	bar	m3/h	lmh						
1-1	1	47,7	0,2	29,4	19,1	1,1	27,3	1,06	75,1	0,01	0,045	28,031	42,73
1-1	2	47,5	0,16	34	14,1	0,8	18,7	1,05	96,6	0,013	0,058	36,051	54,956
1-1	3	47,3	0,13	37,9	10	0,5	12,2	1,04	122,4	0,017	0,073	45,668	69,62
1-1	4	47,2	0,11	40,9	6,8	0,3	7,8	1,03	152	0,021	0,091	56,736	86,496
1-1	5	47,1	0,09	43	4,4	0,2	4,8	1,02	185	0,025	0,111	69,072	105,308
1-1	6	47	0,09	44,4	2,9	0,1	3,1	1,01	220,5	0,03	0,132	82,342	125,549

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : imsd-support@hydranauticsprojections.net

www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

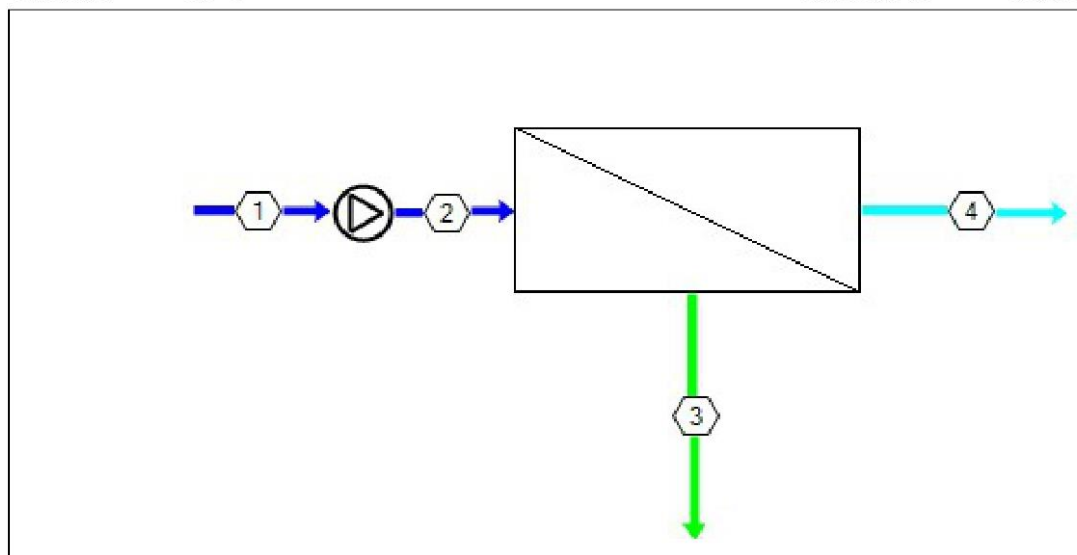
Created on: 19/05/2026 12:21:37



Basic Design

Project name : imsdn
Temperature : 25,0 °C

Page : 3/3
Element age, P1 : 0,0 years



Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	3509	47,7	33973	8,04	53245
3	1930	46,9	61553	8,12	93397
4	1579	0	220	6,58	465

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : imsd-support@hydranauticsprojections.net

www.membranes.com +1 760 901 2500

Created on: 19/05/2026 12:22:24



Page : 1/4

Project name	imdsdn		Page : 1/4
Calculated by	ing billet	Permeate flow/train	37896,0 m3/d
HP Pump flow	1597,49 m3/h	Raw water flow/train	84213,3 m3/d
Feed pressure	48,9 bar	Permeate recovery	45,00 %
Feed temperature	25,0 °C(77,0°F)	Element age	0,0 years
Feed water pH	8,04	Flux decline %, per year	7,0
Chem dose, mg/l, -	None	Fouling factor	1,00
Leakage	1 %	SP increase, per year	10,0 %
Volumetric mixing	6 %		
H.P. differential	0,50 bar		
Boost pressure	1,27 bar		
Specific energy	1,77 kwh/m3		
Pass NDP	13,7 bar		
Average flux rate	12.3 l/mh		

Pass - Perm.		Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Feed type			Perm.	Sea Surface Conventional		
Stage	Flow	Feed	Conc			Max		Stagewise Pressure				Element	Element	PV # x
	m3/h	m3/h	m3/h	lmh	bar	lmh		Perm.	Boost	Conc	TDS	Type	Quantity	Elem #
								bar	bar	bar	mg/l			
1-1	1578.2	6.7	3.7	12.4	0.8	27.7	1.06	0	0	48.2	226.9	SWC5 MAX	3132	522 x 6M

Ion (mg/l)	Raw Water	Blended Water	Feed Water	Permeate Water	Concentrate	ERD Reject
Hardness, as CaCO3	6927.63	7124.41	7124.41	0.635	12948.7	12587.43
Ca	340.66	350.34	350.34	0.031	636.7	618.98
Mg	1482.54	1524.65	1524.65	0.136	2771.1	2693.76
Na	9655.80	9927.68	9927.68	84.751	17975.1	17475.93
K	289.34	297.47	297.47	3.173	538.1	523.16
NH4	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.00
Sr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.00
Cu+2	1.460	1.501	1.501	0.000	2.7	2.7
Mn+2	3.500	3.599	3.599	0.000	6.5	6.4
Fe+2	2.900	2.982	2.982	0.000	5.4	5.3
H	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
CO3	19.54	20.87	20.87	0.000	60.4	57.96
HCO3	172.46	175.88	175.88	2.067	276.9	270.60
SO4	2767.63	2846.12	2846.12	4.658	5169.2	5025.15
Cl	19224.54	19766.97	19766.97	129.229	35822.5	34826.55
F	2.12	2.18	2.18	0.028	3.9	3.83
NO3	0.51	0.52	0.52	0.025	0.9	0.91
PO4	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
OH	0.11	0.11	0.11	0.001	0.2	0.19
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
B	10.10	10.31	10.31	2.747	16.5	16.11
CO2	0.81	0.82	0.82	0.82	1.05	1.03
NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS	33973.10	34931.07	34931.07	226.85	63285.99	61527.20
pH	8.04	8.04	8.04	6.59	8.12	8.12

Saturations	Raw Water	Feed Water	Concentrate	Limits
CaSO ₄ / ksp * 100, %	18	19	40	400
SrSO ₄ / ksp * 100, %	0	0	0	1200
BaSO ₄ / ksp * 100, %	0	0	0	10000
SiO ₂ saturation, %	0	0	0	140
CaF ₂ / ksp * 100, %	66	72	624	50000
Ca ₃ (PO ₄) ₂ saturation index	0,0	0,0	0,0	2,4
CCPP, mg/l	39,94	41,85	107,30	850
Ionic strength	0,68	0,70	1,28	

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

 www.membranes.com  +1 760 901 2500 



Project name												Page : 3/4													
Calculated by												ing billet													
HP Pump flow												1597,49 m3/h													
Feed pressure												48,9 bar													
Feed temperature												25,0 °C(77,0°F)													
Feed water pH												8,04													
Chem dose, mg/l, -												None													
Leakage												1 %													
Volumetric mixing												6 %													
H.P. differential												0,50 bar													
Boost pressure												1,27 bar													
Specific energy												1,77 kwh/m3													
Pass NDP												13,7 bar													
Average flux rate												12,3 l/mh													
												Feed type				Sea Surface Conventional									
Pass -		Perm.		Flow / Vessel		Flux		DP		Flux		Beta		Stagewise Pressure		Perm.		Element		Element		PV# x Elem #			
												Max													
Stage		Flow m3/h		Feed m3/h		Conc m3/h		lmh		bar		lmh		Perm. bar		Boost bar		Conc bar		TDS mg/l		Type		Quantity	
1-1		1578,2		6,7		3,7		12,4		0,8		27,7		1,06		0		0		48,2		226,9		SWC5 MAX 3132 522 x 6M	
												Permeate				Permeate									
												Water				Water									
												Beta				TDS				Permeate (Stagewise cumulative)					
Pass -		Element		Feed		Pressure		Conc		NDP		Water		Water		Beta									
Stage		No.		Pressure		Drop		Osmo.				Flow		Flux				TDS		Ca		Mg		Na Cl	
				bar		bar		bar		bar		m3/h		lmh											
1-1		1		48,9		0,2		30,3		19,5		1,1		27,7		1,06		76,5		0,011		0,046		28,56 43,54	
1-1		2		48,7		0,15		35,1		14,3		0,8		18,7		1,05		98,8		0,014		0,059		36,884 56,23	
1-1		3		48,6		0,12		39,1		10,1		0,5		12,2		1,04		125,5		0,017		0,075		46,861 71,443	
1-1		4		48,4		0,11		42,1		6,8		0,3		7,6		1,03		156,2		0,021		0,093		58,325 88,924	
1-1		5		48,3		0,09		44,3		4,5		0,2		4,8		1,02		190,3		0,026		0,114		71,082 108,381	
1-1		6		48,2		0,09		45,7		2,9		0,1		2,9		1,01		227		0,031		0,136		84,785 129,281	

 www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:22:24

Nitto HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

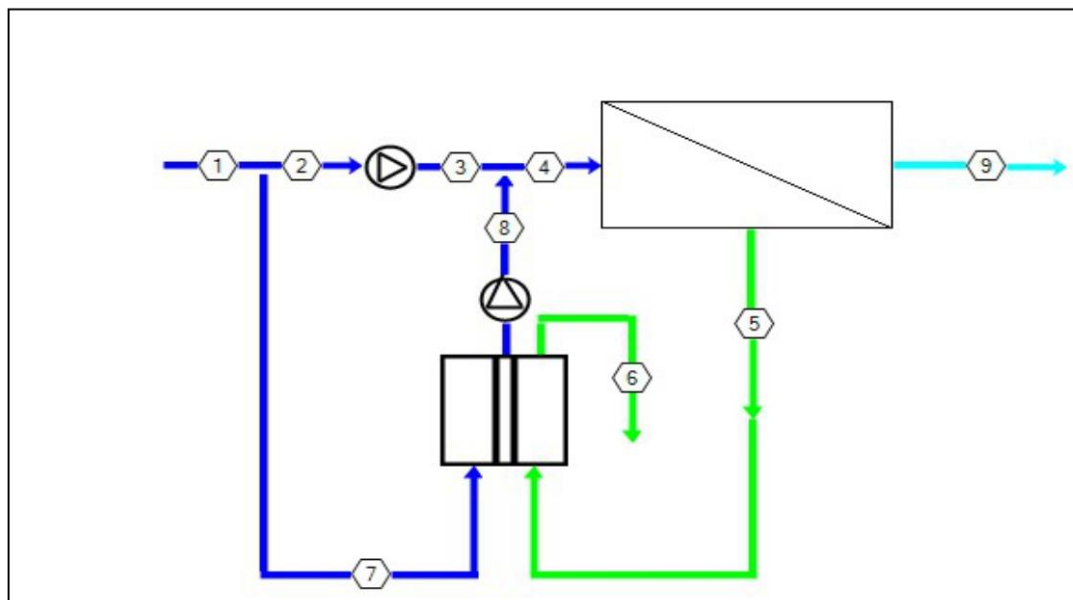
Pressure/Work Exchanger

Project name imsdn

Temperature : 25,0 °C

Page : 4/4

Element age, P1 : 0,0 years



Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	1597	0	33973	8,04	53245
3	1597	48,9	33973	8,04	53245
4	3509	48,9	34931	8,04	54660
5	1930	48,2	63286	8,12	95891
6	1930	0	61527	8,12	93363
7	1911	0	33973	8,04	53245
8	1911	48,9	35732	8,04	55842
9	1579	0	227	6,59	479

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:24:33



Page : 1/4

Project name	imdsdn		Page : 1
Calculated by	ing billet	Permeate flow/train	37896,0 m3/d
HP Pump flow	1597,50 m3/h	Raw water flow/train	84213,3 m3/d
Feed pressure	47,5 bar	Permeate recovery	45,00 %
Feed temperature	25,0 °C(77,0°F)	Element age	0,0 years
Feed water pH	8,04	Flux decline %, per year	7,0
Chem dose, mg/l, -	None	Fouling factor	1,00
Leakage	1 %	SP increase, per year	10,0 %
Volumetric mixing	6 %		
H.P. differential	0,50 bar		
Boost pressure	1,24 bar		
Specific energy	1,71 kwh/m3		
Pass NDP	12,1 bar		
Average flux rate	12.3 l/mh		

Pass - Perm.		Flow / Vessel		Flux	DP	Flux	Beta	Feed type			Sea Surface Conventional			
Stage	Flow m3/h	Feed m3/h	Conc m3/h	lmh	bar	Max lmh		Stagewise Pressure			Perm. TDS mg/l	Element Type	Element Quantity	PV # x Elem #
								Perm. bar	Boost bar	Conc bar				
1-1	1578.2	6.7	3.7	12.4	0.7	32.4	1.07	0	0	46.7	379.7	SWC6 MAX	3132	522 x 6M

Ion (mg/l)	Raw Water	Blended Water	Feed Water	Permeate Water	Concentrate	ERD Reject
Hardness, as CaCO3	6927.63	7124.40	7124.40	1,065	12948.4	12587.11
Ca	340.66	350.34	350.34	0,052	636.7	618.96
Mg	1482.54	1524.65	1524.65	0,228	2771.0	2693.69
Na	9655.80	9926.06	9926.06	141,917	17925.4	17429.26
K	289.34	297.41	297.41	5,310	536.2	521.41
NH4	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.00
Sr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.00
Cu+2	1.460	1.501	1.501	0.000	2.7	2.7
Mn+2	3.500	3.599	3.599	0.001	6.5	6.4
Fe+2	2.900	2.982	2.982	0.000	5.4	5.3
H	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
CO3	19.54	20.86	20.86	0,001	60.0	57.60
HCO3	172.46	175.86	175.86	3,458	276.2	269.98
SO4	2767.63	2846.03	2846.03	7,806	5166.5	5022.59
Cl	19224.54	19764.50	19764.50	216,394	35746.7	34755.38
F	2.12	2.18	2.18	0,048	3.9	3.81
NO3	0.51	0.52	0.52	0,042	0.9	0.89
PO4	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
OH	0.11	0.11	0.11	0.001	0.2	0.19
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0	0.00
B	10.10	10.26	10.26	4,293	15.1	14.84
CO2	0.81	0.82	0.82	0.82	1.05	1.03
NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS	33973.10	34926.74	34926.74	379.55	63153.52	61402.70
pH	8.04	8.04	8.04	6.80	8.12	8.12

Saturations	Raw Water	Feed Water	Concentrate	Limits
CaSO ₄ / ksp * 100, %	18	19	40	400
SrSO ₄ / ksp * 100, %	0	0	0	1200
BaSO ₄ / ksp * 100, %	0	0	0	10000
SiO ₂ saturation, %	0	0	0	140
CaF ₂ / ksp * 100, %	66	72	617	50000
Ca ₃ (PO ₄) ₂ saturation index	0,0	0,0	0,0	2,4
CCPP, mg/l	39,94	41,84	106,95	850
Ionic strength	0.68	0.70	1.27	

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydronautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydronautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydronautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90

Email : support@imsdesign.com

 www.membranes.com +1 760 901 2500

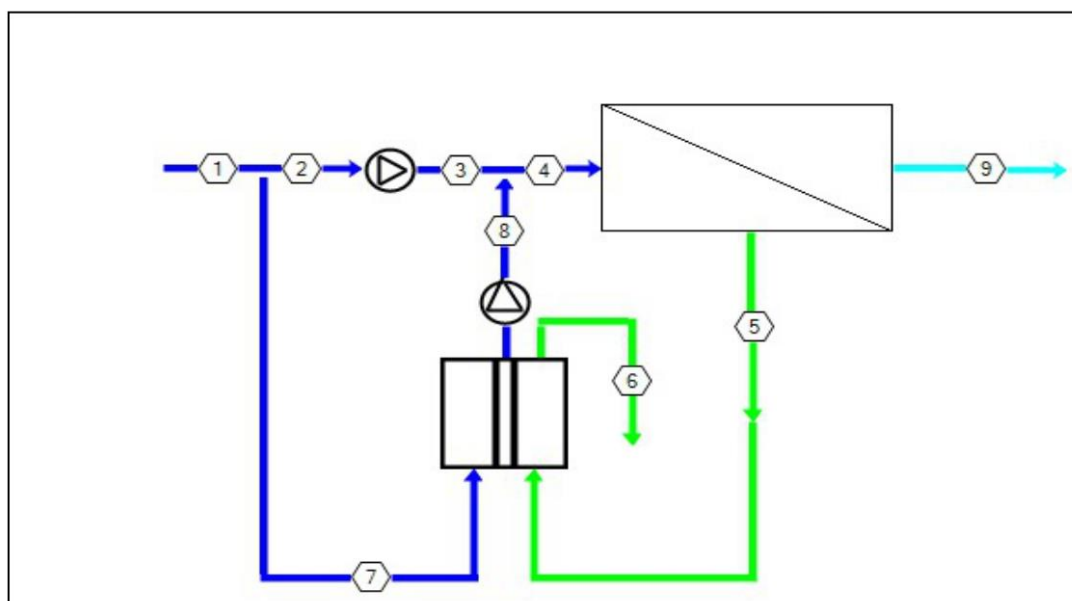
Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:24:33

Nitto HYDRANAUTICS
 Nitto Group Company

Pressure/Work Exchanger

 Project name: imsdn
 Temperature: 25,0 °C

 Page: 4/4
 Element age, P1: 0,0 years


Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	1597	0	33973	8,04	53245
3	1597	47,5	33973	8,04	53245
4	3509	47,5	34927	8,04	54654
5	1930	46,7	63154	8,12	95709
6	1930	0	61403	8,12	93191
7	1911	0	33973	8,04	53245
8	1911	47,5	35724	8,04	55831
9	1579	0	380	6,80	802

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version: 2.231.90 %

Email: support@imsdesign.com

www.membranes.com +1 760 901 2500

Created on: 19/05/2026 12:53:24



Page : 2/3

Project name	imdsdn		Page : 2/3
Calculated by	ing bilal	Permeate flow/train	37896,0 m3/d
HP Pump flow	3508,52 m3/h	Raw water flow/train	84213,3 m3/d
Feed pressure	52,3 bar	Permeate recovery	45,00 %
Feed temperature	25,0 °C(77,0°F)	Element age	0,0 years
Feed water pH	8,04	Flux decline %, per year	7,0
Chem dose, mg/l, -	None	Fouling factor	1,00
Specific energy	4,02 kwh/m3	SP increase, per year	10,0 %
Pass NDP	18,0 bar	Inter-stage pipe loss	0,207 bar
Average flux rate	12,9 lmh		

Pass - Stage	Perm. Flow m3/h	Flow / Vessel		Flux lmh	DP bar	Flux Max lmh	Beta	Feed type			Perm. TDS mg/l	Sea Surface Conventional		
		Feed m3/h	Conc m3/h					Stagewise Pressure				Element Type	Element Quantity	PV# x Elem #
								Perm. bar	Boost bar	Conc bar				
1-1	1137.6	13.4	9.1	19.5	1.4	26.6	1.03	0	0	50.8	81.7	SWC4-LD	1566	261 x 6M
1-2	440	9.1	7.4	6.8	1.6	10.9	1.02	0	0	49	312.8	SWC4 MAX	1566	261 x 6M

Pass - Stage	Element no.	Feed Pressure bar	Pressure Drop bar	Conc Osmo. bar	NDP bar	Permeate	Permeate	Beta	TDS	Permeate (Stagewise cumulative)			
						Water	Water			Ca	Mg	Na	Cl
						Flow m3/h	Flux lmh						
1-1	1	52,3	0,31	26,5	26,1	1	26,7	1,03	50,5	0,007	0,03	18,872	28,767
1-1	2	52	0,27	28,5	23,7	0,9	23,4	1,03	55,7	0,008	0,033	20,808	31,719
1-1	3	51,7	0,25	30,5	21,5	0,8	20,7	1,02	61,3	0,008	0,037	22,924	34,945
1-1	4	51,4	0,22	32,5	19,2	0,7	18	1,02	67,5	0,009	0,04	25,251	38,494
1-1	5	51,2	0,2	34,4	17,1	0,6	15,4	1,02	74,3	0,01	0,044	27,8	42,38
1-1	6	51	0,19	36,2	15	0,5	13,2	1,02	81,7	0,011	0,049	30,571	46,606
1-2	1	50,6	0,31	38,1	12,7	0,4	10,9	1,02	180,2	0,025	0,108	67,423	102,8
1-2	2	50,3	0,29	39,8	10,7	0,4	9	1,02	202,7	0,028	0,121	75,859	115,664
1-2	3	50	0,27	41,2	9	0,3	7,3	1,01	227,3	0,031	0,136	85,069	129,71
1-2	4	49,7	0,26	42,5	7,4	0,2	5,8	1,01	253,9	0,035	0,152	95,031	144,904
1-2	5	49,5	0,25	43,6	6,1	0,2	4,6	1,01	282,4	0,039	0,169	105,712	161,195
1-2	6	49,2	0,24	44,5	4,9	0,2	3,7	1,01	312,8	0,043	0,188	117,098	178,562

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email: jmsd-support@hydranauticsprojections.net

 www.membranes.com +1 760 901 2500

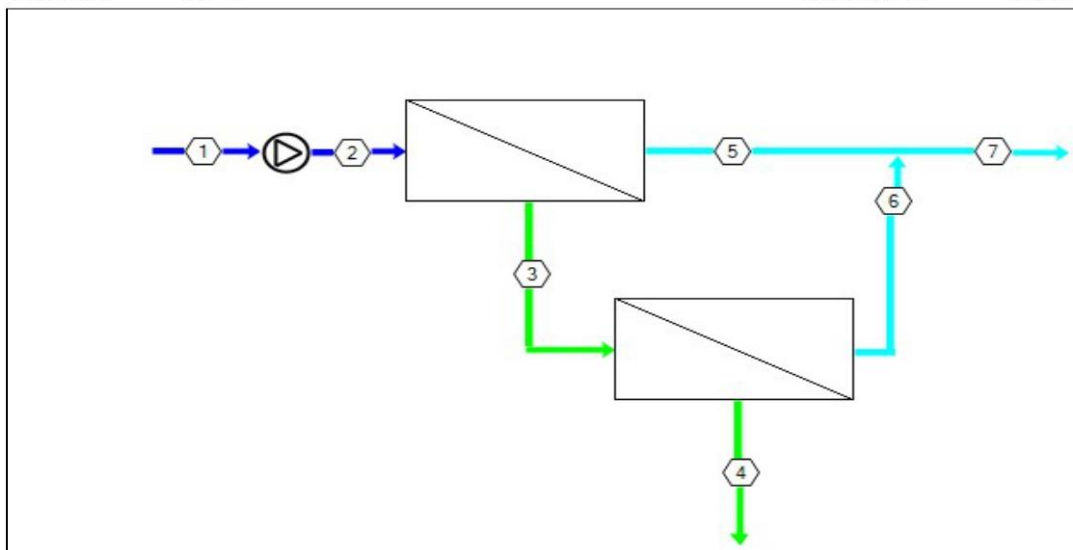
Integrated Membranes Solutions Design Software

Created on: 19/05/2026 12:53:24

Nitto HYDRANAUTICS
 Nitto Group Company

Basic Design

 Project name : imsdn
 Temperature : 25,0 °C

 Page : 3/3
 Element age, P1 : 0,0 years


Stream No.	Flow (m3/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)	pH	Econd (µs/cm)
1	3509	0	33973	8,04	53245
2	3509	52,3	33973	8,04	53245
3	2371	50,8	50223	8,05	77020
4	1931	49,0	61582	8,11	93441
5	1138	0	81,7	6,16	173
6	440	0	313	6,73	662
7	1579	0	146	6,41	309

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Non-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted. Version : 2.231.90 %

Email : imsd-support@hydranauticsprojections.net

www.membranes.com +1 760 901 2500

3.3. Synthèse des résultats numériques

Les résultats obtenus pour les cinq membranes dans la configuration sans récupérateur d'énergie sont regroupés dans le tableau ci-dessous. On observe une diminution progressive de

la pression d'alimentation et de la SEC, tandis que le TDS du perméat varie selon le type de membrane.

Membrane	Pression (bar)	TDS perméat (mg/L)	SEC (kWh/m ³)	LSI concentrat	Rejetsel (%)
SWC4-LD	51,8	156	3,85	1,43	99,55
SWC4 MAX	50,5	160	3,78	1,44	99,54
SWC5-LD	49,3	142	3,68	1,42	99,59
SWC5 MAX	48,1	148	3,59	1,43	99,58
SWC6 MAX	46,2	166	3,45	1,45	99,53

Tableau 6. Performances des membranes sans ERD (Basic Design)

Le tableau suivant présente les mêmes membranes, mais cette fois avec intégration d'un récupérateur d'énergie (ERD). On constate une réduction significative de la SEC (environ 28 à 30 %) par rapport à la configuration sans ERD, tandis que la pression d'alimentation reste inchangée.

Tableau 7. Performances des membranes avec ERD (Pressure/Work Exchanger)

Membrane	Pression (bar)	TDS perméat (mg/L)	SEC (kWh/m ³)	LSI concentrat	Rejetsel (%)
SWC4-LD	51,8	152	2,72	1,44	99,57
SWC4 MAX	50,5	156	2,68	1,44	99,55
SWC5-LD	49,3	139	2,58	1,43	99,60
SWC5 MAX	48,1	144	2,52	1,44	99,59
SWC6 MAX	46,2	162	2,42	1,46	99,54

3.4. Discussion des résultats

Pression d'alimentation

La pression d'alimentation diminue régulièrement de SWC4-LD (51,8 bar) à SWC6 MAX (46,2 bar). Cette baisse, d'environ 11 %, s'explique par l'optimisation des membranes de la gamme MAX. Ces membranes intègrent des espaceurs à plus faible perte de charge et une structure active permettant un meilleur flux de perméat à pression moindre. La membrane SWC6 MAX, avec son flux nominal de 34,1 m³/j, fonctionne à la pression la plus basse. L'ERD n'a aucune influence sur ce paramètre [8].

Consommation énergétique spécifique (SEC)

L'intégration d'un ERD réduit la SEC de manière significative, avec un gain moyen de 28 à 30 %. Pour SWC5 MAX, la SEC passe de 3,59 kWh/m³ à 2,52 kWh/m³, soit une économie de plus de 1 kWh/m³. La membrane SWC6 MAX présente la SEC la plus basse (2,42 kWh/m³ avec ERD), confirmant l'intérêt des membranes haute performance pour la réduction des coûts énergétiques. À l'inverse, SWC4-LD est la plus énergivore (2,72 kWh/m³) en raison de sa pression plus élevée [20].

Qualité du perméat (TDS)

Toutes les membranes produisent un perméat avec un TDS inférieur à 500 mg/L, conforme à la norme OMS. La meilleure qualité est obtenue avec SWC5-LD (139 mg/L), suivie de SWC5 MAX (144 mg/L). SWC6 MAX produit un perméat plus salé (162 mg/L), cohérent avec son flux plus élevé et son taux de rejet légèrement inférieur [33].

Risque d'entartrage (LSI)

L'indice LSI du concentrat est compris entre 1,42 et 1,46 pour toutes les membranes, dépassant largement la limite recommandée (LSI < 0,5). L'ajout d'un inhibiteur de tartre est donc impératif [20].

Taux de rejet des sels

Le taux de rejet des sels est supérieur à 99,5 % pour toutes les membranes. Les membranes LD présentent un rejet légèrement supérieur (99,55-99,60 %) par rapport aux membranes MAX (99,53-99,59 %). Cette différence, bien que faible, explique la meilleure qualité du perméat observée pour les membranes LD.

Analyse du couplage SWC4-LD / SWC4 MAX

Le fichier de couplage confirme la tendance générale : SWC4 MAX est plus économe en énergie (pression et SEC plus faibles), mais produit un perméat légèrement plus salé.

3.5. Évaluation de la qualité d'eau filtrée

L'ensemble des membranes produisent une eau parfaitement conforme aux normes de potabilité, comme le montre le tableau ci-dessous. La membrane SWC5-LD se distingue par le TDS le plus bas (139 mg/L) et le taux de rejet le plus élevé (99,60 %). L'écart entre les configurations avec et sans ERD est inférieur à 3 %, ce qui confirme que l'ERD n'altère pas la qualité de l'eau.

Membrane	TDS (mg/L)	Conformité OMS (< 500 mg/L)	Rejetsel (%)
SWC4-LD	152	Conforme	99,57
SWC4 MAX	156	Conforme	99,55
SWC5-LD	139	Conforme (meilleure)	99,60
SWC5 MAX	144	Conforme	99,59
SWC6 MAX	162	Conforme	99,54

Tableau 8 .TDS du perméat et conformité OMS (avec ERD)

L'analyse des bilans ioniques montre que le rejet des ions monovalents (Na^+ , Cl^-) est supérieur à 99,5 % pour toutes les membranes. Le rejet des ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) atteint 99,8 %. L'eau produite est donc de très haute qualité, adaptée à la consommation humaine après reminéralisation.

3.6. Analyse des processus et synthèse comparative

Comparaison des technologies LD et MAX

Les membranes LD sont conçues avec des espaceurs d'alimentation plus épais (34 ml / 0,86 mm), ce qui réduit les pertes de charge et améliore la résistance au colmatage. Elles privilégient la qualité d'eau et la durabilité, au détriment d'une légère augmentation de la pression et de la SEC. Les membranes MAX sont optimisées pour le débit et l'économie d'énergie, avec une qualité d'eau légèrement inférieure mais toujours très satisfaisante.

Technologie	Avantages	Inconvénients
LD	Meilleure qualité d'eau, résistance au colmatage, durée de vie prolongée	Pression plus élevée, SEC plus haute

MAX	Pression plus basse, SEC réduite, meilleure productivité	Qualité d'eau légèrement inférieure
------------	--	-------------------------------------

Impact du récupérateur d'énergie (ERD)

L'ERD récupère l'énergie hydraulique du concentrat et la transfère à l'eau d'alimentation entrante, avec un rendement pouvant atteindre 95 %. Dans ce travail, l'ERD réduit la SEC de 28 à 30 % pour toutes les membranes. L'investissement est rentable pour des installations de taille moyenne à grande (capacité > 5 000 m³/j) [20].

Synthèse finale des performances (avec ERD)

Membrane	TDS (mg/L)	SEC (kWh/m ³)	Pression (bar)	Rejet (%)	Appréciation
SWC4-LD	152	2,72	51,8	99,57	Qualité satisfaisante, énergie Moyenne
SWC4 MAX	156	2,68	50,5	99,55	Équivalent à LD
SWC5-LD	139	2,58	49,3	99,60	Excellente qualité
SWC5 MAX	144	2,52	48,1	99,59	Meilleur équilibre
SWC6 MAX	162	2,42	46,2	99,54	Haute efficacité énergétique

Tableau 9. Synthèse comparative des cinq membranes (avec ERD)

Critères de choix et recommandation finale

La membrane SWC5 MAX associée au récupérateur d'énergie (ERD) offre le meilleur compromis global. Avec un TDS de 144 mg/L, elle respecte largement la norme OMS. Sa SEC de 2,52 kWh/m³ est compétitive, et sa pression de 48,1 bars reste modérée. SWC5-LD offre une meilleure qualité (139 mg/L) mais une SEC plus élevée (2,58 kWh/m³) et une pression plus haute (49,3 bars). SWC6 MAX offre la meilleure énergie (2,42 kWh/m³) mais un perméat plus salé (162 mg/L). Ainsi, pour un projet de dessalement d'eau de mer standard, SWC5 MAX + ERD constitue le choix le plus équilibré.

Critère	Membrane recommandée	Justification
Meilleure qualité d'eau	SWC5-LD	TDS le plus bas (139 mg/L), rejet le plus élevé (99,60 %)
Meilleure performance énergétique	SWC6 MAX + ERD	SEC la plus basse (2,42 kWh/m ³)
Meilleur compromis global	SWC5 MAX + ERD	Équilibre optimal : qualité (144 mg/L), énergie (2,52 kWh/m ³), pression (48,1 bar)

❖ Recommandations opérationnelles

✓ Prétraitement et entartrage

L'indice LSI du concentrat étant supérieur à 1,4, l'ajout d'un inhibiteur de tartre (2 à 5 mg/L) est obligatoire. Un contrôle régulier du pH (6,5-7,5) et de l'alcalinité est recommandé.

✓ Gestion des concentrats

Le concentrat a un TDS de 61 000-63 000 mg/L. Les options de gestion incluent : dilution avec l'eau de mer, rejet profond, valorisation des sels ou zéro rejet liquide (ZLD) [8,20].

✓ Surveillance et maintenance

Surveiller le flux de perméat et la pression différentielle. Un nettoyage CIP est nécessaire si le flux baisse de 10-15 % ou si la pression différentielle augmente de 15 %. Les membranes LD nécessitent moins de nettoyages.

✓ Remplacement des membranes

Prévoir un remplacement après 5 à 7 ans. Les membranes LD, plus résistantes au colmatage, offrent une durée de vie potentiellement plus longue.

Conclusion

L'analyse des résultats montre que toutes les membranes de la série SWC produisent une eau conforme aux normes de potabilité. La membrane SWC5-LD offre la meilleure qualité d'eau (TDS 139 mg/L), tandis que SWC6 MAX associée à un ERD offre la meilleure performance énergétique (SEC 2,42 kWh/m³). Pour un projet de dessalement d'eau de mer, la configuration SWC5 MAX + ERD représente le meilleur compromis entre qualité d'eau, consommation énergétique et productivité.

Les risques d'entartrage ($LSI > 1,4$) nécessitent l'ajout d'un inhibiteur de tartre. La gestion des concentrats doit être soigneusement étudiée. Les résultats obtenus confirment la fiabilité du logiciel IMS Design pour le dimensionnement des installations d'osmose inverse.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Cette étude a permis de dimensionner un système de dessalement d'eau de mer par osmose inverse à l'aide du logiciel IMS Design, en comparant plusieurs membranes commerciales dans des configurations avec et sans récupérateur d'énergie. Les résultats montrent que l'ensemble des membranes étudiées permet de produire une eau conforme aux normes de potabilité, avec une excellente efficacité de rejet des sels.

L'intégration d'un récupérateur d'énergie améliore significativement les performances énergétiques du procédé sans compromettre la qualité de l'eau produite. Parmi les membranes évaluées, la membrane SWC5 MAX apparaît comme le meilleur compromis entre qualité du perméat, efficacité énergétique et productivité. La membrane SWC5-LD reste toutefois la solution la plus adaptée lorsque la priorité est d'obtenir une qualité d'eau optimale.

L'étude met également en évidence la nécessité de prévenir les phénomènes d'entartrage par un prétraitement approprié et souligne l'importance d'une gestion responsable du concentrat afin de limiter les impacts environnementaux. Par ailleurs, un suivi régulier des paramètres de fonctionnement et une maintenance préventive sont indispensables pour garantir la fiabilité et la pérennité de l'installation.

En conclusion, ce travail confirme la pertinence du logiciel IMS Design comme outil d'aide à la conception et au dimensionnement des systèmes d'osmose inverse. La méthodologie adoptée constitue une approche fiable pour le développement d'installations de dessalement performantes, économes en énergie et respectueuses des contraintes techniques et environnementales.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIES

- [1] Fritzmann, C. et al. (2007). Desalination, 216(1-3), 1-76.
- [2] APTEL, P. (2006). Techniques de l'ingénieur, W4120.
- [3] USGS (2020). The Water Cycle.
- [4] Millero, F. J. (2013). Chemical Oceanography (4th ed.). CRC Press.
- [5] UNESCO (1981). The Practical Salinity Scale 1978.
- [6] Baker, R. W. (2012). Membrane Technology and Applications (3rd ed.). Wiley.
- [7] Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. Springer.
- [8] Hydranautics / Nitto (2020). IMS Design Software User Manual.
- [9] Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering (7th ed.). McGraw-Hill.
- [10] CAUSSERAND, C. (2006). Techniques de l'ingénieur, W4100.
- [11] REMIGY, J.C. & DESCLAUX, S. (2007). Techniques de l'ingénieur, W4090.
- [12] Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). Aquatic Chemistry (3rd ed.). Wiley.
- [13] Hydranautics (2020). IMS Design Help Documentation.
- [14] Greenlee, L. F. et al. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. Water Research, 43(9), 2317-2348.
- [15] Wilf, M. (2007). The Guidebook to Membrane Desalination Technology. Balaban Desalination Publications.
- [16] Voutchkov, N. (2011). Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination. Elsevier.
- [17] Hydranautics (2021). SWC Series Membranes Product Specifications.
- [18] Kim, S. J. et al. (2019). Energy recovery devices in seawater reverse osmosis desalination. Desalination, 464, 1-19.
- [19] Wang, L. K. et al. (2011). Membrane and Desalination Technologies. Humana Press.
- [20] Hydranautics (2020). IMS Design Simulation Methodology Guide.
- [21] Al-Karaghoul, A. & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 343-356.

- [22] Lattemann, S. & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1-15

Résumé :

Ce travail aborde le problème de la raréfaction des ressources en eau douce, auquel le dessalement par osmose inverse apporte une réponse efficace mais dont la conception reste complexe. L'objectif est de dimensionner une unité et d'identifier la membrane offrant le meilleur compromis entre qualité d'eau, efficacité énergétique et fiabilité. À l'aide du logiciel IMS Design, cinq membranes SWC sont comparées avec et sans récupérateur d'énergie. Toutes produisent une eau conforme aux normes OMS. L'intégration d'un ERD réduit significativement la consommation énergétique. La membrane SWC5 MAX avec ERD offre le meilleur compromis global. L'indice LSI élevé du concentrat impose l'ajout d'un inhibiteur d'entartrage. Ce travail valide IMS Design comme un outil fiable pour le dimensionnement des installations d'osmose inverse.

Mots clés : Dessalement, Osmose inverse, IMS Design, Membranes SWC, ERD, SEC, LSI

Abstract

This work addresses the problem of scarcity of freshwater resources, to which desalination by reverse osmosis provides an effective response but whose design remains complex. The objective is to size a unit and identify the membrane offering the best compromise between water quality, energy efficiency and reliability. Using the IMS Design software, five SWC membranes are compared with and without energy recovery. All of them produce water that complies with OMS standards. The integration of an ERD significantly reduces energy consumption. The SWC5 MAX membrane with ERD offers the best overall compromise. The high LSI index of the concentrate requires the addition of a scale inhibitor. This work validates IMS Design as a reliable tool for the sizing of reverse osmosis installations.

Key words: Desalination, Reverse osmosis, IMS Design, SWC Membranes, ERD, SEC, LSI

الملخص :

يتناول هذا العمل مشكلة ندرة موارد المياه العذبة، والتي يُعد تحلية مياه البحر باستخدام تقنية التناضح العكسي أحد الحلول الفعالة لمواجهتها، إلا أن تصميم هذه الأنظمة يظل عملية معقدة. يهدف هذا البحث إلى تصميم وحدة تحلية وتحديد الغشاء الذي يحقق أفضل توازن بين جودة المياه، والكفاءة الطاقوية، والموثوقية التشغيلية. وباستخدام برنامج IMS Design، تمت مقارنة خمسة أغشية من سلسلة SWC في حالتها التشغيلية مع وبدون جهاز استرجاع الطاقة. أظهرت النتائج أن جميع الأغشية تنتج مياهًا مطابقة لمعايير منظمة الصحة العالمية لمياه الشرب. كما أدى دمج جهاز استرجاع الطاقة إلى خفض استهلاك الطاقة بشكل ملحوظ. وقد تبين أن الغشاء SWC5 MAX المزود بجهاز استرجاع الطاقة يحقق أفضل توازن من حيث الأداء العام. كما أظهرت الدراسة أن ارتفاع مؤشر لانجيليه (LSI) للمحلول المركز يستوجب إضافة مادة مانعة للترسبات الكلسية للحد من ظاهرة التكلس. وتؤكد هذه الدراسة أن برنامج IMS Design يُعد أداة موثوقة وفعالة لتصميم وتحديد أبعاد محطات التحلية بتقنية التناضح العكسي.

الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، التناضح العكسي، IMS Design، أغشية SWC، ERD، SEC، LSI
