

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



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :Génie des procédés des
Matériaux .
Domaine : Science et Technologie .
Filière : Génie des procédés .
Spécialité : Génie des Matériaux .
Thème

***Modélisation et Simulation des systèmes de
dessalement de l'eau de mer par osmose inverse .***

Présenté Par :

- 1) Melle HACHEMI Faiza Nawel .
- 2) Melle BENEDDINE Hanane .

Devant le jury composé de :

Pr. Nehari Driss

Dr. Mansour Meriem

Dr. Remlaoui Ahmed

Pr UAT.B.B (Ain Temouchent) Président .

MCB UAT.B.B (Ain Temouchent) Examineur .

MCB UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant .

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Je voudrais dans un premier temps remercier Dieu pour m'avoir accordé le courage et la volonté pour terminer ce travail , et je remercie mon Encadreur

Dr **Ahmed REMLAOUI** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'adresse mes sincères remerciements à Mon oncle Pr .HACHEMI Pour ces efforts et tous les professeurs... Madame MANSOUR , Monsieur NEHARI pour leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Enfin , A toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire et mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi et ma famille pour leurs encouragements j'exprime mes profonds remerciement .

Melle *Hachemi Faiza Nawel*



Dédicace

Nous dédions ce travail

*Aux personnes les plus chers à nos Coeur , nos parent qui nous
a beaucoup soutenu Durant notre Coursus d'étude et à qui on
sera Eternellement reconnaissant .*

A nos frères et nos soeurs ,

A toute la famille .

A nos amies et nos collègues .

Melles HACHEMI & BENEDDINE



Résumé

L'osmose inverse est une technologie efficace et éprouvée pour réduire les contaminants de l'eau. Dans une unité de dessalement on a Un prétraitement comme une première étape du traitement et une surveillance appropriés d'un système d'osmose inverse sont essentiels pour éviter des réparations coûteuses et une maintenance imprévue

Un post-traitement supplémentaire après le système d'osmose inverse, tel qu'une désionisation en lit mixte, peut augmenter la qualité du perméat d'osmose inverse et le rendre adapté aux applications les plus exigeantes.

Avec une conception de système appropriée, un programme de maintenance et un service d'assistance expérimenté, votre système d'osmose inverse devrait fournir de nombreuses années d'eau de haute pureté.

On peut réaliser une Etude des effets de la membrane sur la productivité Et Les effets de la haute salinité sur le fonctionnement des membranes .

Mots-clés: post-traitement, désionisation , perméat , conception, osmose inverse , prétraitement. , membranes , salinité

المستخلص:

التناضح العكسي هو تقنية فعالة ومثبتة للحد من ملوثات المياه. يوجد في وحدة تحلية المياه معالجة مسبقة مناسبة حيث أن المرحلة الأولى من المعالجة ومراقبة نظام التناضح العكسي أمر ضروري لتجنب الإصلاحات المكلفة والصيانة غير المجدولة يمكن للمعالجة اللاحقة الإضافية بعد نظام التناضح العكسي ، مثل إزالة الأيونات المختلطة من الطبقة ، أن تزيد من جودة تناضح التناضح العكسي وتجعله مناسباً للتطبيقات الأكثر تطلباً. من خلال تصميم النظام المناسب وبرنامج الصيانة وخدمة الدعم ذات الخبرة ، يجب أن يوفر نظام التناضح العكسي لديك سنوات عديدة من المياه عالية النقاء. مكن إجراء دراسة لتأثيرات الغشاء على الإنتاجية وتأثيرات الملوحة العالية على عمل الأغشية. الكلمات المفتاحية: المعالجة المسبقة ، للمعالجة اللاحقة الإضافية ، التناضح العكسي ، الأيونات المختلطة ، الملوحة ، غشاء .

Abstract

Reverse osmosis is an effective and proven technology for reducing water contaminants. In a desalination unit there is Proper pretreatment as a first step in treatment and monitoring of a reverse osmosis system is essential to avoid costly repairs and unscheduled maintenance

Additional post-treatment after the reverse osmosis system, such as mixed bed deionization, can increase the quality of the reverse osmosis permeate and make it suitable for the most demanding applications.

With proper system design, a maintenance program and an experienced support service, your reverse osmosis system should provide many years of high purity water.

A study of the effects of the membrane on the productivity and the effects of high salinity on the functioning of the membranes can be carried out.

Keywords: Pretreatment , post-treatment, reverse osmosis , permeate , deionization , membrane , salinity .

Sommaire

Sommaire

Remerciement.

Dédicaces.

Résumé.

Table des matières.

Nomenclatures.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur les techniques de dessalements de l'eau.

I.1. Définition de l'eau.....	6
I.2. Cycle de l'eau.....	6
I.3. L'importance de l'eau.....	7
I.4. Problématique de l'accès à l'eau potable.....	9
I.5. L'objectif du chapitre.....	10
I.6.2. Les Propriétés chimiques et physiques de l'eau.....	11
I.6.2.1. Propriétés chimiques.....	11
I.6.2.2. Propriétés physiques.....	13
I.7. Le rôle des écosystèmes.....	15
I.8. Sources d'eau douce	17
I.8.1. Eaux de surface.....	17
I.8.1.1. Classification des eaux de surface	17
I.8.2. eaux souterraines.....	18
I.8.2.1. Les eaux souterraines, les nappes et les aquifères	18
I.8.3. Eau de pluie.....	19
I.9. Besoins en eau douce.....	19
I.9.1. La consommation domestique.....	21

Sommaire

I.9.2.. La gestion de l'eau en Algérie	21
I.9.2.Les besoins en eau de l'agriculture	22
I.9.3.Usages de l'eau pour l'industrie	24
I.10. Problématique de l'eau salé	25
I.11. La nécessité du dessalement	26
I. 12. Définition du dessalement de l'eau de mer.....	26
I.12.1. Classement des usines de dessalement en Algérie par capacité de production	26
I.13. Techniques de dessalement.....	27
I.13.1Les procédés membranaires	27
I.13.1.1.L'osmose inverse	27
I.13.2..La distillation membranaire	28
I.13.2.1. Vaporisation.....	29
I.14.La comparaison des techniques	30
I.15.Applications de dessalement et son Cout	30
I.16. Les limitations d'utilisation de dessalement.....	31
I.16.1.Impact sur l'environnement.....	31
I.17. Conclusion.....	33

Chapitre II : système d'osmose inverse .

II. Introduction :.....	35
II.1. Présentation du procédé d'osmose inverse :	36
II.2.Contexte d'utilisation :	36
II.3.Objectif du chapitre :	37
II.4. Les principes de d'osmose inverse :	37
II .4.1. Définition de l'osmose :	37
II. 4.2. Définition de l'osmose inverse :.....	37

Sommaire

II.5. Les pressions :..... ;.....	38
II.5. 1. Pression osmotique :.....	38
II.5.2. Pression d'alimentation :.....	39
II.6. Explication du procédés ;;;;;;;:	39
II.7.Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse :.....	40
II.7.1. Prise d'eau de mer :.....	41
II.7.2. le pompage, le stockage et le tamisage :.....	42
II.8. Les composants d'un système d'osmose inverse :.....	43
II.8.1. Le prétraitement :.....	43
II.8.2. Prétraitement conventionnel :.....	44
II.8.3. Prétraitement par les procédés membranaires :.....	46
II.8.4. Le post-traitement :.....	47
II.8.4.1. Poste de nettoyage chimique :	48
II.9. Mode de fonctionnement des systèmes membranaires :.....	48
II.9.1. La filtration frontale :.....	48
II.9.2. La filtration tangentielle :.....	49
II.10. Paramètres de fonctionnement d'une osmose inverse:	50
II.11. Mécanisme de transfert:.....	52
II.12. Membranes d'osmose inverse	53
II.12.1 Présentation des membranes :.....	53
II.12.2.Types des membranes d'osmose inverse :.....	53
II.12.3. Durée de vie des membranes :.....	54
II.13. Modules d'osmose inverse	54
II.13.1.Définition des modules	54
II.13.2. Les types de modules	54
II.14 .Limitation de l'osmose inverse	56
II.14.1.Définition du colmatage :.....	56
II.14.2.Les types de colmatage :.....	57
II.15. Les avantages et les inconvénients d'osmose inverse	58
II.15.1. Les avantages	58

Sommaire

II.15. 2. Les inconvénients.....	58
II.16. Les applications de l’osmose inverse :.....	59
II.17.Conclusion	60
 Chapitre III : Modélisation et simulation des systèmes de dessalement de leau de mer	
III. Introduction	64
III.1. L’objectif DU CHAPITRE	64
III .2.La simulation des procédés.....	65
III.3.La modélisation	65
III.4.Logiciels de conception des Techniques de dessalement.....	65
III.4.1.Logiciel IMSDesign.....	65
III.4.2.ROSA.....	65
III.4.3.Wave	65
III.4.3.1. Ses caractéristiques	66
III.5. Conception du système d’osmose inverse.....	68
III .5.1 . Les étapes de la simulation	68
III.6. Conclusion	78

Chapitre IV : Interprétations des résultats

Introduction.....	80
L’objectif	80
IV. Les résultats.....	81
IV.2. Le système de configuration.....	81
IV.3. Le flux du système d’osmose inverse	81
IV.4. Un aperçu sur le système d’Osmose inverse.....	83

Sommaire

IV.5. Effet des paramètres de système.....	89
IV.5.1 Effet du Salinité sur La conductivité, charge et TDS	89
IV.5.2 Effet de changement de La membrane.....	91
IV.5.3 Effet du Performonce de la membrane Seamaxx-440i	94
IV.5.4 Effet de la premiere membrane sur la productivité.....	98
IV.6. Conclusion.....	99
IV.6.1.Résumé des résultats obtenus	99
Conclusion générale.....	101
Référence bibliographique.....	104

Liste des figures

Chapitre I :

Figure (I.1) : molécule de H ₂ O.....	6
Figure (I.2) : Cycle de l'eau	7
Figure (I.3) : La sécheresse corne de l'Afrique.....	10
Figure (I.4) : Représentation de lewis	11
Figure (I.5) : Barycentre des charges positives et négative.....	12
Figure (I.6) : Liaisons hydrogène entre deux molécules.....	12
Figure(I.7) : Liaison hydrogène entre plusieurs.....	13
Figure (I.8) : Source de l'eau	16
Figure (I.9) : cycle de l'eau souterraine.....	18
Figure (I.10) : Evolution de la consommation domestique d'eau potable.....	20
Figure (I.11) : la consommation domestique d'eau potable.....	20
Figure (I.12) : Les 17 bassins-versants en Algérie.....	21
Figure (I.13) : L'eau et l'activité agricole.....	22
Figure (I.14) : Evolution mondiale d'eau.....	23
Figure (I.15) : Usages de l'eau pour l'industrie.....	24
Figure (I.16) : principe de l'osmose inverse	27
Figure (I.17) : La distillation membranaire.....	27
Figure (I.18) : Schéma de principe d'une unité d'évaporation.....	28
Figure (I.19) : schéma des Techniques de dessalement utilisées.....	
Figure (I.20) : Station de dessalement.....	

Chapitre II

Figure (II.1) : Une installation d'un Système d'osmose inverse	35
Figure (II.2) : Principe de l'osmose inverse.....	36
Figure (II.3) : Phénomène de l'osmose.....	37

Liste des figures

Figure (II.4) : procédés de l'osmose inverse.....	38
Figure (II. 5): Pression osmotique.....	38
Figure (II.6) : Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse	40
Figure(II. 7) : Schéma général d'une unité d'osmose inverse.....	41
Figure(II. 8) : Tuyau de captage de l'eau de mer.....	42
Figure (II.9): Prétraitement conventionnel.....	44
Figure (II.10) : schéma du principe du système d'osmose inverse	47
Figure (II.11) : Présentation du fonctionnement de la filtration frontale	48
Figure (II.12) : Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle	48
Figure (II.13): Taille des matériaux qui sont enlevés par les procédés membranaires..	49
Figure (II.14) : Module à membrane tubulaire.....	53
Figure (II.15): schéma de module plan.....	54
Figure (II.16): Description d'un module spiralé d'osmose inverse.....	54

Chapitre III

Figure (III.1): Logiciel de simulation	64
Figure (III.2): Logo de Wave software.....	66
Figure (III.3): conception multiprocessus combinant UF , RO et échanges d'ions.....	67
Figure (III.4): design de logiciel wave.....	68
Figure (III.5) : La barre des unités.....	69
Figure (III.6): Dépôt de l'icône RO.....	70
Figure (III.7): le type de l'eau de mer	71
Figure (III.8): Les valeurs de la salinité	72
Figure (III.9): l'entrée de feedwater.....	73
Figure (III.10): Tableau des éléments de la membrane choisi	74
Figure (III.11): Tableau des éléments	75
Figure (III.12): entrée Osmose inverse.....	76
Figure (III.13): summary report affichage des résultats	77

Chapitre IV

Figure (IV.1): Le système Générale d'un seul passage et deux étages81

Figure (IV.2): Diagramme de flux.....82

Figure (IV.3): Récupération d'énergie.....86

Figure (IV.4):Le type de l'eau de mer.....90

Figure (IV.5): Les valeurs des sels , conductivité et la charge90

Figure (IV.6):Tableau des éléments.....91

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau(I.1) : Les Caractéristiques et les Conséquence environnementale des propriétés physiques de l'eau.....	14
Tableau (I.2) : Réserve d'eau dans la nature.....	17

Chapitre IV

Tableau (IV.1): Description du système.....	83
Tableau (IV.2): Tableau des paramètres.....	84
Tableau(IV.3): performance de la membrane.....	85
Tableau(IV.4): Tableaux des flux et de pressions.....	87
Tableau (IV.5): :Concentrations des sels	89
Tableau (IV.6): Tableau de Description	92
Tableau (IV.7): Les paramètres généraux	93
Tableau (IV.8): comparasion entre les deux memembranes.....	94
Tableau (IV.9): Performance de la membrane	94
Tableau (IV.10): les concentrations des sels	96
Tableau (IV.11): Tableaux des flux	97
Tableau (IV.12): Concentration du Concentrat et de flux	98
Tableau (IV.13): Description du système.....	99
Tableau (IV.14): Comparaison entre les deux parties	99

Nomenclatures

A : La perméabilité de la membrane au solvant.

B : La perméabilité de la membrane au soluté.

C : Concentration.

C₀ : la concentration en soluté de l'alimentation.

C_A : la concentration en soluté de l'alimentation.

C_m : La concentration d'une espèce au voisinage de la membrane.

C_p : Concentration de perméat.

C_R : Concentration de rétentat.

ED : Electro-dialyse

Ext-Int : Récupération à intérieur.

FC : Facteur de conversion.

HTE : Horizontal tube evaporator.

i : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte.

Int-Ext : Récupération à l'extérieur.

J_{soluté} : Le flux massique de soluté.

J_{solvant} : Le flux massique de solvant.

K_s : La constante d'équilibre (Produit de solubilité)

KT : Facteur de correction.

MED : Effets multiples.

MF : Microfiltration.

MFI : Modified Fouling Index.

MFI-UF: Modified Fouling Index by using Ultrafiltration membrane.

MSF :Multi-Flash.

NF :Nanofiltration.

OI : Osmose Inverse.

P : Pression

pH : Potentiel d'Hydrogène.

PS : Passage de sels.

PX : Echangeur de pression.

Q0 : Débit d'alimentation.

QA : Débit d'alimentation.

Qc : Débit de concentrât.

Qp : Débit de perméat.

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

R : Sélectivité. **Rm**: Rétention globale du module.

RS : Rejet de sels.

S : Surface.

SDI : Silt Density Index.

t : Temps.

T : Température.

TDS : Total de Sel Dissous.

UF : Ultrafiltration.

V : Volume.

VC : Compression de Vapeur.

VTE : Vertical tube evaporator.

γ : Facteur de polarisation.

Y : Taux de conversion.

μ : Viscosité.

ΔP : La différence de pression de part et d'autre de la membrane.

$\Delta \Pi$: la différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

Π : Pression osmotique.

ρ : La masse volumique.

Introduction générale

L'eau est l'un des éléments que l'on trouve en plus grande abondance sur la planète Terre. Qu'elle soit sous forme liquide, solide ou vaporeuse, qu'il s'agisse d'eau salée ou d'eau douce, l'eau se trouve partout sur notre planète, en plus ou moins grande abondance.

Historiquement , on ne peut dénier aux Romains d'avoir été très «performants » en ce qui concerne les travaux hydrauliques. Aucune autre civilisation n'a porté à un tel niveau la recherche, la conduite et la distribution des eaux dans les villes, en partie pour affirmer sa domination comme le soulignent certains auteurs.(1)

Face à une répartition inégale de l'eau potable sur la planète, une demande de plus en plus forte pour le dessalement de l'eau de mer a été recensée ces dernières années.(2)

Le développement démographique, la haute concentration de la population mondiale dans une même zone où l'activité humaine s'accroît, et les progrès techniques qui ont menés à une réduction des coûts d'investissement, sont autant de facteurs qui ont contribué à cette hausse de la demande .(2)

A l'ouest de l'Algérie , les incertitudes de la météo se combinent a la pression démographique et aux perturbations prévisibles liées au réchauffement climatique pour peser sur la disponibilité de l'eau .

Devant cette situation de fait , la volonté des hommes s'est appuyée sur les ressources de la science pour faire Appel à la technologie du dessalement de l'eau de mer . au début de ce siècle comme un choix par défaut, juste comme une solution de sauvetage onéreuse et polluante le dessalement se profile comme une alternative crédible .


Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué : Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation. **Les procédés utilisant des membranes: l'osmose inverse et l'électrodialyse.**

Le dessalement de l'eau de mer se confirme comme solution pérenne et sûre tout au long des années à venir .

L'objectif de ce travail consiste à faire une simulation des systèmes de dessalement par osmose inverse à l'aide d'un logiciel de conception multi-technologie WAVE (Water Application Value Engineering) .

- Il se compose de quatre Chapitres :
 - **Chapitre I** : Une étude bibliographique sur Les propriétés de l'eau , les techniques de dessalement et son impact sur l'environnement
 - **Chapitre II** : il est consacré à la présentation de la connaissance générale sur la technique de dessalement par Osmose inverse .

- **Chapitre III** : Une présentation du logiciel Wave , ses caractéristiques et les étapes de la simulation .
- **Chapitre IV** : Il se compose de 3 parties .
 - Résultats et interprétations .
 - Etude des effets de la membrane sur la productivité.
 - Les effets de la haute salinité sur le fonctionnement des membranes .



Water is the driving force of all nature.

Leonardo da Vinci

Buboquote.com

gnpodnote.com

Chapitre 1 :

Généralités sur les techniques de dessalements de l'eau.

I.1. Définition de l'eau:

L'eau est un élément sous forme liquide en conditions standards (température et pression ambiante), composé sous sa forme pure de molécules qui associent deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène sous la forme H₂O[3].

L'eau est essentielle aux organismes vivants à la fois pour ses caractéristiques mécaniques et ses propriétés chimiques. Ces êtres vivants peuvent par conséquent être composés jusqu'à 97% d'eau [3].

D'un point de vue chimique, l'eau dissout la majorité des corps solides et facilite ainsi les réactions chimiques, donc le métabolisme. L'eau est en effet un solvant essentiel, parfois qualifié de « solvant universel ».



Figure (I.1): molécule de H₂O[4].

I.2. Cycle de l'eau :

Le cycle de l'eau ou cycle hydrologique est un modèle représentant les flux entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou gazeuse, sur Terre : les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes souterraines, les glaciers. Le « moteur » de ce cycle est l'énergie solaire qui, en favorisant l'évaporation de l'eau, entraîne tous les autres échanges[5].

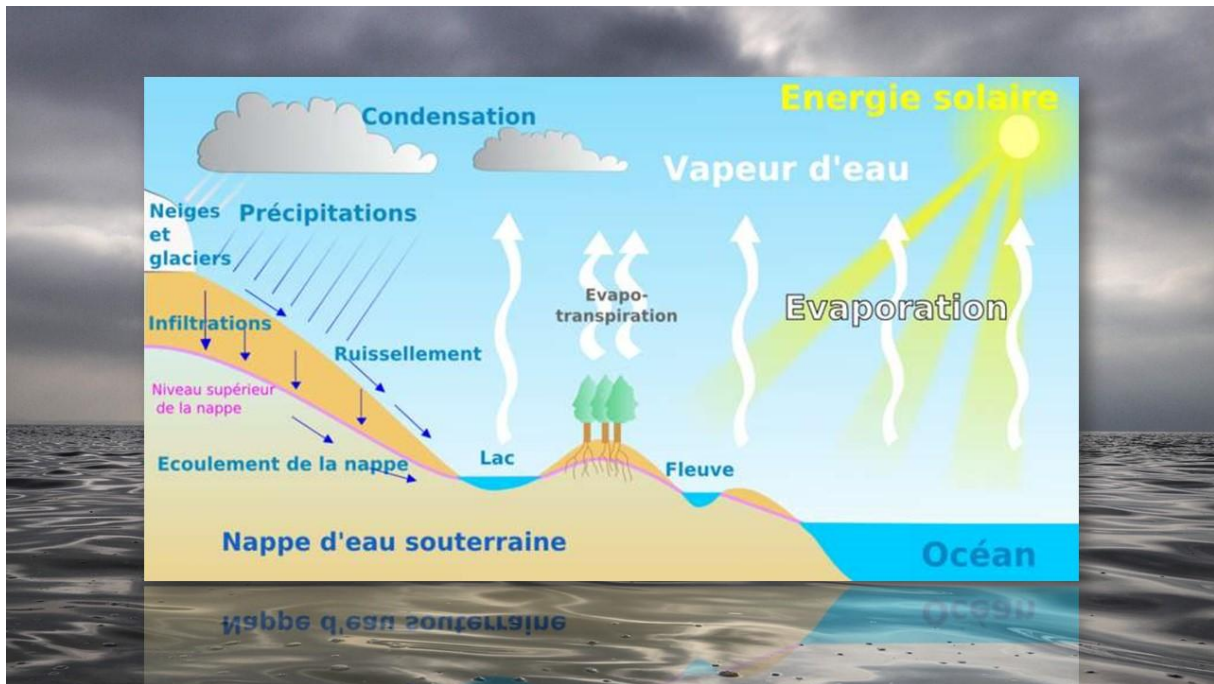


Figure (I.2):Cycle de l'eau .[6].

I.2. 1 Le Cycle de l'eau comprend 7 étapes :

- L'évaporisation.
- La Condensation .
- La transpiration .
- Les précipitations.
- Le ruissellement .
- L'infiltration .

I.3. L'importance de l'eau :

➤ Sur la planète :

Notre planète se caractérise également par la présence de glace et de vapeur d'eau à l'air libre : l'eau est donc présente sous ses trois états en surface[7].

L'eau remplit de multiples fonctions sur terre :

- ✓ Liquide, elle contribue à la formation du relief. Elle modifie le relief de différentes manières [8].

1. L'eau provoque la dissolution des matériaux

2. L'eau provoque l'érosion des fleuves parce qu'elle arrache des matériaux et forme des canyons et des vallées très étroites .
 3. L'érosion marine : l'eau de mer forme des falaises et des plages .
- ✓ Gazeuse, elle forme écran dans l'atmosphère qui enveloppe la planète et protège la biosphère du rayonnement ultraviolet solaire.
 - ✓ Figée en glace aux pôles ou aux sommets des hautes montagnes

➤ **Aux êtres vivants :**

- ✓ L'eau est le principal constituant du corps humain. La quantité d'eau dans le corps varie tout au long de la vie. Elle décroît avec l'âge en raison de la perte de masse musculaire. Ainsi, le poids corporel en eau d'un nouveau-né est de 74% .

La quantité moyenne d'eau contenue dans un organisme adulte est de 65%, ce qui correspond à environ 45 litres d'eau pour un sportif de 70 kg.

- ✓ L'eau est utile pour transporter les minéraux aux racines et pour l'élaboration de la matière sèche (bois, feuilles et fruits) lors de la photosynthèse[9].

I.4.Problématique de l'accès a l'eau potable:

➤ **Dans le monde :**

Le monde est confronté à de graves pénuries d'eau, et la sécheresse qui sévit actuellement en Afrique n'en est malheureusement que le dernier exemple [10]. Un milliard de personnes n'ont pas suffisamment accès à l'eau potable, cinq millions (principalement des enfants) meurent chaque année des suites d'une pathologie liée a la consommation d'une eau insalubre , choléra , typhoïde , malaria etc.. et ces chiffres devraient augmenter [11].

Notre siècle assiste a une croissance rapide de la demande en eau, car on l'utilise de plus en plus dans l'agriculture irrigue et dans l'industrie, tannais que la consommation domestique par habitant augmente sans cesse. Si les tendances actuelles se prolongeaient, on estime qu'en 2025, les deux tiers de la population mondiale pourraient souffrir des contraintes hydriques[12].

➤ **En Algérie :**

L'Algérie souffre, ces derniers temps, d'un cas de réchauffement climatique alarmant. Les risques de pénuries d'eau potable se font , dans ce cas plus important qu'auparavant .

En réalité le réchauffement climatique est déjà entrain de toucher l'Afrique du nord compte tenu du manque de pluie de plus en plus grandissant actuellement [12].

le réchauffement en Algérie a atteint les 0,4 °C par décennie



Figure (I.3): La sécheresse corne de l'Afrique.[13]

I.5.L'objectif :

1. étudier les propriétés de l'eau dont on peut donner la structure moléculaire et les caractéristiques chimiques et physiques.
2. Démontrer le lien entre l'eau salé et la nécessité du dessalement.
3. Identifier les techniques de dessalement et ses applications.
4. Etudier les limitations de l'utilisation des techniques de dessalement et son impact environnemental.

I.6. Les propriétés de l'eau :

I.6.1. structure moléculaire :

Modèle moléculaire :

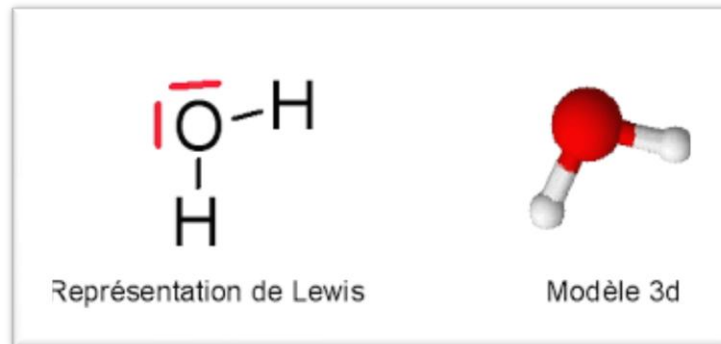


Figure (I.4): Représentation de lewis.[14].

I.6.2 Les Propriétés chimiques et physiques de l'eau :

II.6.2.1. Propriétés chimiques :

➤ La polarité des molécules d'eau :

La molécule d'eau H_2O est une molécule polaire car :

Elle comporte des liaisons covalentes polaires O - H. De ce fait, l'atome Oxygène O est porteur de 2 charges partielles négatives -2δ et les deux atomes Hydrogène H, porteurs d'une charge partielle $+\delta$.

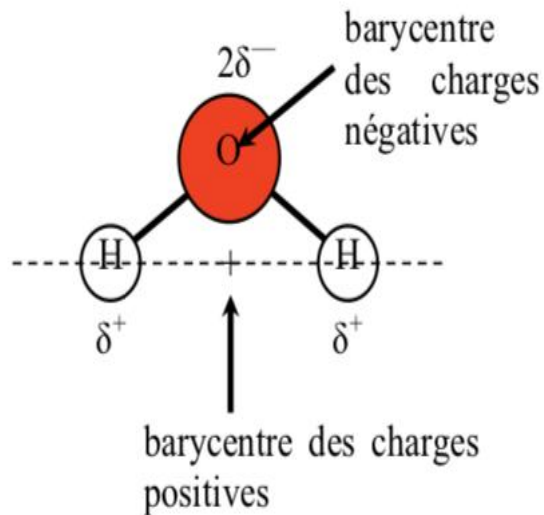


Figure (I.5): Barycentre des charges positives et négatives [14].

- Le centre géométrique (barycentre) des charges partielles positives (+) n'est pas confondu avec celui des charges partielles négatives (-) (figure 3). Ces deux critères confirment la polarité de la molécule d'eau.

➤ **La liaison hydrogène :**

La liaison hydrogène est une liaison intermoléculaire. Elle s'établit entre deux molécules qui portent des charges partielles de signes opposés. Elle est représentée en pointillé sur le schéma. De ce fait, on montre qu'il existe des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau [15].

La liaison hydrogène résulte donc de l'attraction qui s'exerce entre la charge partielle positive δ^+ d'un atome d'hydrogène H d'une molécule d'eau et la charge partielle négative d'un atome d'oxygène O d'une autre molécule d'eau [16].

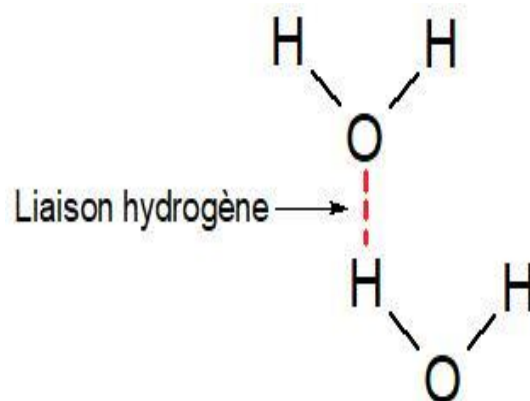


Figure (I.6): Liaison hydrogène entre 2 molécules d'eau. [17].

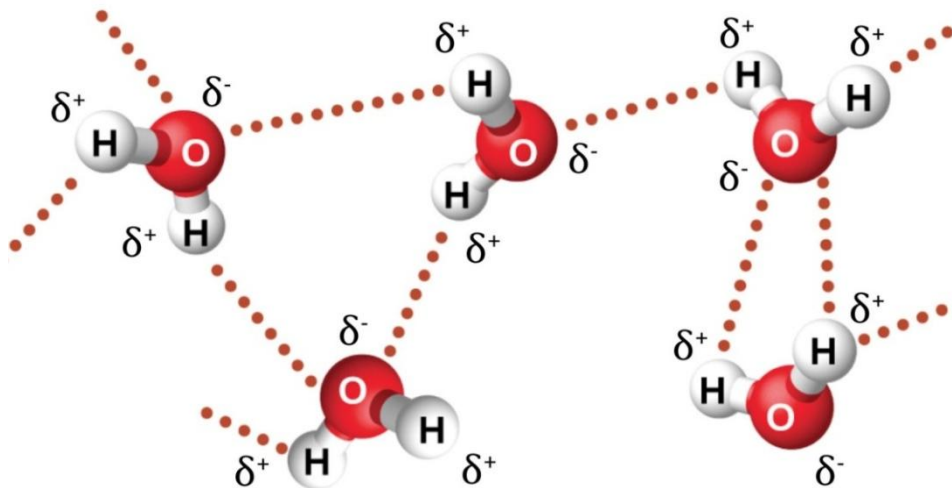


Figure (I.7): Liaisons hydrogène entre plusieurs molécules .[18].

➤ **l'eau est un solvant universel :**

- Solubilité des molécules dans l'eau :

La solubilité désigne la capacité d'une molécule à se dissoudre dans un solvant. Une molécule se dissout d'autant mieux dans le solvant eau qu'elle est très polaire et forme de nombreuses liaisons hydrogène.

I.6.2.2. Propriétés physiques :

:

- **Le point d'ébullition:** Le point d'ébullition est une propriété caractéristique physique.. À ce point, tout apport d'énergie sous forme de transfert thermique est absorbé par la chaleur latente de vaporisation, et aura pour effet de faire passer une partie du liquide en vapeur l'eau bout à 100°C [19].
- **La masse volumique :** de l'eau liquide est ainsi $\rho = 1000 \text{ g/L}$.
Cela signifie que 1 L d'eau liquide pèse 1000 g, soit 1 kg.
- **Viscosité :** La viscosité de l'eau est très variable en fonction de sa composition chimique et de sa température de telle sorte que deux eaux peuvent être non miscibles. Ce phénomène est particulièrement important pour la continuité des grands courants océaniques qui règlent le climat planétaire.[20].
- **Tension superficielle :** La tension superficielle de l'eau très élevée. Cette propriété permet la formation de gouttes et favorise l'ascension capillaire.

- **Chaleur spécifique :** L'eau est l'élément naturel dont la chaleur spécifique est la plus élevée : $4185 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Elle demande donc beaucoup d'énergie pour être réchauffée et pour être refroidie.
- **Capacité thermique :** L'eau présente une très grande capacité thermique de tous les fluides. Du fait de cette capacité, les masses d'eau agissent comme des tampons ou régulateur contre les changements élevés de température.
- **Transparence :** L'eau est transparente dans le spectre visible. Mais elle absorbe le rayonnement infrarouge dès les premiers mètres d'épaisseur, ce qui explique que seules les eaux superficielles se réchauffent.[20].

Propriété de l'eau	Caractéristique	Conséquence environnementale
Points de fusion et d'ébullition	Très élevés	importante phase liquide sur la planète
Chaleur spécifique	Très élevée	régulation des variations de température externes
Chaleur latente de fusion	Très élevée	régulation des variations de température externes
Chaleur latente de vaporisation	Très élevée	régulation des variations de température externes
Capacité de dissolution	Excellent solvant	transport d'éléments dissous
Tension superficielle	Importante	formation de gouttes, transports d'éléments dans les tissus cellulaires
Densité	max à 4° C	stratification thermique des masses d'eau, flottaison de la glace
Absorption de la lumière	Elevée dans les IR et UV	régulation de la température de l'atmosphère et stratification thermique des masses d'eau

Tableau (I.1): Les Caractéristiques et les Conséquence environnementale des propriétés physiques de l'eau. [20]

I.7. Le Rôle dans les écosystèmes :

Un écosystème est l'ensemble formé par une association ou communauté d'être vivants et son environnement biologique, géologique, climatique... un écosystème peut être aquatique ou terrestre. Leur rôle est essentiel dans la société et leurs multiples utilisations montrent que les écosystèmes d'eau douce sont d'une importance exceptionnelle [21].

1. Les écosystèmes d'eau douce comme les lacs, les rivières et les zones humides sont essentiels à la survie, à la santé et aux moyens de subsistance, ils assurent la fourniture de notre eau potable, industrielle et énergétique .
2. Les exemples de services éco-systémiques comprennent entre :
 - Les réserves en eau pour les usages domestiques et industriels.
 - La filtration des particules et des polluants contenus dans les eaux de pluie.
 - Les zones humides, les marécages et les plans d'eau qui limitent les dégâts occasionnés par les tempêtes et les inondations.
3. Les services éco systémiques sont donc les bénéfiques que les hommes tirent des écosystèmes sans avoir à agir pour les obtenir.

Ils peuvent être :

- **Les services de régulation :** la surexploitation des ressources présentes affecte bien souvent fortement le climat, l'eau, les mécanismes de régulation des risques naturels et des maladies et les processus de purification de l'eau et de traitement des déchets.
- **Les services d'approvisionnement :** eau potable, énergie dont les biocarburants et pêches de capture. [21].

I.8.Sources de l'eau :

Une source, en hydrologie, est l'endroit où une eau liquide sort naturellement du sol. Une source est très souvent à l'origine d'un cours d'eau, d'un ruisseau, d'une rivière ou même d'un fleuve. Mais une source peut également être submergée dans un écoulement d'eau, une mare, un lac ou une mer.[22].

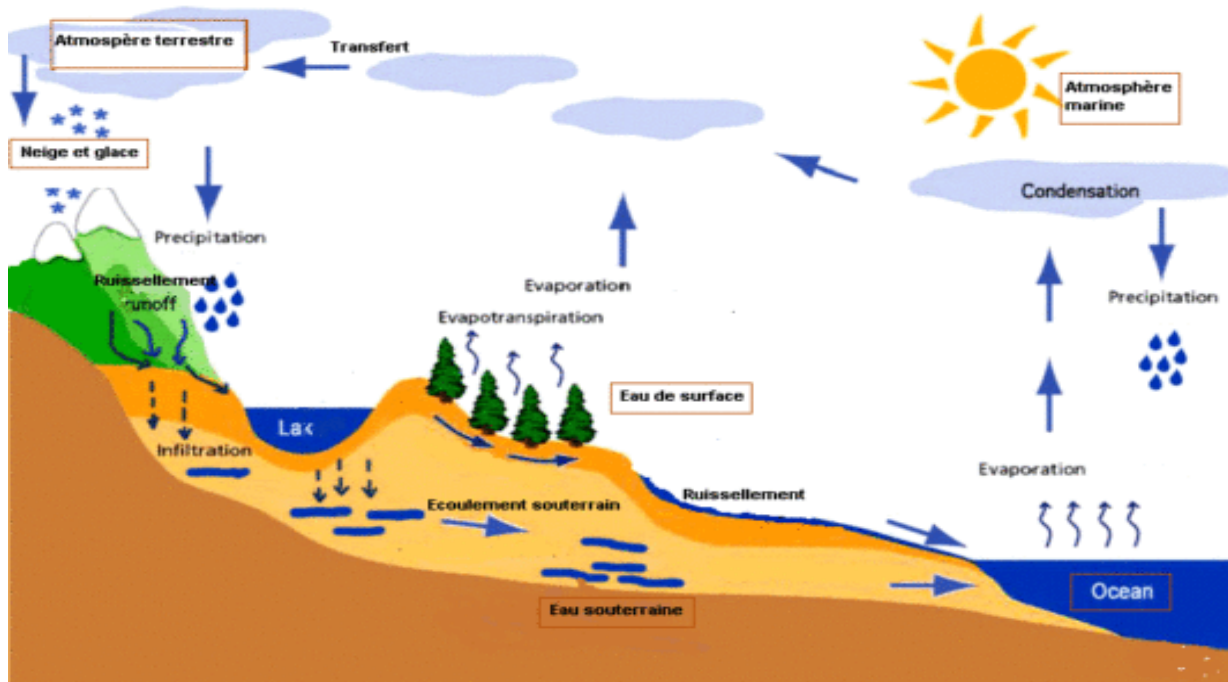


Figure (I.8):La source d'eau [23].

Réservoir	Stock en km ³
Océans	1 350 000 000
Eaux continentales	35 976 700
Glaciers	27 500 000
Eaux souterraines	8 200 000
Mers intérieures	105 000
Lacs d'eau douce	100 000
Humidité des sols	70 000
Rivières	1 700
Atmosphère	13 000
Biosphère	1 100

Tableau (I.2): réserve d'eau dans la nature.[24]

I.8.1. Eaux de surface :

Les eaux de surface, aussi appelées parfois eaux superficielles, sont celles qui se trouvent sur la terre et qui sont au contact de l'atmosphère [25].

Les eaux de surface sont tirées des lacs, rivières, chutes d'eau et de la mer. Ces eaux superficielles jouent le plus grand rôle dans la formation de l'hydrosphère sur Terre [25].

I.8.1.1. Classification des eaux de surface:

Afin d'optimiser la gestion des eaux de surface, elles doivent être classées en fonction de leurs usages. Il y a donc différentes utilisations :

- Agricole.
- Aquaculture.
- Approvisionnement public en eau, y compris l'approvisionnement en eau domestique.
- Eau potable.
- Industrie autosuffisante : y compris l'industrie, l'agro-industrie, le commerce .
- Production hydroélectrique.
- Production d'électricité.

I.8.2.eaux souterraines :

I.8.2.1. Les eaux souterraines, les nappes et les aquifères :

Les **eaux souterraines** regroupent l'ensemble des réserves d'eau qui se trouvent dans le sous-sol. L'eau est stockée dans des zones appelées **aquifères**, composées de roches poreuses et/ou fissurées. L'eau peut s'accumuler dans ces espaces vides pour former des **nappes**, qui occupent tout ou partie de l'aquifère.

La profondeur des nappes est variable : les plus profondes peuvent se trouver à plusieurs centaines de mètres sous la surface.

Les **nappes phréatiques** sont celles qui se trouvent près de la surface. Leur faible profondeur les rend facilement accessibles pour les activités humaines[26].

L'eau des nappes provient du **phénomène d'infiltration**. À la suite des pluies, une partie de l'eau pénètre dans les pores et les fissures du sol. Entraînée par gravité, elle traverse le sol puis s'infiltré dans le sous-sol, jusqu'à ce qu'elle soit interrompue par un substratum compact, imperméable. L'eau s'accumule alors dans tous les espaces vides de l'aquifère, et forme une nappe.

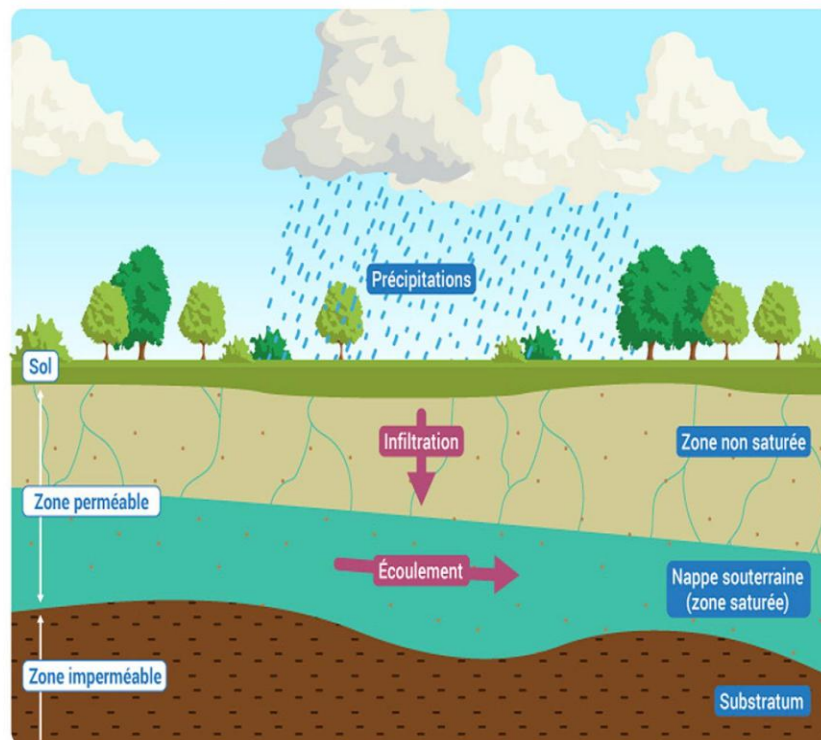


Figure (I.9):cycle de l'eau souterraine[26].

I.8.3.Eau de pluie :

Les eaux pluviales sont les **eaux issues du ruissellement**. Elles se chargent d'impuretés au contact de l'air et, en ruisselant, entraînent des particules polluantes (traces d'huile de vidange ou de carburant). Elles doivent retourner au milieu naturel via un réseau dit « séparatif » pour éviter un engorgement du réseau d'eaux usées et font l'objet d'un traitement distinct[27].

Les eaux pluviales ne peuvent en aucun cas être utilisées pour une consommation alimentaire ou même une douche.

L'eau de pluie peut être utilisée pour:

- l'arrosage ;
- le lavage de votre voiture ;
- le lavage de sol ;
- l'alimentation des toilettes et lavage du linge (sous réserve d'un équipement spécifique).

I.9. Besoins en eau douce :

I.9.1.La consommation domestique:

Depuis 2012, la consommation domestique d'eau potable tend à se stabiliser autour de 147 litres d'eau potable par jour et par habitant. Les caractéristiques des bâtiments et des équipements ménagers, la présence de piscines privées et de jardins, de même que les pratiques environnementales des ménages sont autant de facteurs qui influent sur la consommation d'eau potable et donc sur les prélèvements d'eau douce associés.[29].

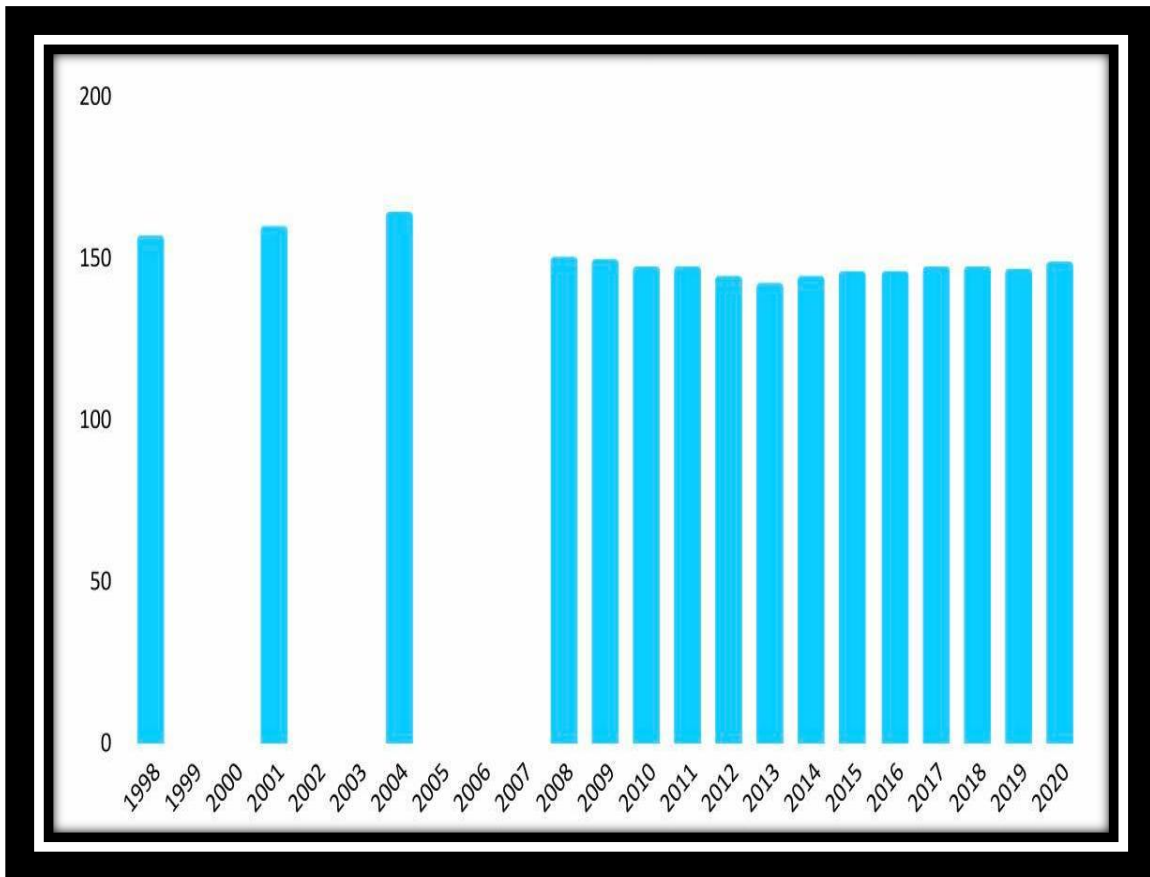


Figure (I.10): Evolution de la consommation domestique d'eau potable.[29].

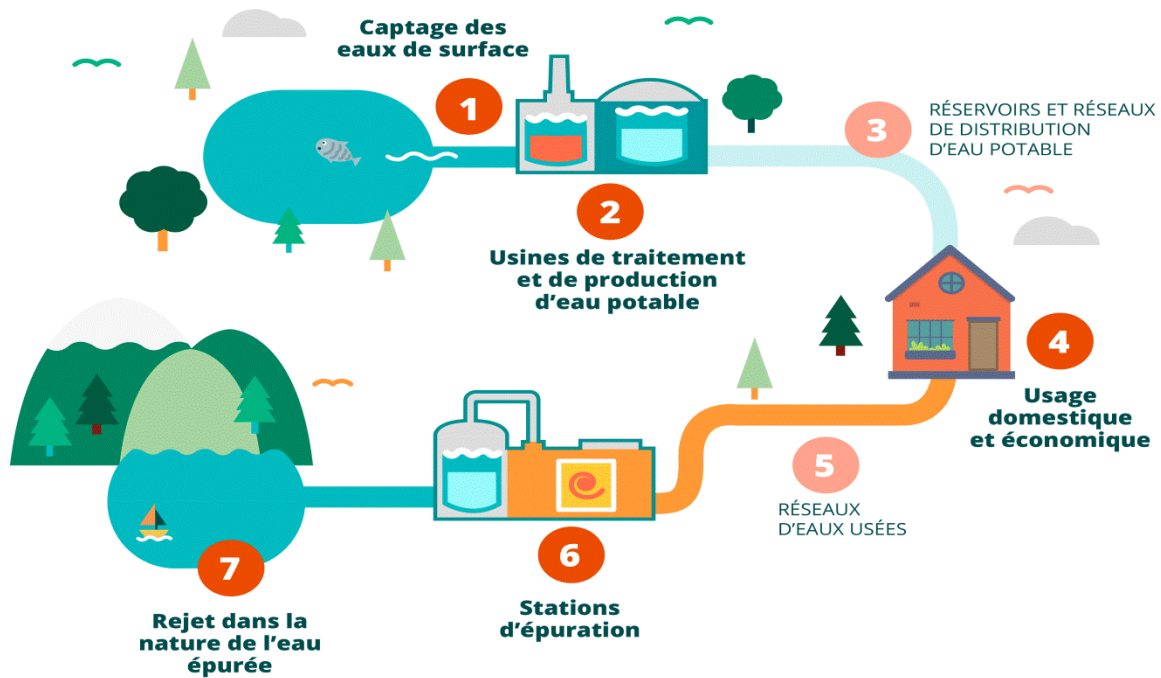


Figure (I.11): la consommation domestique d'eau potable[28].

➤ **Consommation d'eau domestique par pays (en litres /personne/jour)**

- Canada, Etats-Unis, Japon, Australie, Suisse : supérieur à 250 litres / personne / jour
- Finlande, Italie, Espagne, Portugal, Corée du sud, Grèce, Suède : de 160 à 250 litres / personne / jour
- Danemark, Royaume-Uni, Autriche, France, Luxembourg, Irlande : de 130 à 160 litres / personne / jour
- Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Hongrie, Bulgarie, Pologne, République Tchèque : inférieur à 130 litres / personne / jour
- Asie et Amérique Latine : de 50 à 100 litres / personne / jour
- Afrique Sub-Saharienne : de 10 à 20 litres / personne / jour [28].

I.9.2..La gestion de l'eau en Algérie :

La gestion de l'eau en Algérie pose un problème épineux aux autorités. Les ressources disponibles sont en deçà des besoins. La vétusté des réseaux d'adduction et la capacité de stockage déficiente entravent la bonne distribution de l'eau aux con-sommateurs. La dotation journalière par habitant reste faible par rapport aux normes internationales. Les instruments de gestion de l'eau ne sont pas efficaces.

L'Algérie compte 17 bassins-versants (Fig. 12). Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. [30].

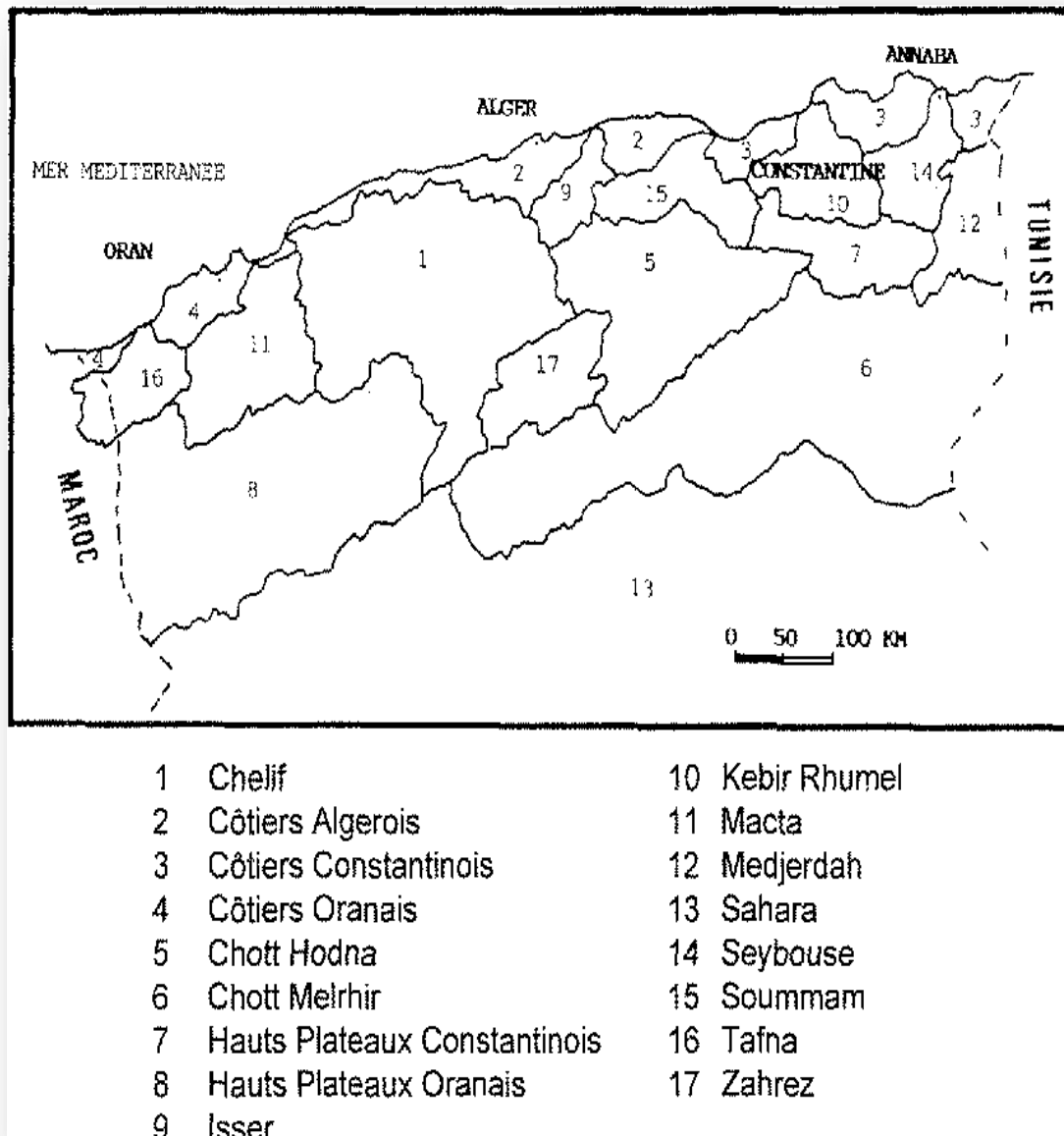


Figure (I.12): Les 17 bassins-versants en Algérie.[30].

I.9.2. Les besoins en eau de l'agriculture :

➤ À l'échelle mondiale :

Avec 70 % de la consommation mondiale d'eau, l'agriculture est sans conteste le secteur d'activité le plus consommateur d'eau. Depuis le début du XXe siècle, la superficie des terres cultivées en général, et celle des terres irriguées en particulier, a beaucoup augmenté pour faire face à l'accroissement de la population et des besoins alimentaires.

L'irrigation, qui était déjà utilisée par les civilisations égyptienne et mésopotamienne, est encore de nos jours une technique en développement. Elle est souvent utilisée en complément de

l'irrigation pluviale afin d'augmenter les rendements et d'accroître la durée de la saison agricole. [31].

Cette consommation varie d'une année sur l'autre, en fonction des conditions météorologiques et du type de cultures à irriguer. Les différentes cultures sont en effet plus ou moins consommatrices d'eau. Il faut par exemple :

- 25 litres d'eau pour produire 1 kg de salade,
- 100 litres d'eau pour produire 1 kg de pommes de terre,
- 400 litres d'eau pour produire 1 kg de maïs,
- 1 500 litres d'eau pour produire 1 kg de blé.



Figure (I.13): L'eau et l'activité agricole [31].

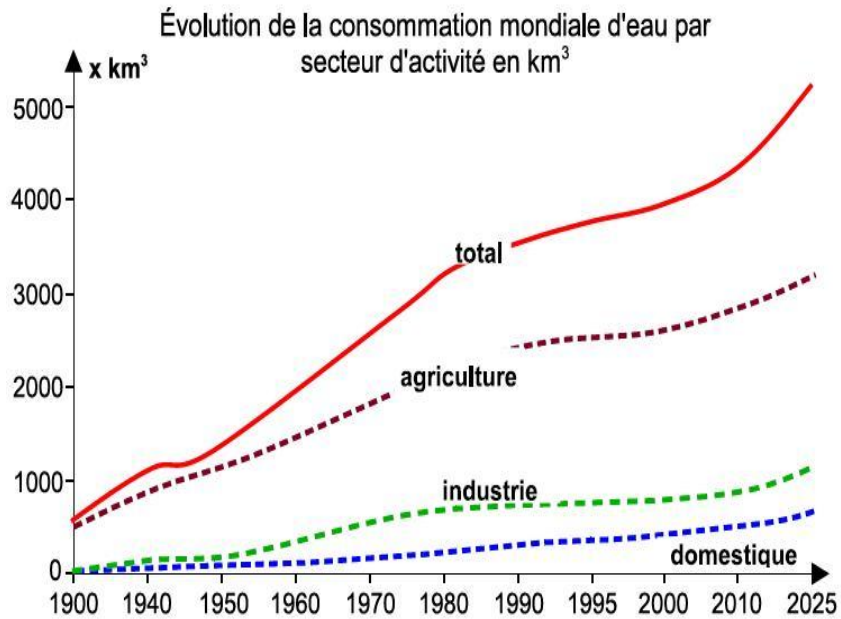


Figure (I.14): Evolution mondiale d'eau.[32]

I.9.3. Usages de l'eau pour l'industrie :

Les usages de l'eau pour l'industrie sont liés aux opérations de transformation des produits industriels. L'eau est utilisée selon quatre grandes catégories :

- comme fluide thermique (production de vapeur, chauffage et refroidissement des installations) ;
- comme matière première d'un processus de fabrication (bière par exemple) ;
- comme agent de lavage de produits et de gaz, de nettoyage d'installations et de transport de solides ;
- et pour les besoins des personnels travaillant sur le site (cafétéria, toilettes...)[33].

Cette eau est généralement issue, soit d'une ressource naturelle (eau de surface, eau profonde, voire eau de mer), soit du réseau local de distribution d'eau potable. Elle subit des traitements spécifiques sur site en fonction des qualités requises pour les différents usages.

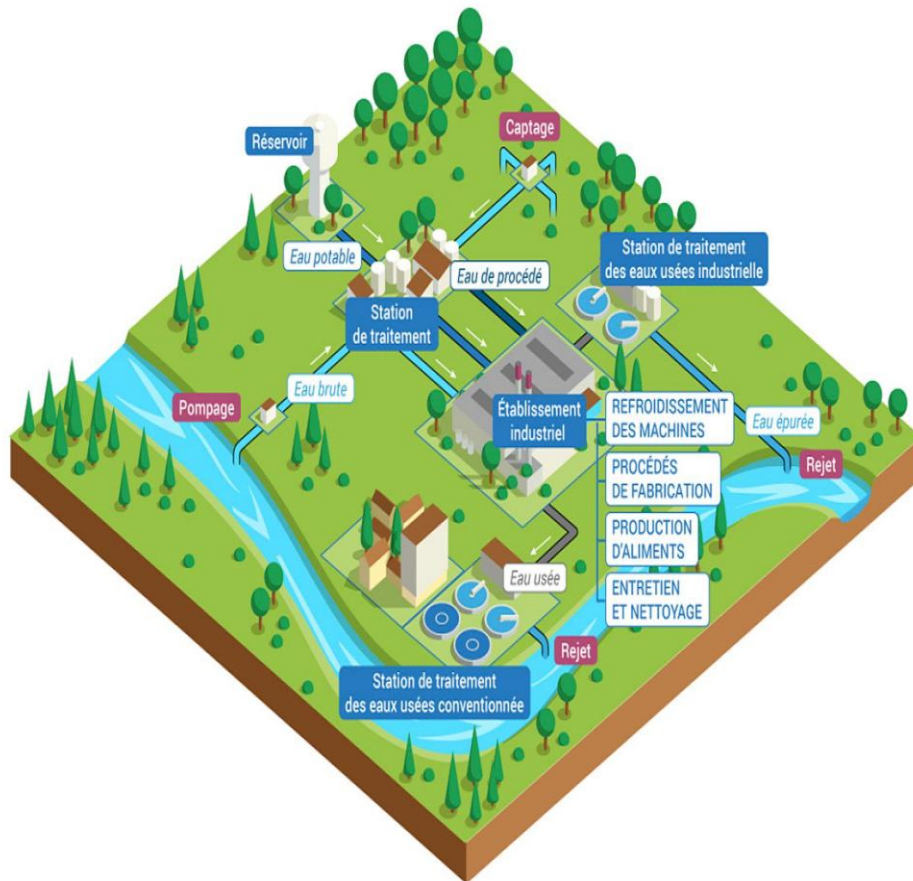


Figure (I.15): Usages de l'eau pour l'industrie .[34].

I.10. Problématique de l'eau salée :

Les principaux réservoirs d'eau salée : Les principaux réservoirs d'eau salée sont les mers et les océans, ils représentent 97 % du volume d'eau disponible sur Terre. Bien que l'on ne puisse pas la consommer en tant que boisson, cette eau constitue toutefois une ressource majeure pour les régions côtières. Elle est exploitée pour son sel par la saliculture, la pêche, le tourisme ou les activités portuaires.

Elle peut également être prélevée pour le refroidissement des centrales nucléaires et thermiques situées en bord de mer. À Hong Kong, par exemple, l'eau salée est disponible dans les chasses d'eau dans les zones métropolitaines en remplacement de l'eau douce. Elle couvre ainsi 80 % de la population [35].

I.11. La nécessité du dessalement :

Le dessalement d'eau de mer est :

- 1) Un moyen efficace de lutter contre le stress hydrique dans des régions littorales arides.
- 2) C'est une solution à fort potentiel puisque 40 % de la population mondiale réside à moins de 100 km de la mer, et 25 % à moins de 25 km.
- 3) Le dessalement est également un moyen adapté pour fournir de l'eau potable dans des zones où les ressources naturelles subissent un effet de salinisation (rivières, estuaires, eaux saumâtres intérieures ou souterraines, etc.)[36].

I. 12. Définition du dessalement de l'eau de mer :

Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou plus rarement dessalage. Il consiste à Séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau Saumâtre d'origine continentale.

L'eau de mer contient en moyenne 35g/l de sels qui sont essentiellement des chlorures de sodium (76%) et de magnésium(11%), des sulfates de magnésium (5%), de calcium (3,5%) et de potassium (2,4%). Dans l'eau, Les sels sont sous forme d'anions chlorures et sulfates Parallèlement aux cations sodium, magnésium, calcium et potassium.

La salinité de l'eau de mer n'est pas constante Dans les zones maritimes chaudes et Partiellement fermées elle est plus élevée :

- En méditerranée elle varie de 36 à 39g/l,
- Dans Le Golfe Persique elle peut monter à un delà de 60g/l.
- C'est l'inverse dans les mers froides Recevant de forts apports fluviaux : 7g/l dans la Baltique[37].

I.12.1. Classement des usines de dessalement en Algérie par capacité de production :

A ce jour, onze 11 stations, d'une capacité installée de 2,1 millions m³ /jour, ont été réalisées et mises en service.

Il s'agit des unités :

- **d'Arzew** (Oran : 86.000 m³/j),
- **Skikda** (100.000 m³/j),
- **Cap Djinet** (Boumerdès : 100.000 m³/j),

- **Cap Djinet** (Boumerdès : 100.000 m³/j),
- **Fouka** (Tipaza :120.000 m³/j),
- **Hamma** (Alger : 200.000 m³/j),
- **BeniSaf** (Ain Temouchent : 200.000 m³/j),
- **Mostaganem** (200.000 m³/j),
- **Souk Tlala**-(Tlemcen : 200.000 m³/j),
- **Honein** (Tlemcen : (200.000 m³/j),
- **Tenes** (Chlef : 200.000 m³/j)
- **Maacta** (Oran : 500.00 m³/j).

I.13. Techniques de dessalement :

Il existe deux principaux types de procédés de dessalement : les procédés membranaires et les procédés par distillation.

I.13.1 Les procédés membranaires :

I.13.1.1. L'osmose inverse :

Ce procédé s'inspire d'un phénomène physique naturel appelé l'osmose : lorsqu'on met en présence deux solutions de concentration différentes, séparées par une membrane, on observe un déplacement des espèces qui se fait de la solution la moins concentrée à la solution la plus concentrée (schéma a).

Si on applique une pression sur la solution la plus concentrée, on observe que ce transfert diminue, et s'arrête même une fois atteinte une pression seuil appelée « pression osmotique » (schéma b). Si la pression appliquée dépasse cette pression seuil, le phénomène s'inverse, et les espèces se déplacent alors du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré : ce phénomène est appelé osmose inverse (schéma c).

Dans le cadre du dessalement de l'eau de mer, la solution diluée est de l'eau pure et la solution concentrée de l'eau de mer. Durant l'osmose inverse, l'eau de mer traverse la membrane séparatrice, se purifiant par la même occasion.³⁸

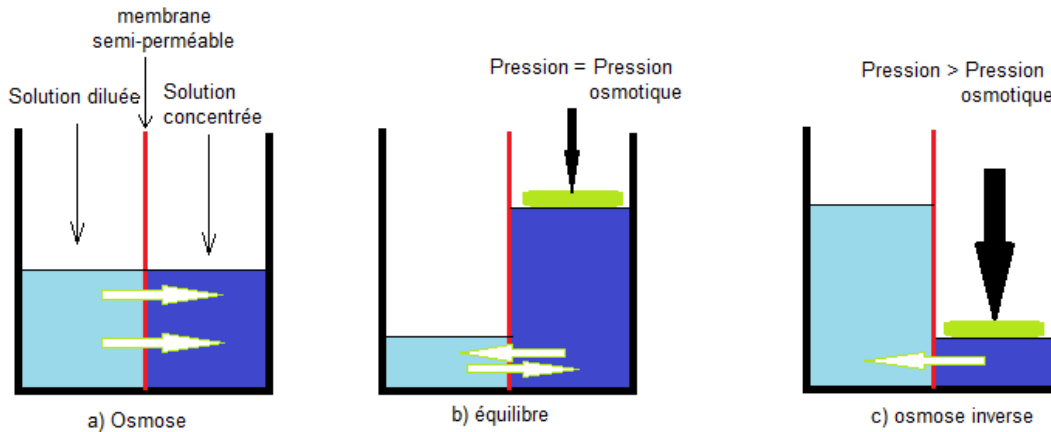


Figure (I.16): principe de l'osmose inverse .[38].

I.13.2. La distillation membranaire :

La distillation membranaire est un processus qui utilise les différences de pression de vapeur pour faire passer l'eau à travers une membrane macroporeuse et rejeter d'autres constituants non volatils présents dans l'eau influente[38].

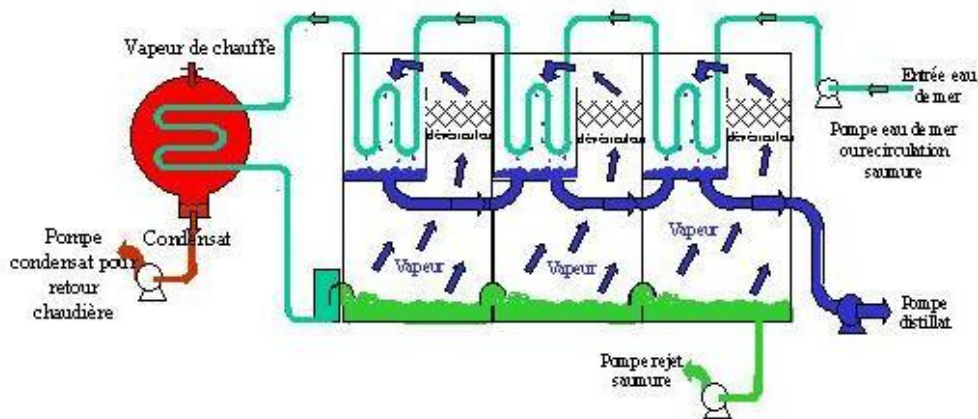


Figure (I.17): La distillation membranaire [38].

Cette revue examine les processus fondamentaux de transfert de chaleur et de masse dans la distillation membranaire, les progrès récents de la technologie membranaire, les configurations de modules et les applications et l'économie de la distillation membranaire, et identifie les domaines qui peuvent conduire à des améliorations technologiques dans la distillation membranaire ainsi que les caractéristiques d'application requis pour le déploiement commerciale.[39].

I.13.2.1. Vaporisation :

Dans ce procédé le mélange peut être évaporé à partir d'une interface de la membrane poreuse non mouillable avec diffusion à travers les pores remplis de vapeur et condensation à l'autre interface de la membrane.⁴⁰

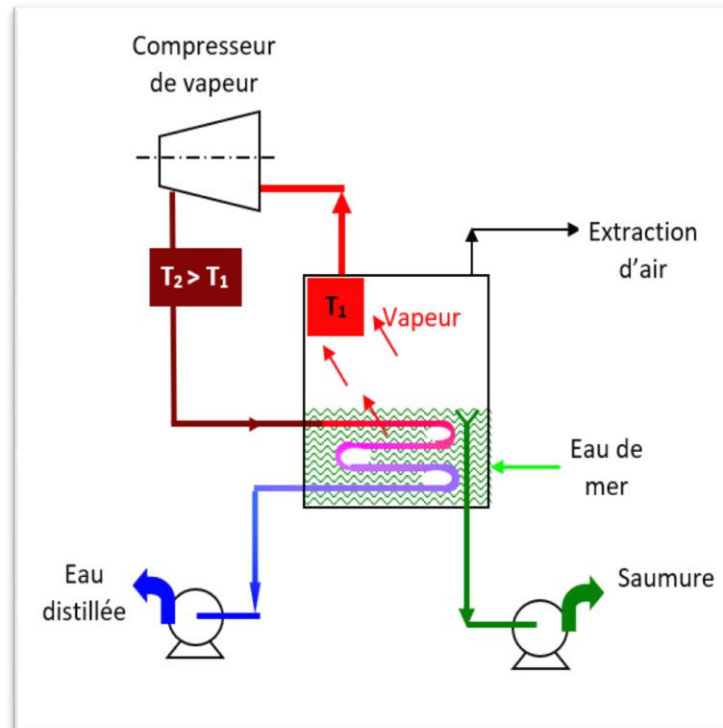


Figure (I.18): Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur .[35]

I.14. La comparaison des techniques est sur le schéma :

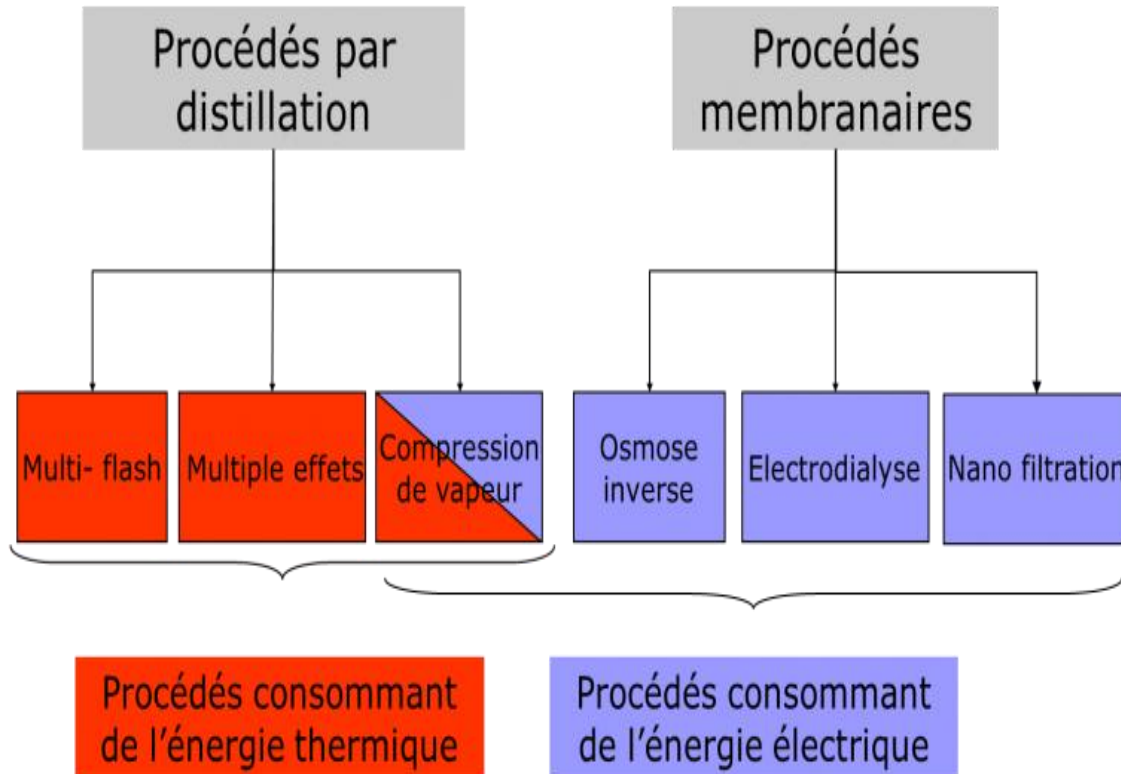


Figure (I.19): Schéma des Techniques de dessalement utilisées .[41].

I.15. Applications de dessalement et son Cout:

- La plus grande partie de l'eau dessalé est utilisé pour des usages domestiques et municipaux.
- le reste est utilisé pour des usages industrielle.
- les quantités d'eau dessalés utilisées a des fins agricoles sont négligeables et relèvent de considérations politiquesqu'économiques. Ceci résulte du cout de l'eau dessalée qui se situe aux environs de 0.7- 1 \$/m³ dans les conditions les plus favorables .

Un tel cout est acceptable pour les usages domestiques et industrielle mais n'est pas acceptables pour les usages agricoles , quand on sait qu'il faut 1 m³ d'eau environ pour produire 1kg de blé et 4.5 m³ pour produire 1kg de riz .

D'autre part, les installations de dessalement situées à proximité du point d'utilisation sont privilégiées pour réduire au minimum les coûts de transfert ; cependant, en termes de fonctionnement et d'entretien, les petites ou moyennes installations tendent à être moins rentables que les grandes installations.

I.16. Les limitations d'utilisation de dessalement :

I.16.1. Impact sur l'environnement et effets externes associés aux techniques de dessalement de l'eau:

Le dessalement de l'eau a un *impact à la fois positif et négatif* sur l'environnement.

Le principal effet positif direct est un accroissement des disponibilités en eau. L'impact positif indirect sur l'environnement découle d'une salinisation réduite du sol grâce à une irrigation à base d'eau dessalée par rapport à l'utilisation d'eaux saumâtres.

Les répercussions négatives sur l'environnement peuvent tenir à divers éléments : évacuation de la saumure ou des eaux résiduelles produites par le dessalement ; additifs chimiques anti-salissures ou anticorrosion ; impact visuel au niveau du paysage ; bruit ; émission de gaz à effet de serre dérivant de la consommation d'énergie ; etc. Par ailleurs, l'évacuation de la saumure résiduelle dans les zones côtières ou intérieures n'a pas la même incidence, l'opération étant plus complexe dans le second cas tandis que les rejets côtiers directs ont des retombées sur l'écosystème marin.



Figure (I.20): Station de dessalement.[42].

➤ Perspective d'avenir :

Il faut protéger le milieu aquatique de l'effet de la forte salinité car l'élimination de la saumure libérée par les processus industriels a un impact négatif sur notre planète. Par conséquent, le traitement de l'eau de saumure offre une solution pour extraire plutôt le sel de ces eaux pour le réutiliser.

La première étape du traitement de l'eau salée consiste à extraire autant d'eau « pure » que possible. Lorsque vous utilisez des modules de « dé-saturation », vous pouvez récupérer jusqu'à 95 %. Ce qui reste est un flux de saumure hautement concentré, que vous pouvez ensuite conserver dans un bassin d'évaporation ou atteindre Zéro Déchet Liquide grâce à un processus thermique ou à basse température.

I.17. Conclusion :

Toutes les techniques de dessalement de l'eau de mer sont très intéressantes au vu de leurs performances. Toutefois, à l'heure actuelle, le dessalement ne peut subvenir aux besoins en eau douce des populations les plus pauvres, en raison de ses coûts énergétiques trop élevés, mais les techniques ne cessent de se développer, ce qui va permettre une baisse des coûts de production et peut être permettre à certains de ces pays, en grande pénurie d'eau, de s'équiper à leur tour afin de pouvoir sécuriser leur alimentation.

Malgré tout, il faudra sans doute que les pays les plus riches, qui sont souvent les mieux pourvus en eau douce, fassent preuve de solidarité envers les pays les plus pauvres, pour permettre leur équipement, qui dans certains cas devra inclure des canalisations pour acheminer l'eau auprès des points de consommation.

Il est important de noter, en outre, que les techniques actuelles, génèrent un certain nombre de problèmes environnementaux ce qui reste un frein pour leur développement à plus grande échelle.

Chapitre II :

Le procédé d'osmose inverse

II. Introduction :

L'**osmose inverse** est un système de purification de l'eau contenant des matières en solution par un système de filtrage très fin qui ne laisse passer que les molécules d'eau.

Considérons de l'eau comportant des solutés, particulièrement du sel. Si l'on met deux solutions de concentrations différentes de chaque côté d'une membrane filtre, l'eau franchit celle-ci jusqu'à ce que les concentrations s'équilibrent : c'est le phénomène de l'osmose. En exerçant une pression hydrostatique (entre 50 et 80 bars), on dépasse la pression osmotique et on force l'eau à franchir la membrane dans un sens, ce qui permet d'obtenir d'un côté un plus petit volume (environ 30% à partir de l'eau de mer océanique) d'une eau dont les solutés sont plus dilués (donc d'une eau plus pure), et de l'autre côté un plus grand volume d'une eau plus concentrée, qui sert de piston.

Ce procédé a été utilisé pour la première fois par la US Navy pour fournir de l'eau potable aux sous-mariniens. Il est utilisé aujourd'hui de façon industrielle pour la purification de l'eau et le dessalement de l'eau de mer.

Plusieurs industriels (Coca-Cola, par exemple) vendent de l'eau osmosée dans les pays qui ont peu de ressources en eau potable, et intègrent de l'eau osmosée dans leurs sodas.[43]



Figure (II.1): Une installation d'un Système d'osmose inverse .[44]

II.1. Présentation du procédé d'osmose inverse :

Le dessalement par osmose inverse est un procédé qui permet de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou des eaux saumâtres et cela dans le but de garantir aux populations une disponibilité continue de l'eau propre à la consommation. L'implantation de tel procédé passe par le contrôle des performances des membranes. Or, ces performances dépendent de la qualité de l'eau à filtrer, du prétraitement, des membranes utilisées et des conditions d'opération.[45]

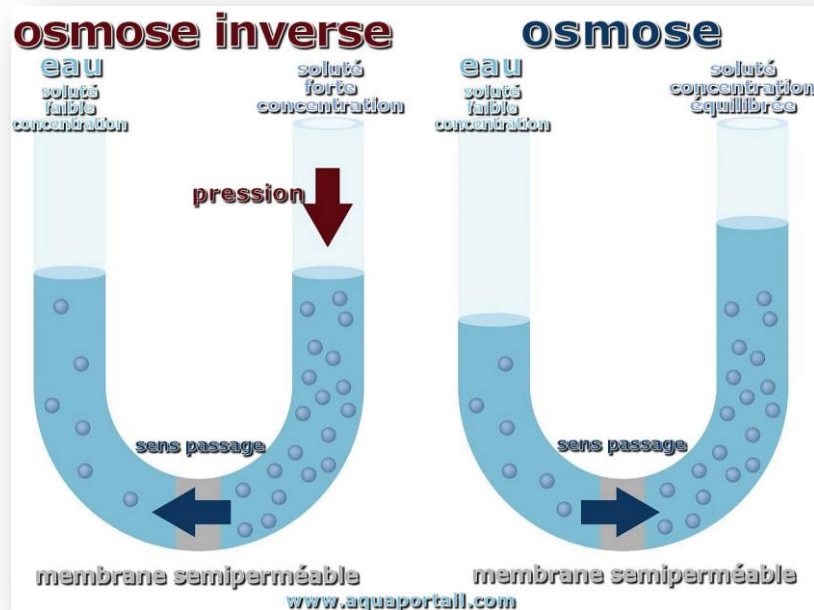


Figure (II.2): Principe de l'osmose inverse. [46]

II.2.Contexte d'utilisation :

L'osmose inverse est utilisée pour produire de l'eau potable et de l'eau déminéralisée pour l'appoint d'eau de batteries d'accumulateurs électriques (traction ou marine).

- Elle est aussi utilisée dans l'industrie pharmaceutique,
- des semi-conducteurs, où une eau pure est indispensable à la fabrication du produit .
- Dans l'industrie agroalimentaire,

II.3.Objectif du chapitre :

1. Définir Le système d'osmose inverse et citer le principes de son fonctionnement.
2. Identifier les Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse .

II.4. Les principes de d'osmose inverse :

II .4.1. Définition de l'osmose :

Tout d'abord le phénomène de l'osmose directe est un phénomène naturel connu depuis deux siècles. Le principe en est le suivant :

Soit deux solutions de concentrations différentes, par exemple une eau chargée en minéraux et une eau pure. Si ces deux solutions sont séparées par une membrane semi-perméable, l'eau pure passera de la solution la moins concentrée à la solution la plus concentrée. Ce transfert d'eau constitue le phénomène de l'osmose.

Ce transfert entraîne une élévation du niveau de liquide dans le compartiment contenant la solution la plus concentrée et en conséquence une augmentation de la pression sur la membrane. A partir d'un certain seuil de pression le transfert s'arrête. [47]

Ce seuil caractérise la pression osmotique.

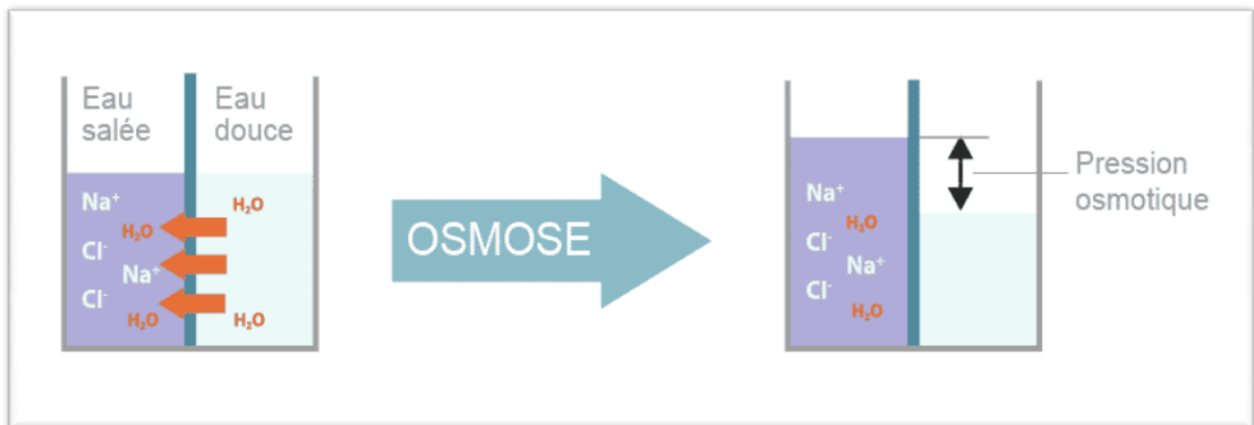


Figure (II.3): Phénomène de l'osmose.[48]

II. 4.2. Définition de l'osmose inverse :

L'osmose inverse (OI) est une technologie industrielle d'environ 50 ans bien connue et bien maîtrisée aujourd'hui. Elle consiste à pressuriser une solution pour faire uniquement passer les molécules d'eau à travers une membrane polymère (par un système de pompes haute pression).

À titre d'exemple, afin de contrer la pression osmotique de l'eau de mer, la pression minimale à appliquer pour faire passer une goutte d'eau pure à travers la membrane est d'environ 30 atm et de l'ordre de 50-70 atm pour pouvoir produire en quantité industrielle. Cette technologie a largement détrôné dans les années 2000 les autres systèmes de dessalement d'eau de mer. [49]

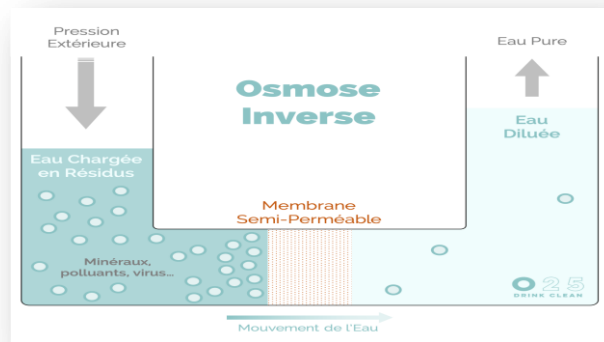


Figure (II.4): procédés de l'osmose inverse. [48]

II.5. Les pressions :

II.5. 1. Pression osmotique :

La pression osmotique est une force déterminée par une différence de concentration entre deux solutions situées de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. L'osmose et les forces osmotiques favorisent la diffusion des substances à travers la membrane, en milieu interne, le solvant passant de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée.

L'osmose implique une pression osmotique, et l'osmose inverse implique une pression hydrostatique.[50]

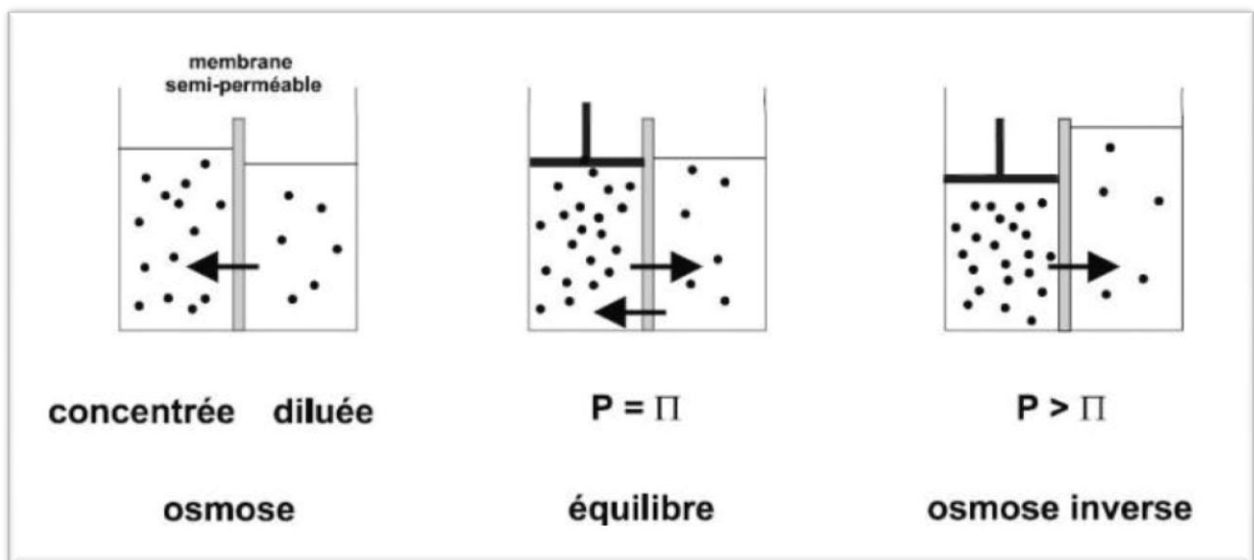


Figure (II.5): Pression osmotique. [51]

Si deux solutions aqueuses ayant une concentration saline différente sont séparées par une membrane semi-perméable, l'eau migre spontanément vers la solution la plus concentrée en sel. L'équilibre s'établit à la pression osmotique. Plus l'eau est chargée en sels, plus la pression osmotique est élevée. En effet, cette dernière (P) se calcule selon la loi de Van'tHoff.[52]

$$\pi = i \times C \times R \times T \quad (1)$$

Avec :

i = nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte.

C = concentration en sels (en mol.m⁻³).

R = constante des gaz parfaits (R = 8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹).

K = température de la solution (en kelvins).

Ainsi, la pression osmotique d'une eau à 20°C contenant 35 g de chlorure de sodium par litre vaut :

$$= 2 \times (35 \times 10^3 / 58,5) \times 8,314 \times 293 = 29,14 \times 10^5 \text{ Pa} = 29,14 \text{ bar.}$$

II.5.2. Pression d'alimentation :

Quand la pression efficace de l'eau d'alimentation augmente, la charge en solide dissout du perméat diminue alors que le débit du perméat augmente.

Pour optimiser la durée de vie d'une membrane d'osmose inverse, le ratio entre le perméat et le débit d'alimentation doit être de l'ordre de 1 : 5. Ainsi, si 20% de l'eau d'alimentation est transformé en eau déminéralisée, le reste, soit 80%, correspond au concentrât rejeté.[53]

II.6. Explication du procédé:

Cette solution a recours à des membranes filtrantes spécifiques. Ce sont en fait des films de polyamides semi-perméables à l'eau. Leurs pores sont minuscules (moins d'un nanomètre de diamètre), une taille qui entraîne une sélection : seules les molécules d'eau traversent la membrane, les sels dissous ne passent pas, et encore moins les impuretés contenues dans l'eau.

Dans la nature, l'osmose est un phénomène essentiel aux équilibres biologiques. Mais le procédé industriel est qualifié d'«osmose inverse» car les molécules d'eau contenues dans la solution d'eau salée traversent la membrane sous une pression de l'ordre de 80 bars. Après passage membranaire, l'eau ressort débarrassée de 99 % de son sel.[54]

Dans la réalité, si on avait laissé faire la nature, sans imposer ni membrane ni pression, l'eau douce se serait chargée en sel et l'eau salée se serait diluée.

L'osmose inverse est une technique moderne pour traiter les eaux de mer et les eaux saumâtres.

II.7.Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse :

Les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse sont schématisés sur la figure .

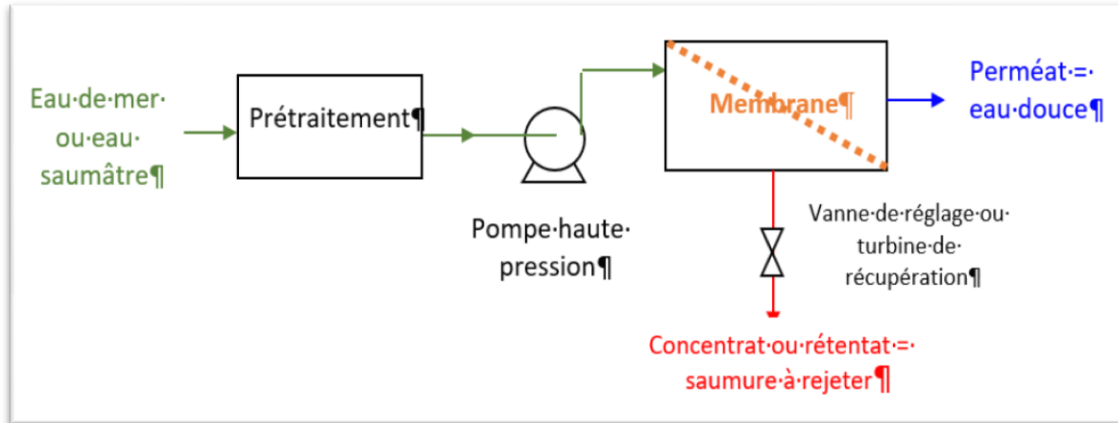


Figure (II.6): Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse. [55]

- Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :
 - une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière.
 - un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte .
 - le procédé de dessalement lui-même.
 - le post-traitement avec une éventuelle minéralisation de l'eau produite.
- A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.[56]

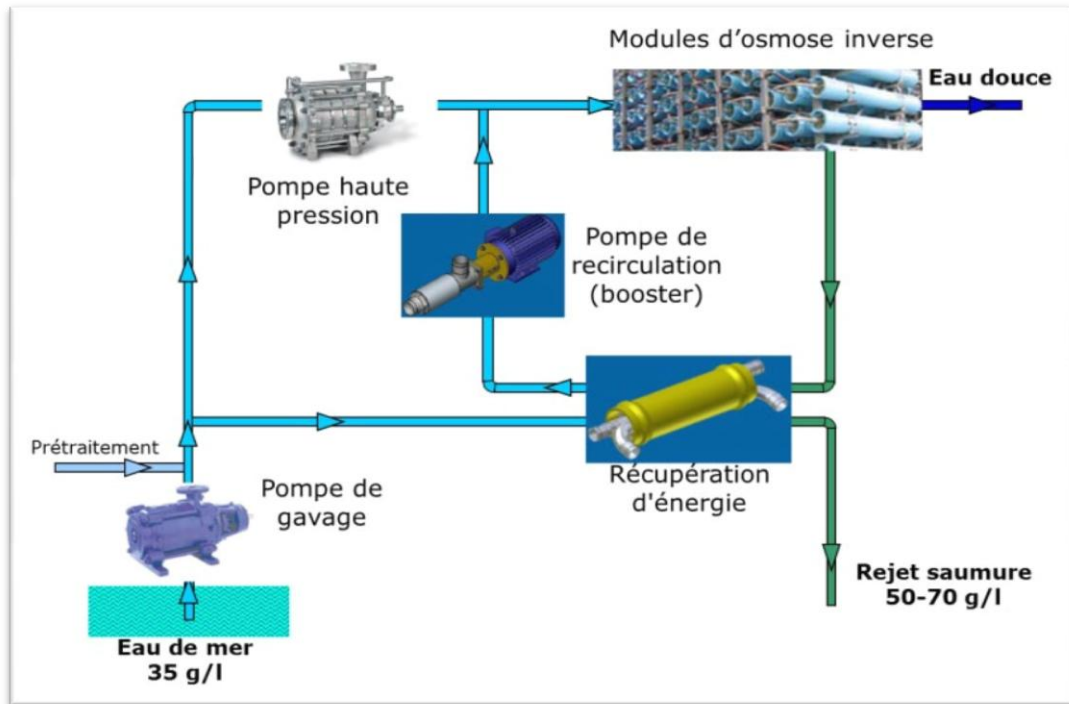


Figure (II.7): Schéma général d'une unité d'osmose inverse. [58]

II.7.1. Prise d'eau de mer :

C'est la première phase d'un processus de dessalement. La prise doit être faite de telle manière à permettre l'obtention d'une eau de la meilleure qualité possible en minimisant les matières en suspension y présentes.

Il existe deux grandes familles de méthodes qui peuvent être scindées en sous familles, selon les particularités des sites et des procédés technologiques.

Ces méthodes sont :

- La prise de l'eau par forages ou puits de captage côtiers : elle est recommandée pour les petites et moyennes usines.
- La prise de l'eau par des puits de plage ou des drains en tranchées ou en nappe sous les plages ou sous le fond marin : elle est recommandée également pour les petites et moyennes usines.
- Les prises directes de l'eau en mer ouverte, en surface ou au fond : elle est recommandée pour les grandes usines.[59]

II.7.2. le pompage, le stockage et le tamisage :

✓ Le pompage :

La première étape du processus de potabilisation consiste à pomper l'eau dans son milieu naturel afin de l'acheminer jusqu'à la station. Lorsque le relief naturel n'est pas adapté, il faut relever les eaux au niveau de l'usine par le biais de pompes ou d'une vis d'Archimède.

Acheminée à la station, l'eau est, ensuite, dégrillée à différents niveaux, comme pour l'assainissement. Elle traverse une première grille, destinée à arrêter les gros corps flottants et à éliminer ainsi les plus gros déchets : c'est le pré-dégrillage. Puis, l'eau subit un dégrillage moyen. Enfin, un dégrillage fin est effectué. Suivant les caractéristiques de l'eau à traiter, les différentes grilles peuvent être placées les unes derrière les autres ou séparément. [60]



Figure (II.8): Tuyau de captage de l'eau de mer. [61]

✓ Le stockage :

Après avoir été dégrillée, l'eau rejoint un bassin de stockage de forte capacité afin de parer aux éventuelles pollutions ou pointes de consommation. Ce stockage est souvent doté d'une autoépuration naturelle provenant des rayons du soleil, de la faune et de la flore présentes dans le bassin. L'eau pompée reçoit un traitement de pré désinfection au chlore ou à l'ozone permettant de diminuer le taux de bactéries. [62]

✓ Le tamisage :

L'eau est, ensuite, épurée à l'aide d'un tamis rotatif dont l'écartement des mailles sont compris entre 6 et 0,5 mm. Le fonctionnement est simple : la vitesse du flux est réduite par une boîte d'alimentation. L'eau passe sous une lame siphonide qui élimine les turbulences avant que les liquides et les solides en suspension soient au contact du tamis rotatif. Les solides restent à la surface externe du filtre et sont retirés par une lame. L'effluent traverse le tamis cylindrique de l'intérieur vers l'extérieur assurant ainsi l'auto-nettoyage. Son action est complétée par une rampe de lavage.[63]

II.8. Les composants d'un système d'osmose inverse :

II.8.1. Le prétraitement:

Le prétraitement est important lorsqu'on travaille avec l'osmose inversée et les membranes de nanofiltration dû à leurs natures de leur conception en spirale. Le matériel est conçu d'une telle façon que cela permet seulement un passage au travers du système. Autant que la conception en spirale ne permet pas le retour palpitant avec l'eau et l'agitation de l'air pour parcourir sa surface et supprimer les solides. Depuis que les matériaux accumulés ne peuvent pas être supprimé des systèmes de membranes de surfaces, ils sont hautement susceptibles de s'encrasser (perte de capacité de production). **Cependant, le prétraitement est une nécessité pour n'importe quel système d'Osiose Inversée ou de Nanofiltration.**

Il a été proposé (Schippers et Verdouw) d'utiliser un indice de colmatage modifié, le Modifié Fouling Index (**MFI**), en se servant du même équipement que pour le **SDI**.

Après un traitement conventionnel, on peut utiliser un filtre à cartouche, dont le seuil de coupure varie entre 5 et 25 µm. Celui-ci agit comme "fusible" pour protéger les modules.

Les principaux ennuis viennent de l'entartrage des membranes provoqué par les sels calciques : carbonates et sulfates.

Pour éviter ou réduire ces problèmes, on peut :

- réduire la dureté par adoucissement de l'eau d'alimentation.
- ajuster le pH (acidification).[64]

II.8.2 Prétraitement conventionnel :

Le prétraitement conventionnel est encore très majoritairement utilisé dans les usines de dessalement. La filière de prétraitement conventionnel comporte généralement les étapes suivantes :

➤ Préfiltration grossière :

Le rôle principal de la préfiltration est d'éliminer les gros matériaux qui peuvent endommager les installations et réduire l'efficacité globale du procédé de traitement.

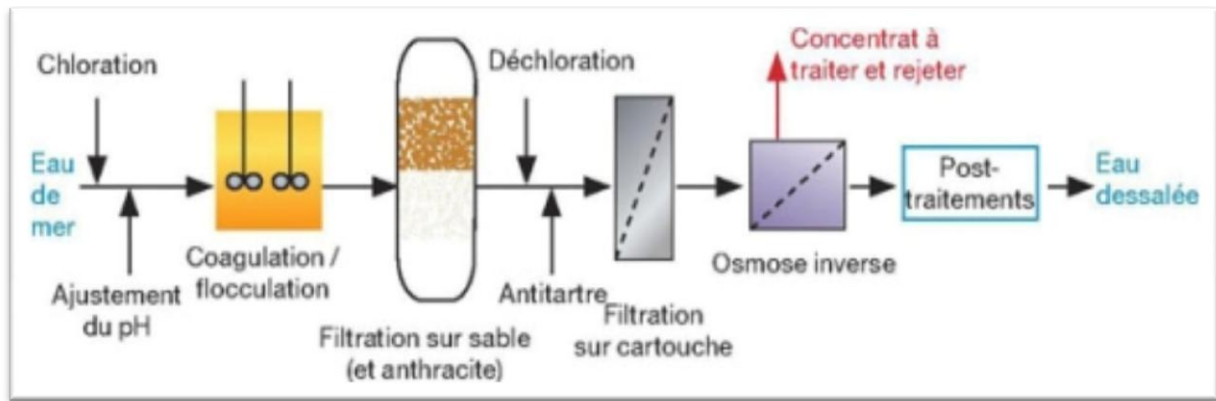
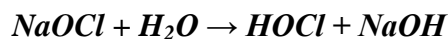
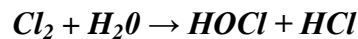


Figure (II.9): Prétraitement conventionnel. [65]

➤ **Chloration :**

La chloration est nécessaire pour désinfecter et éviter la croissance biologique qui cause le biocolmatage de la membrane. Le chlore est ajouté sous la forme d'hypochlorite de sodium (NaOCl) ou de gaz dichlore (Cl₂) qui est hydrolysé sous la forme d'acide hypochloreux (HOCl).



Dans l'eau, l'acide hypochloreux se dissocie en ions hydrogène (H⁺) et hypochlorite (OCl⁻).



La somme du Cl₂, NaOCl, HOCl et OCl⁻ constitue le chlore résiduel libre. Une concentration en chlore résiduel libre de 0,5 à 1,0 mg.l⁻¹ doit être maintenue le long de la filière de prétraitement pour empêcher le biocolmatage de la membrane.[66]

➤ **Ajustement du pH :**

L'addition d'acide comme l'acide sulfurique (H₂SO₄) est nécessaire pour empêcher l'entartrage par CaCO₃.

➤ **Coagulation et floculation :**

Les coagulants sont ajoutés pour que les particules colloïdales puissent s'agglomérer. Pour améliorer la procédure de floculation, des floculants comme les polymères cationiques ou anioniques sont également rajoutés. Les coagulants les plus utilisés sont le chlorure ferrique (FeCl₃), le sulfate ferrique (Fe₂(SO₄)₃), le sulfate d'aluminium (Al₂(SO₄)₃).

➤ **Filtration sur sable mono- ou bicouche :**

La filtration sur sable est nécessaire pour éliminer les agglomérats produits lors de la coagulation. Une filtration sur sable bicouche est suffisante pour atteindre un SDI inférieur à 4 et

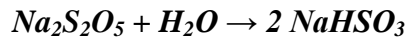
effectivement éliminer des grands débris et les agglomérats si le système est alimenté par une eau brute de bonne qualité. [66]

➤ Déchloration et antitartre :

La déchloration doit être effectuée avant l'osmose inverse car le chlore résiduel peut détériorer les membranes d'osmose inverse.

Des fournisseurs de membranes donnent une dégradation de la membrane après des temps de contact de 200 à 1000 heures avec une concentration en chlore résiduel libre de 1 mg.l⁻¹ pour des membranes composites.

La dégradation sera plus rapide dans le cas de solutions alcalines et de températures élevées. Normalement, le métabisulfite de sodium (Na₂S₂O₅) est utilisé pour la déchloration, pour son efficacité et son faible prix. Dans l'eau, il produit du bisulfite de sodium : [66]



Le bisulfite de sodium réduit l'acide hypochloreux :



Le métabisulfite de sodium est nécessaire théoriquement à 1,34 mg pour 1 mg de chlore résiduel. En pratique pour enlever 1 mg de chlore résiduel libre, il faut typiquement 3 mg de métabisulfite de sodium. Le séquestrant (TD-ASCAL) est dosée dans l'eau pour disperser les carbonates de calcium, les sulfates de calcium, les sulfates de baryum, ...etc. et retarde leur précipitation.[66]

➤ Filtration à cartouche :

La dernière étape du prétraitement conventionnel est la filtration sur cartouche avec une taille de maille de 5 à 10 µm pour protéger les membranes d'osmose inverse.

Le choix du prétraitement conventionnel doit donc être adapté selon la qualité de l'eau brute pour assurer la meilleure qualité de l'eau possible en amont des membranes d'osmose inverse.[67]

II.8.3 Prétraitement par les procédés membranaires :

En raison des limitations du prétraitement conventionnel qui viennent d'être évoquées, un intérêt croissant s'est porté sur l'utilisation de procédés membranaires basse pression tels que la microfiltration, l'ultrafiltration et la nanofiltration. Les avantages majeurs des procédés membranaires sont les suivants :

- Flux de l'osmose inverse significativement élevé.
- Plus faible consommation de produit chimique.
- Augmentation de la durée de vie des membranes d'osmose inverse.

- Capacité de fonctionnement à une qualité de l'eau d'alimentation variée.
- Désinfection et nettoyage de l'osmose inverse moins nécessaire.[68]

➤ **Le Pompage haute pression :**

Avant d'entrer dans les membranes d'osmose inverse, l'eau de mer clarifiée est pressurisée au moyen de la pompe haute pression généralement entre 55 et 85 bars, en fonction de la température et de la salinité de l'eau.

➤ **Récupération de l'énergie :**

a. Présentation du système :

La récupération de l'énergie de la saumure à la sortie des membranes est réalisée au moyen des chambres hyperbariques. Cette opération est faite au niveau du système PX-220 (pressure Exchanger) de la marque ERI, avec 97 % d'énergie récupérer de rejet de la saumure.

Les rejets des membranes est dirigées vers le PX, qui transfère la pression du rejet à l'eau de mer, et la renvoie vers les membranes. Le PX fournit l'eau prétraitée par l'énergie du concentrât qu'il reçoit.[69]

b. Pompes BOOSTER :

Chaque unité d'osmose inverse contient une pompe HP, deux châssis de membranes d'osmose inverse et deux pompes BOOSTER qui sont reliées à la pompe HP par le même axe de rotation La pompe BOOSTER sert uniquement à compenser les pertes de charges provoquées par les membranes et les PX. Le concentrât actionne la pompe BOOSTER pour aider la pompe à haute pression.[70]

II.8.4. Le post-traitement :

Le perméat non traité des installations d'osmose inverse de l'eau de mer ne se conforme pas aux normes de l'eau potable telles que les directives sur l'eau potable de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). En raison des faibles valeurs de TDS, l'eau de per méat RO peut être désagréable, corrosive et malsaine. Le post-traitement pour répondre aux normes d'eau potable et d'irrigation est donc une partie essentielle de la plupart des installations à osmose inverse.

Le perméat doit être traité afin d'éviter la corrosion des tuyaux dans le réseau de distribution, la valeur du pH et la teneur en CO₂ doivent être ajustés pour la prévention de la formation du tartre et l'eau produite nécessite une désinfection supplémentaire. En outre, il existe des restrictions sur la teneur en bore, ce qui pose un problème de séparation du dessalement RO en raison du rejet limité de bore des membranes RO existantes. Par conséquent, des mesures spéciales doivent être prises pour respecter les limites de bore. [71]

II.9. Mode de fonctionnement des systèmes membranaires :

Il existe deux grandes techniques de **filtration** mettant en jeu un gradient de pression: **la filtration frontale et la filtration tangentielle.**

II.9.1. La filtration frontale :

La **filtration frontale**, ou *dead-end filtration*, consiste à faire passer le fluide à épurer perpendiculairement à la surface du filtre. C'est le processus employé par exemple avec les filtres à café. Les particules à éliminer sont retenues par le filtre. La matière entrant dans le module de filtration est donc retenue par la membrane.[75]

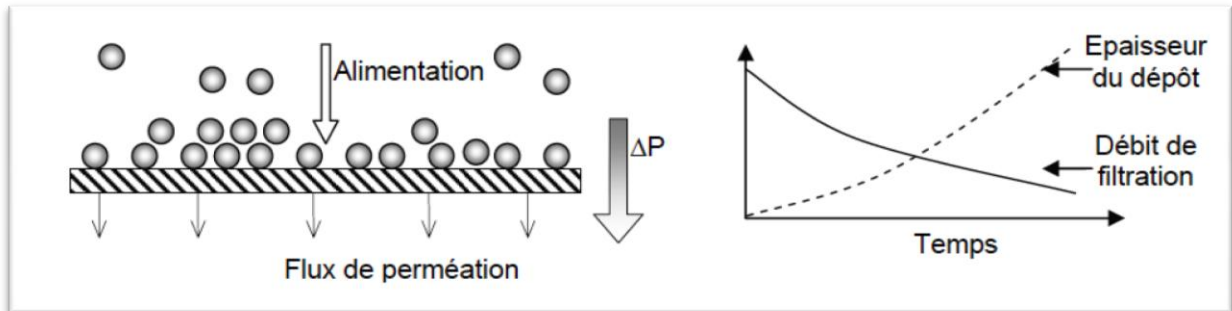


Figure (II.11): Présentation du fonctionnement de la filtration frontale. [75]

II.9.2. La filtration tangentielle :

Dans le cas de la **filtration tangentielle**, appelée aussi *cross-flow filtration*, le fluide circule parallèlement à la membrane filtrante qu'il traverse sous l'effet de la pression. Une partie du liquide, le perméat, traverse la membrane sous l'effet d'un gradient de pression. Les particules les plus grosses se concentrent dans le liquide qui n'a pas traversé la membrane, appelé **retentât**.

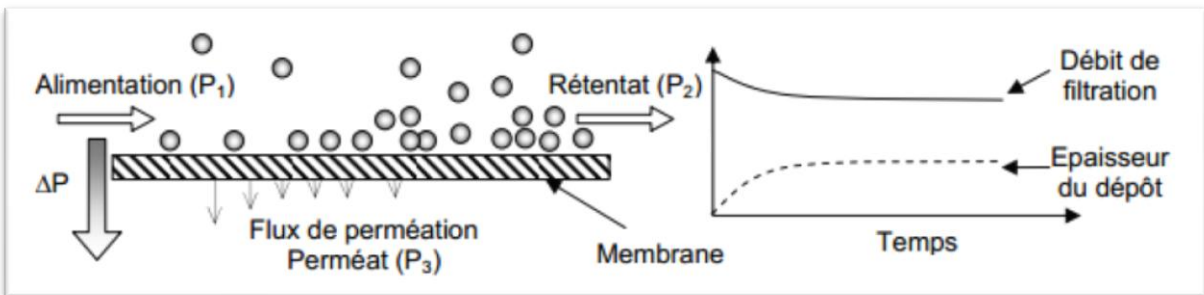


Figure (II.12): Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle.[75]

Il existe 5 procédés membranaires de filtration de l'eau à gradient de pression. Ces procédés se distinguent par la taille et le type de particules qu'ils peuvent séparer :

- ✓ le filtre à sable permet de retenir des éléments de plus de 10 μm comme les levures et les cheveux.

- ✓ la microfiltration (**MF**) permet de retenir des éléments de à 0,1 à 10 μm comme les bactéries, les lipides et les graisses ainsi que certaines macromolécules.
- ✓ l'ultrafiltration (**UF**) permet de retenir des éléments de 0,01 à 0,1 μm comme les virus ainsi que la plupart des protéines et les polymères organiques de hauts poids moléculaires.
- ✓ la nanofiltration (**NF**) permet de retenir des éléments de plus d'environ 0,001 μm comme les ions divalents, la matière organique dissoute et les sucres.
- ✓ l'osmose inverse (**OI**) ou hyperfiltration permet de retenir des éléments de plus de 0,0001 μm .

L'osmose inverse est, de loin, la filtration la plus fine. La quasi-totalité des molécules de taille supérieure à celle de la molécule d'eau seront bloquées. En effet, 95 à 99 % des particules solides dissoutes et 100 % des microorganismes sont éliminés. Parmi ces différentes techniques de filtration, l'osmose inverse est la seule capable d'éliminer les polluants les plus fins tels que les pesticides et herbicides. L'eau ainsi filtrée devient ultrapure. [76]

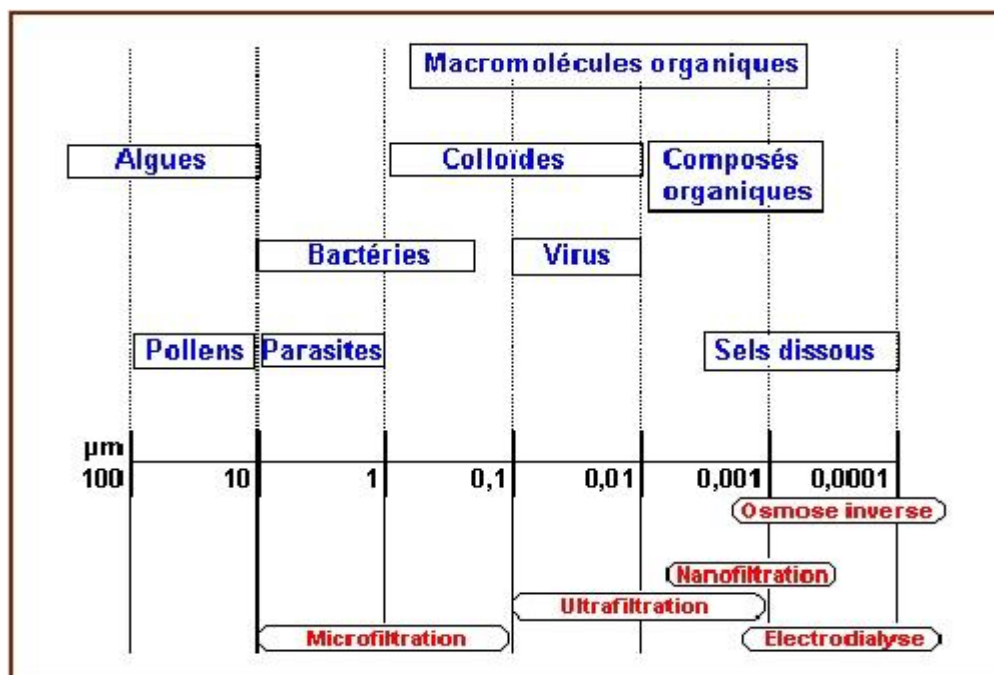


Figure (II.13): Taille des matériaux qui sont enlevés par les procédés membranaires.[77]

II.10. Paramètres de fonctionnement d'une osmose inverse:

La pression motrice ΔP est égale à la pression de refoulement de la pompe diminuée de la pression statique à la sortie du module d'osmose (côté production) et de la perte de charge due à l'écoulement de l'eau.

La conversion Y, rapport entre le débit produit et le débit d'alimentation se définit par :

$$Y = 100 \times QP / QA \quad (2)$$

Ce paramètre s'exprime aussi sous la forme du **facteur de conversion FC** :

Si $Y = 66 \%$, $FC = 3$, les sels seront donc concentrés 3 fois en admettant qu'ils sont entièrement retenus par la membrane. [78]

Le passage de sels PS se caractérise par le rapport entre la concentration côté production et la concentration côté alimentation :

On le note aussi par son complément : **le rejet de sels**, qui est le rapport entre la concentration côté rejet et la concentration côté alimentation.

$$PS = 100 \times CP / CA \quad (3)$$

On le note aussi par son complément : **le rejet de sels**, qui est le rapport entre la concentration côté rejet et la concentration côté alimentation. [79]

$$RS = 100 \times CR / CA = 100 - PS \quad (4)$$

La sélectivité R d'une membrane est définie par le taux de rejet R (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir :

$$R = C0 - CP / C0 = 1 - CP / C0 \quad (5)$$

Où :

C0: la concentration de l'espèce à retenir dans la solution.

Cp : la concentration de la même espèce dans le perméat. [79]

Débits spécifiques ou densité de flux volumique : Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité de flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement. [80]

II.11. Mécanisme de transfert:

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation .

Diffusion: toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression.

Le flux massique J_{solvant} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) de solvant et le débit volumique de solvant ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) traversant la membrane sont donnés par les relations:[81]

$$J_{\text{solvant}} = A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad \text{et} \quad Qp = A \cdot S / \rho \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (6)$$

Où

A : la perméabilité de la membrane au solvant ($m^{-1}.s$),

S : la surface de la membrane (m^2),

P : la masse volumique du solvant ($kg. m^{-3}$),

ΔP : la différence de pression de part et d'autre de la membrane et

$\Delta \Pi$: la différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

$\Delta \Pi$ est la pression osmotique du flux d'alimentation si le perméat est une solution très diluée. Les pressions sont exprimées en pascals.

Le flux massique $J_{\text{soluté}}$ ($kg. m^{-2}.s^{-1}$) de soluté traversant la membrane est donné par la relation:

$$J_{\text{soluté}} = B. (C_0 - C_p) \quad (7)$$

Où :

B : la perméabilité moyenne de la membrane au soluté ($m.s^{-1}$).

C₀ et C_p : sont respectivement la concentration en soluté de l'alimentation et du perméat de part et d'autre de la membrane ($kg. m^{-3}$).

II.12. Membranes d'osmose inverse :

II.12.1 Présentation des membranes :

La pièce principale d'une installation d'osmose inverse (ou d'un osmoseur) est sa membrane.

Le choix et la qualité de cette membrane sont donc d'une grande importance.

Une membrane est un mince film permettant une séparation sélective d'espèces chimiques ioniques, moléculaires ou d'organismes biologiques. Elle est caractérisée par sa sélectivité, sa perméabilité, ses qualités de stabilité chimique (pH, oxydants, dichlore..), thermique et microbiologique ainsi que par sa résistance mécanique.

Les membranes utilisées en osmose inverse sont des membranes organiques fabriquées en acétate de cellulose ou en polymères de synthèse (polyamides et polysulfones). Semiperméables, elles sont imperméables à la très grande majorité des composés dissous dans l'eau. Théoriquement, elles ne laissent passer que les molécules d'eau.[82]

II.12.2. Types des membranes d'osmose inverse :

Parmi les membranes d'osmose inverse utilisées, on peut citer :

✓ *membranes organiques :*

La plupart d'entre elles sont actuellement fabriquées à partir de :

Polymères organiques (acétate de cellulose, polysulfones, polyamides, etc.) dont les qualités leurs confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Elles sont souvent utilisées en ultrafiltration et microfiltration.

✓ *membranes minérales ou inorganiques :*

Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux, principalement les matières céramiques, le métal fritté et le verre. Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique, ce qui a ouvert de nouvelles voies dans la séparation par membrane.

✓ *membranes composites :*

Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association de carbone ou d'alumine comme support et de métaux tels le zircon, l'alumine et le titane). [83]

✓ *membranes échangeuses d'ions :*

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-désionisation font appel à cette technologie.

Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux. Une unité d'osmose inverse consiste

II.12.3. Durée de vie des membranes :

La durée de vie des membranes dépend fortement des conditions d'utilisation. Etant donné le peu de recul dont nous disposons à ce jour, il est très difficile d'établir une durée de vie moyenne des membranes synthétiques. Cependant, dans toutes nos études de faisabilité, le coût du remplacement se base sur la durée de la garantie offerte par le constructeur, ce qui est une option pessimiste. [84]

II.13. Modules d'osmose inverse :

II.13.1.Définition des modules :

Les appareils unitaires de séparation, mettant en œuvre des membranes, sont appelés « cartouches » ou « modules ». Leur conception est différente suivant la forme de la membrane et doit, à la fois, assurer une circulation suffisante à la surface de celle-ci et présenter une bonne compacité. Ils sont aussi conçus en fonction de l'application à venir et doivent satisfaire aux facilités d'exploitation (montage, démontage, nettoyage).[85]

II.13.2. Les types de modules :

Il y a quatre différents types de modules d'osmose inverse, qui sont utilisés pour les procédés d'osmose inverse, principalement des procédés de dessalination. Il y a les modules tubulaires, plans, spirales, et fibres creuses.[83]

- ✓ **Les modules tubulaires** : technologie simple, facile d'utilisation et de nettoyage, grands consommateurs d'énergie pour une très faible surface d'échange par unité de volume (compacité réduite)

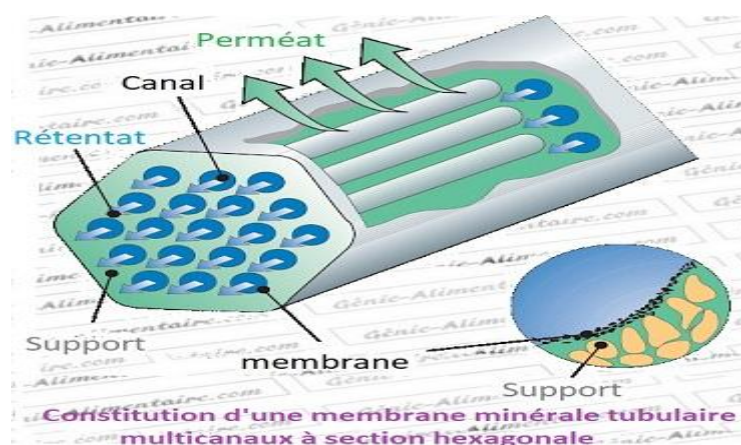


Figure (II.14): Module à membrane tubulaire.[87]

- ✓ **Les modules fibres creuses** : faisceau de fibres creuses de diamètre inférieur au micromètre, forte densité d'écoulement par module.
 - Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :
 - **Configuration Int-Ext** : comme c'est le cas pour les modules tubulaires, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres .
 - **Configuration Ext-Int** : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.

- ✓ **Les modules plans** : simples, les membranes sont empilées en mille-feuilles séparés par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides.[83]

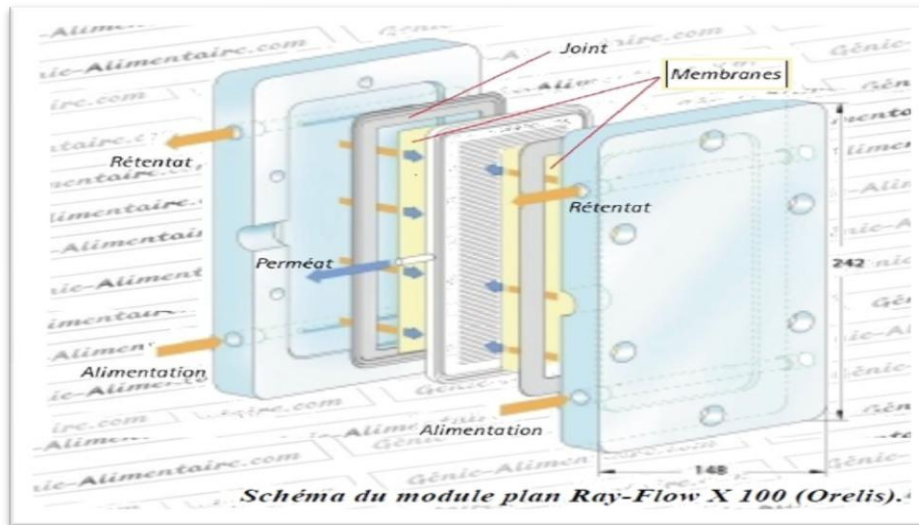


Figure (II.15): schéma de module plan.[101]

- ✓ **Modules spiralés** : Les coûts du système pour le traitement de l'eau minérale sont les mêmes pour les modules spiralés que pour les modules fibres creuses. Les coûts de prétraitement pour la purification des eaux de surface sont plus élevés quand on utilise des membranes fibres creuses, car elles sont plus sensibles à l'encrassement.

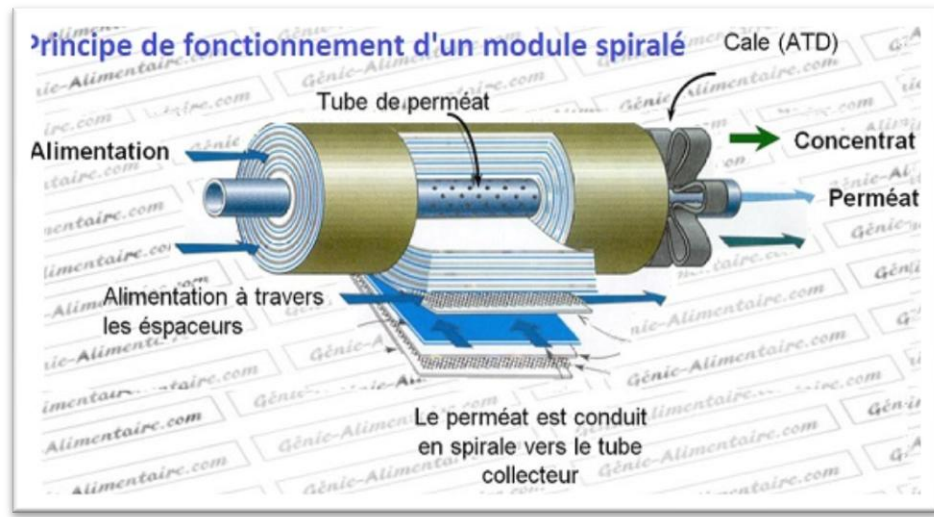


Figure (II.16): Description d'un module spiralé d'osmose inverse. [88]

II.14.Limitation de l'osmose inverse :

II.14.1.Définition du colmatage :

Le colmatage peut être défini comme l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques, se produisant à l'interface

membrane-solution ou dans le volume poreux, dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité. [89]

II.14.2.Les types de colmatage :

Dans le cas de l'OI, le phénomène de colmatage peut être classifié en 4 catégories suivantes:

➤ **Colmatage par entartrage :**

L'entartrage sur une membrane est principalement causé par : le dépassement de la limite de solubilité des composants inorganiques .

➤ **Colmatage par dépôt :**Le colmatage d'une membrane peut résulter soit de l'obstruction des pores à l'intérieur même de la membrane (blocage des pores), soit d'un dépôt de matières en surface de la membrane par convection.

➤ **Le blocage des pores :** Il s'agit de la pénétration et du blocage, partiel ou total, des pores de la membrane par des particules sur lesquelles des composés peuvent être adsorbés. (37) .

➤ **Colmatage par dépôt de matières par convection :** La présence de particules dans les fluides peut conduire au simple dépôt de ces particules à la surface de la membrane, pour peu que leur taille soit supérieure ou égale à la taille des pores de la membrane. [90]

➤ **SDI (Silt Density Index):**Le SDI est considéré comme un paramètre représentatif du potentiel de colmatage d'une eau saline d'alimentation dans un procédé d'OI. Il dépend de la quantité de particules mais également des autres composants colloïdaux.

$$SDI = \frac{(1 - t_1/t_2) \times 100}{t} \quad (8)$$

Avec :

SDI : Silt Density Index (% min⁻¹).

t₁ : temps initial pour filtrer un échantillon de 500 mL (sec) .

t : temps après le départ de la mesure (min).

t₂: temps pour filtrer un échantillon de 500 ml après le temps t (sec).

Le SDI₁₅ (t = 15 minutes) est défini comme le temps nécessaire pour des essais précis et normalisés.

Le SDI doit être inférieur à 5 pour l'OI. L'utilisation du SDI est largement répandue dans le dessalement. [91]

- **MFI (Modified Fouling Index):** Il s'agit ici de décomposer la filtration en trois étapes intervenant successivement : blocage de pores, formation d'un gâteau incompressible et formation d'un gâteau compressible. Pour une filtration frontale à pression constante, la formation d'un gâteau incompressible conduit à une relation linéaire entre t/V et V . [92]

Avec :

$$MFI = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \times \tan \alpha \quad (9)$$

μ_{20} : Viscosité de l'eau à la température 20°C (Pa.s).

μ_T : Viscosité de l'eau à la température de la solution (Pa.s).

ΔP : Pression Transmembranaire appliquée (kPa).

ΔP_0 : Pression Transmembranaire à 210 kPa (Référence).

$\tan \alpha$: Pente de la partie linéaire de la courbe de $t/V=f(V)$

Pour un fonctionnement satisfaisant de l'OI, le MFI recommandé est situé entre 0 et 2 s/L².

En pratique, dans les usines d'osmose inverse, le MFI ne peut pas être corrélé avec le colmatage dû aux colloïdes. Ce dernier est certainement lié à la présence de particules colloïdales plus petites que 0,45 µm. Par conséquent, le MFI présente la même limitation dans l'estimation du pouvoir de colmatage que le SDI [92]

- **MFI-UF (Modified Fouling Index by using Ultrafiltration membrane) :** Contrairement aux indicateurs précédents (SDI et MFI_{0,45}), cet indicateur est déterminé à partir d'un test réalisé avec une membrane d'UF donc avec des pores plus fins. Cela vise à mieux caractériser le pouvoir colmatant des eaux qui contiennent des colloïdes assez fins pour passer à travers une membrane dont la porosité est de 0,45 µm. [93]

Le MFI-UF est défini comme le MFI :

Avec :

S : Surface de la membrane (m²).

S_0 : Surface de la membrane du test de MFI (17,34X10⁻⁴, m²).

Les valeurs de MFI-UF se situent de 2 000 à 13 300 s. L⁻²

II.15. Les avantages et les inconvénients d'osmose inverse :

II.15.1. Les avantages :

- le système peut se débarrasser de la rouille et les débris microscopiques.
- il peut également filtrer le cuivre, le fer, le manganèse et le sel, ainsi que d'autres minéraux nocifs.
- également des produits chimiques comme le fluorure et le chlore peuvent être enlevés.
- les bactéries ne peuvent pas passer à travers les filtres.
- le système d'osmose inverse ne gaspille pas autant d'eau, par rapport à d'autres systèmes de filtration.
- l'eau résultant de la filtration est traitée et devient plus efficace contre les taches.
- l'eau devient potable et vous pouvez économiser de l'argent sur l'eau embouteillée.[94]

II.15. 2. Les inconvénients:

- certains minéraux alcalins bénéfiques sont également supprimés ainsi que d'autres minéraux nocifs, ce qui rend l'eau plus acide.
- eau potable qui a une plus faible ou nulle teneur alcaline absorbe le calcium et autres minéraux de votre corps.
- aussi l'eau peut devenir très acide et de corroder les tuyaux et autres appareils du réseau d'eau.
- pour chaque 1 gallon d'eau produite à partir de l'osmose inverse, 3 à 5 gallons sont gaspillés. Cette rend le processus un peu cher.
- le processus est assez lent, un système de production de 15 gallons par jour.
- membranes de filtration doit être remplacée de temps en temps, en ajoutant aux coûts.
- le processus d'installation est assez compliqué et a besoin d'aide professionnelle.
- pour un usage domestique, le système d'osmose inverse devient inefficace et non-pratique.[94]

II.16. Les applications de l'osmose inverse :

- L'objectif des stations de RO installées est distribué de la manière suivante:
- 50 % en dessalement d'eau de mer et d'eau salubre .
- 40% dans la production d'eau ultra pure pour les industries électronique, pharmaceutique et de production d'énergie

- 10 % en tant que systèmes de décontamination des eaux urbaines et industrielles. [95]

✓ *Dessalement des eaux salubres :*

La salinité de ce type d'eaux est de 2000 mg/L – 10000 mg/L. Pour son traitement on utilise des pressions de 14 bar – 21 bar afin d'obtenir des coefficients de rejet supérieurs à 90 % et à obtenir des eaux avec des concentrations salines inférieures à 500 mg/L, qui sont les valeurs recommandées par WHO comme condition de potabilité.

Les stations de traitement des eaux salubres utilisent des modules de membranes enroulées en spirale. On estime que les coûts de capital de ce type de stations sont de l'ordre de 0.25 \$US/L d'eau traitée par jour, les coûts d'exploitation étant du même ordre.

✓ *Dessalement de l'eau de mer :*

En fonction de la zone géographique, la salinité de ce type d'eaux est de 30000 mg/L – 40000 mg/L. Pour obtenir des conditions de potabilité, on utilise des membranes en polyamide de type fibre creuse qui permettent d'obtenir des coefficients de rejet supérieurs à 99.3 % avec des pressions de travail de 50 bar – 70 bar.

Les coûts d'exploitation de ce type de stations de traitement sont estimés à 1 – 1.25\$US/ L d'eau traitée/jour, ce qui rend ce système de traitement non compétitif, comparé à d'autres systèmes comme les processus d'évaporation multi-étape, si les besoins en eau dépassent les 40 000 m³ d'eau traitée/jour.[95]

✓ *Obtenir de l'eau ultra pure :*

Ce type d'eau est caractéristique de l'industrie électronique. De la performance de la RO dans l'eau de la consommation quotidienne, vous obtenez le résultat souhaité, l'eau ultra pure. En outre, des systèmes de stérilisation par rayonnement UV doivent être installés pour empêcher le bioencrassement des membranes d'actionneur.

✓ *Le dessalement des eaux saumâtres :*

L'objectif de ce processus est d'obtenir de l'eau avec une concentration saline de moins de 500 mg/L, quantité recommandée pour avoir l'état d'eau potable. comment? En appliquant des pressions entre la barre 14-21, il est destiné à atteindre des coefficients de rejet supérieurs à 90%. Les usines de traitement de l'eau saumâtre ont des coûts élevés, de sorte qu'elles ne sont pas actuellement considérées comme aussi compétitives que les autres systèmes.

✓ *Traitement des eaux usées :*

Cette application de la RO est limitée par les coûts élevés d'exploitation à cause des problèmes d'encrassement des membranes.

Dans le cas des eaux usées industrielles, la RO est utilisée dans les industries où il est possible d'améliorer l'économie du processus grâce à la récupération de composants de valeur qui puissent être recyclés dans le processus de production: industries de galvanoplastie et de peinture de structures métalliques, ou lorsque la réutilisation de l'eau traitée signifie une réduction importante de la consommation de l'eau, comme dans l'industrie textile.

Dans le cas des eaux urbaines, la RO est un traitement qui serait indiqué en tant que traitement tertiaire, car il est possible d'obtenir de l'eau avec une qualité qui la rendrait apte à la consommation, avec un coût de 0.5 – 0.75 \$US/m³.**[95]**

➤ *D'autres applications :*

Industrie alimentaire, pharmaceutique et similaires :

Dans les industries alimentaires, pharmaceutique, médicale, cosmétique, chimique, électronique, biotechnologique, etc. on utilise de l'eau d'osmose car pour une grande variété de processus, il est nécessaire de disposer d'une eau de grande qualité ou ultra pure. L'eau d'osmose est le point de départ pour l'obtention d'eau ultra pure.

Traitement pour chaudière :

Le traitement de l'eau de la chaudière est utilisé pour contrôler l'alcalinité, empêcher la formation de tartre, corriger le pH et contrôler la conductivité. L'eau de la chaudière doit être alcaline et non acide, de sorte qu'elle ne gâche pas les tubes. **[96]**

Le traitement et le conditionnement de l'eau d'alimentation de chaudière doit satisfaire trois objectifs principaux:

- L'échange continu de chaleur
- La protection à la corrosion

- La production de haute qualité de vapeur. [97]

Traitement pour eau de refroidissement :

L'eau de refroidissement est indispensable dans les applications techniques. Que ce soit pour la climatisation, le refroidissement des moteurs et des processus ou bien au niveau des échangeurs de chaleur. L'eau de refroidissement est traitée dans la tour de refroidissement. Ensuite elle est pompée à travers une boucle d'eau de refroidissement vers les consommateurs. Normalement, ces consommateurs sont des échangeurs de chaleur. Pour que ces parties du système d'eau de refroidissement fonctionnent parfaitement ensemble, il est nécessaire de traiter l'eau correctement.

Lorsque les conditions physiques d'un fluide varient, par exemple un changement de température ou de pression, les substances chimiques contenues altèrent leur comportement. Pour un bon traitement de l'eau de refroidissement, il est essentiel de savoir comment l'eau et ces substances étrangères se comportent dans différentes conditions.

Lorsque l'eau s'évapore, les substances étrangères telles que le calcium ou le magnésium ne peuvent pas s'évaporer. Celles-ci restent dans l'eau restante. Avec le temps, l'eau de refroidissement contient plus de solides qui finissent par se déposer et former du calcaire. Ces dépôts peuvent obstruer les tuyaux et les machines et entraîner d'énormes coûts de nettoyage. Ainsi, pour éviter ceci, un traitement de l'eau de refroidissement de l'ensemble de l'installation est nécessaire. [98]

Nos produits de traitement des eaux sont innovants et hautement efficaces pour,

- La protection contre la corrosion
- La stabilisation des phosphates
- Le contrôle de sédiments et des dépôts
- Contre la prolifération bactérienne et la formation d'algues [99,100]

II.17. Conclusion :

Les membranes couramment employées sont asymétriques, constituées de feuilles plates en acétate de cellulose, de fibres creuses en polyamide aromatique ou d'un film mince composite ou une couche extrêmement fine de polymère très hydrophobe est placé sur un support microporeux usuellement fait en poly sulfone.

Les performances d'un module d'osmose inverse sont non seulement déterminées par la structure de la membrane mais aussi par la nature et la concentration des solutés à séparer qui déterminent, en fonction de la pression osmotique, la pression à appliquer. De plus, il faut veiller à la température et au pH. Le rendement est déterminé par la quantité de fluide traversant la membrane par rapport à la quantité pompée en direction du système.

La plus commune des utilisations pour l'osmose inverse est dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Le but est de supprimer les sels dissous et les matières organiques de l'eau. A cause de la forte pression osmotique de ces solutions, les unités d'osmose inverse doivent fréquemment opérer à forte pression (jusqu'à 70 bars).

Chapitre III :

Modélisation et Simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer.

III. Introduction :

La simulation des procédés est une représentation d'un processus chimique par un modèle mathématique, qui est ensuite résolu pour obtenir des informations sur les performances du procédé. Le logiciel de simulation des procédés décrit les processus à travers des diagrammes de flux dans lesquels les opérations unitaires sont positionnées et connectées par des flux de produits.

L'objectif de la simulation des procédés est de prédire comment un procédé défini se comporterait réellement dans un ensemble donné de conditions de fonctionnement, et ainsi de trouver les conditions optimales pour un procédé examiné. Il s'agit essentiellement d'un problème d'optimisation qui doit être résolu par un processus itératif. La conception des procédés en utilisant les logiciels de simulation permet, entre autres, d'accroître l'efficacité des usines et de réduire leur impact environnemental..[101]



*Figure (III.1):*Logiciel de simulation .[101]

III.1. L'objectif du Chapitre:

1. Introduire la simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer .
2. Citer les différents logiciels de conception .
3. Définir le logiciel utilisé Wave (Water application value engine) logiciel de conception multi-technologies .
4. Générer les systèmes de l'osmose inverse et l'équilibrage du flux
5. Examiner comment nous pouvons équilibrer le flux entre l'intérieur d'un récipient sous pression .

III.2. La simulation des procédés :

Est la représentation d'un processus chimique par un modèle mathématique, qui est ensuite résolu pour obtenir des informations sur les performances des procédés chimiques. [102].

III.3. La modélisation:

Les modèles thermodynamiques décrivent le comportement de systèmes matériels choisis à partir des bases de données.

Une des principales finalités de ces modèles est d'être employés dans la simulation de procédés au sein de modèles d'opérations unitaires qui font appel aux modèles d'équilibre entre phases. Toutes ces équations forment des systèmes d'équations non linéaires algébriques qui sont résolus par des méthodes numériques. [103]

III.4. Logiciels de conception des Techniques de dessalement :

Le dessalement par osmose inverse est aujourd'hui la technologie privilégiée de dessalement grâce à son coût compétitif et son rendement impressionnant de dessalement des eaux les plus salées. Il existe plusieurs logiciels sur le marché de conception du système de dessalement membranaire, [104]

III.4.1. logiciel IMSDesign :

Est un logiciel de conception complet qui permet à l'utilisateur de concevoir un système membranaire à l'aide des membranes Hydranautics. [105]

III.4.2. ROSA :

Est un outil utilisé pour estimer les performances stabilisées d'un système RO ou NF spécifique dans des conditions de conception ou réelles. Cette performance projetée est basée sur une spécification de performance nominale pour le ou les éléments FILMTECTM utilisés dans ce système. [106]

III.4.3. Wave (Water application value engine),

C'est un logiciel de conception multi-technologies qui permet de réduire le temps nécessaire pour concevoir des systèmes de traitement d'eau, augmenter la productivité et optimiser les performances des systèmes. Ce nouveau logiciel permet de définir, réinitialiser et calculer les conceptions d'installations en quelques clics. [107]

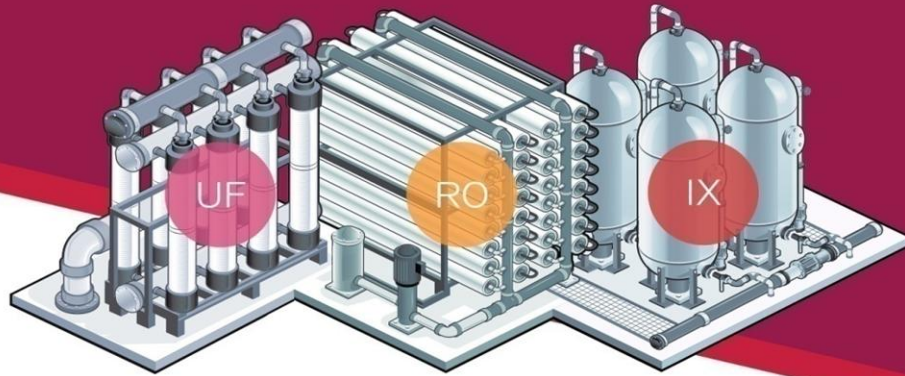


Figure (III.2): Logo de Wave software. [108]

III.4.3.1. Ses caractéristiques :

- Wave estime les performances des technologies d'ultrafiltration, d'osmose inverse et d'échange d'ions dans les systèmes de traitement d'eau, individuellement ou dans diverses combinaisons multi-technologiques.
- Ce nouvel outil permettra aux ingénieurs du monde entier de concevoir des solutions différenciées et optimisées plus rapidement et précisément.
- Le logiciel calcule par exemple des algorithmes améliorés et homogènes et des données harmonisées, ainsi qu'une estimation des coûts d'élimination des produits chimiques, de l'électricité, de l'eau d'alimentation et des eaux usées pour permettre aux clients d'adopter des solutions plus durables et moins coûteuses.
- le logiciel fournit des informations techniques détaillées comme les volumes et les flux de bilan massique réels qui reflètent les changements de densité dus à la température, la composition de l'eau et la compressibilité de l'eau.
- Version actualisée de l'ancien logiciel de Dow, ce logiciel optimisé comprend le logiciel Rosa et permet de regrouper plusieurs technologies dans une interface commune. [108]

Three technologies. One tool.



WAVE DESIGN SOFTWARE

Figure (III.3): conception multiprocessus combinant UF , RO et échanges d'ions .[108]

- Lun des uniques caractéristique de Wave sont la capacité de générer une conception multiprocessus combinant UF ultrafiltration , RO Osmose inverse et échanges d'ions .
- Quelques fonctionnalités de conception avancée :
 1. Conception a lit Mixte UF , RO et échange d'ions.
 2. Conception Des systèmes d'osmose inverse .

Notes :(UF)L'ultrafiltration est un système de filtration de l'eau basé sur une méthode de séparation membranaire de l'eau et des particules. L'eau circule à travers des membranes qui retiennent les particules et les résidus en fonction de leur taille et de leur poids. Ce système ne permet donc de retenir qu'un certain nombre d'impuretés. L'ultrafiltration permet toutefois d'obtenir une eau plus pure et peut être utilisée dans le cadre de la production d'eau potable, en complément d'autres systèmes de purification.

III.5. Conception du système d'osmose inverse :

Dans les systèmes D'osmose inverse et l'équilibrage du flux :

- On va générer un cas d'osmose inverse de l'eau de mer.
- On examine comment nous pouvons équilibrer le flux entre l'intérieur d'un récipient sous pression.
- On introduit la fonctionnalité de conception avancée :



Figure (III.4): design de logiciel wave .[108]

III .5.1 .Les étapes de la simulation:

1. Préciser les unités .

On va choisir les unités internationales et non pas les unités de mesure américaines pour faciliter l'opération .

Chapitre III : Modélisation et Simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer.

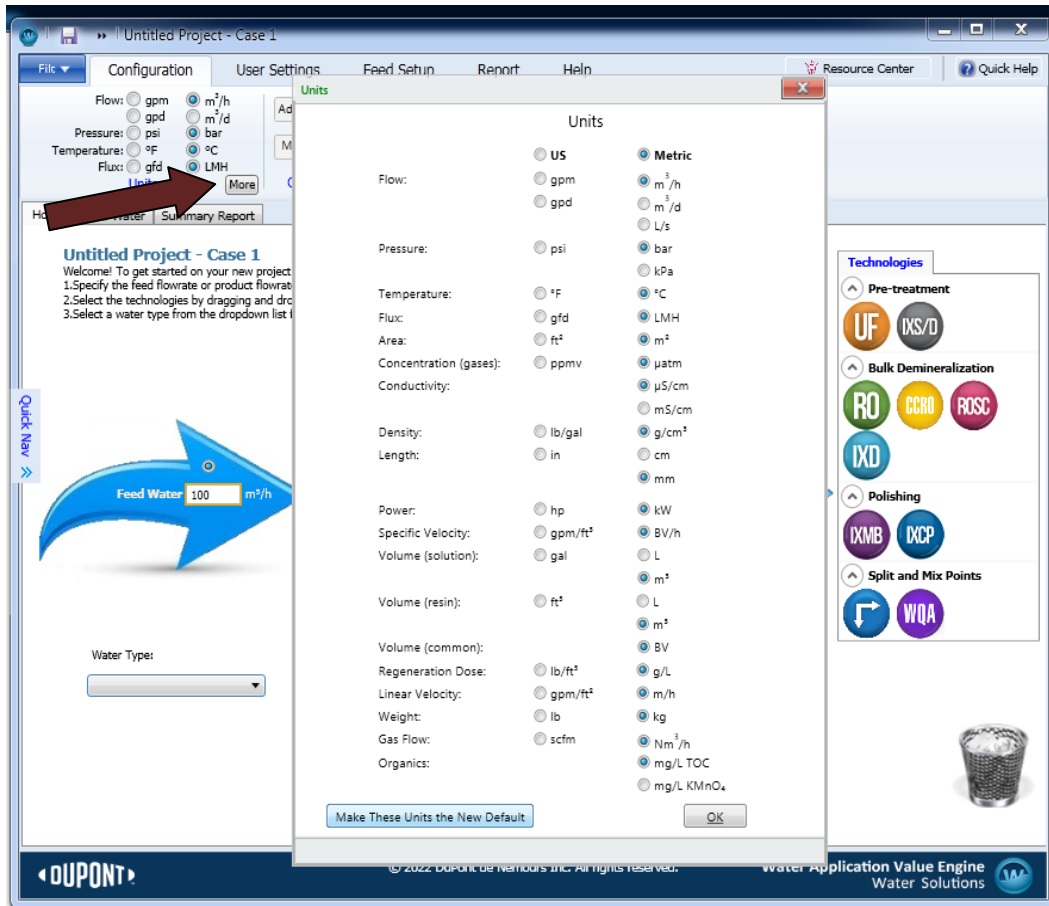


Figure (III.5) : La barre des unités .

2. Déposer l'icône de la technologie (RO) Cas d'osmose inverse .

On deposelicone de la technologie dosmose inverse

3. Introduire la valeur du flux d'entrée 1000 m³ /h .

Le débit est de 1000 m³/h .

Chapitre III : Modélisation et Simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer.

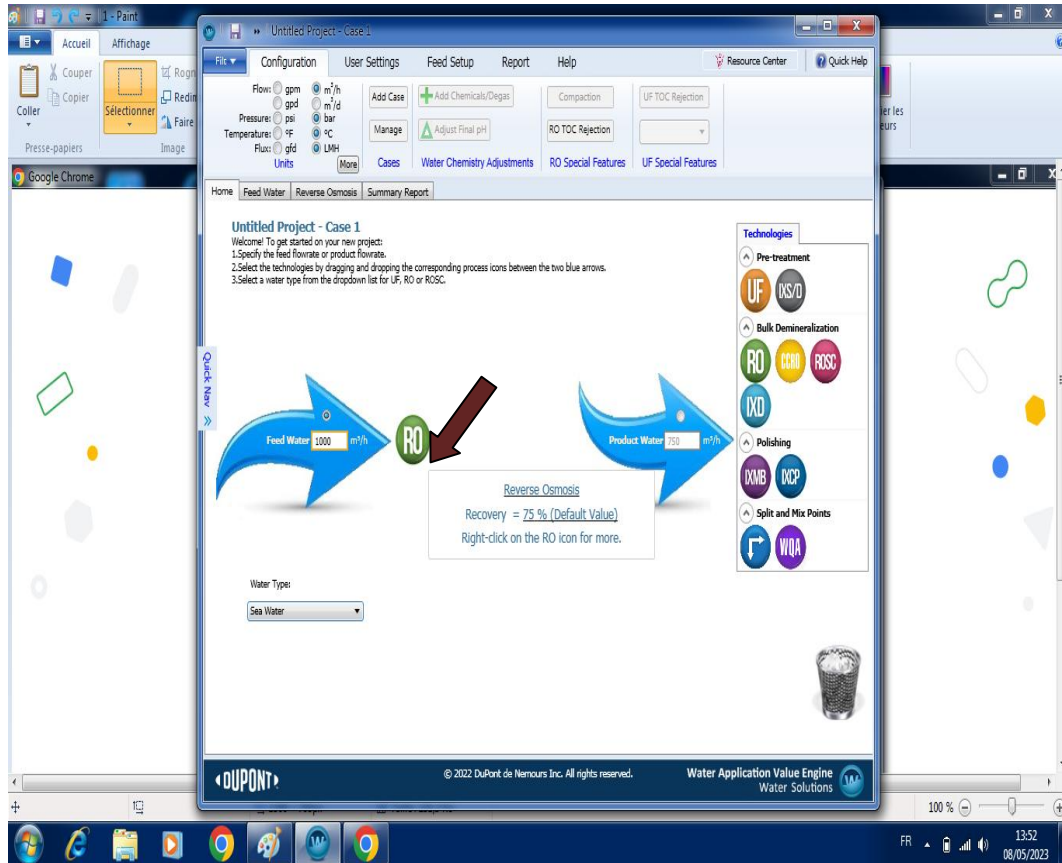


Figure (III.6): Dépôt de l'icône RO.

4. Passer a (OPEN WATER LIBRARY) , Changer dans une eau de mer standards ,
A (OPEN WATER LIBRARY) on va choisir le type de l'eau de mer avec des références standards .

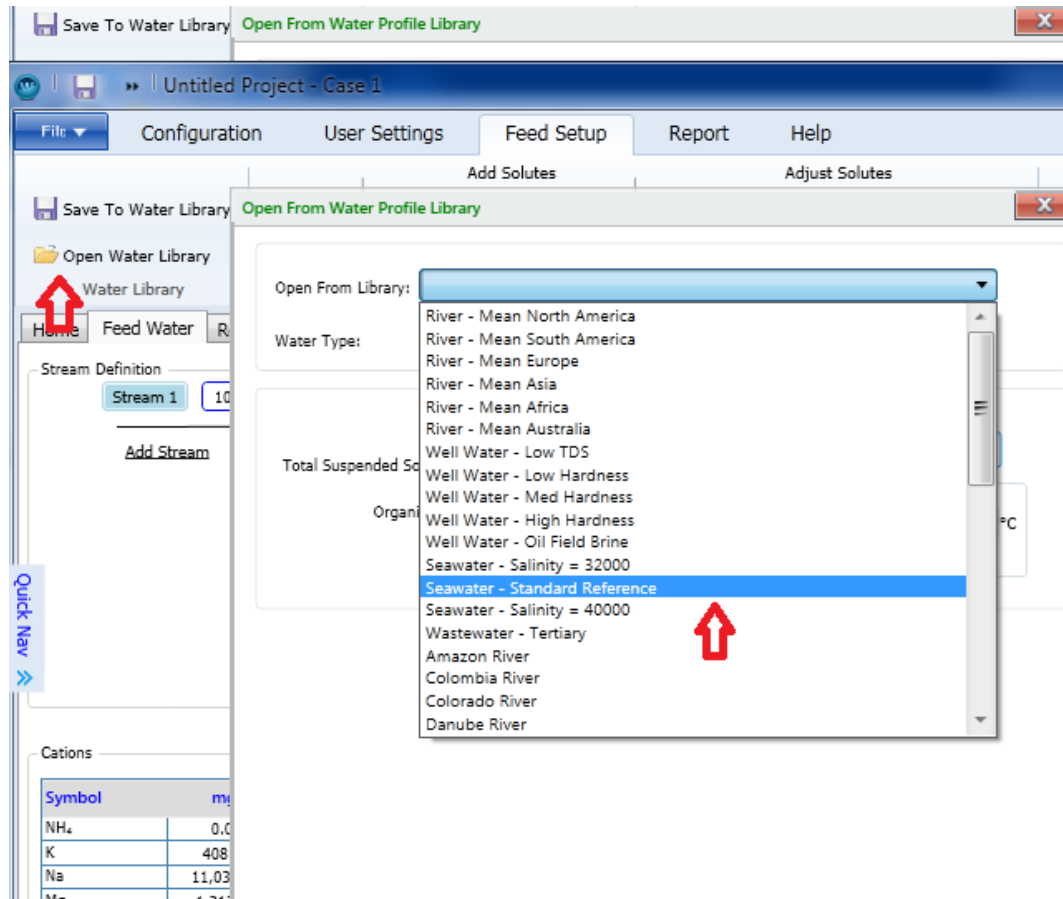


Figure (III.7):le type de l'eau de mer .

Remarque : Le perméat d'osmose inverse n'est pas inclus en tant que type d'eau car il est peu probable que le perméat d'osmose inverse nécessite un traitement UF (ultrafiltration). En fonction des valeurs introduites dans la caractérisation de l'eau, WAVE donne déjà le sous-type d'eau recommandé.

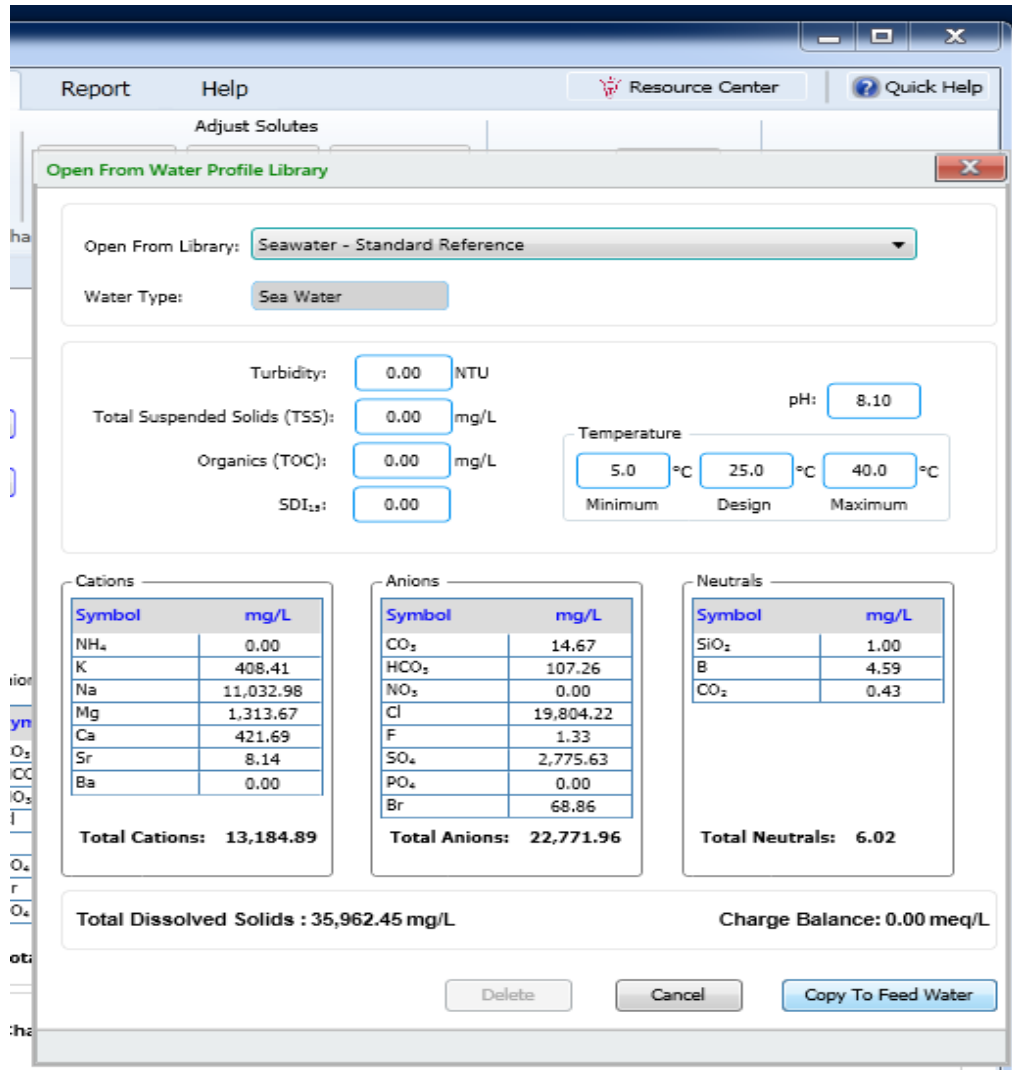


Figure (III.8): Les valeurs de la salinité .

1. Remarque : Après avoir précisé le type et le sous type (Membrane traitement SDI inférieur a3), Les valeurs ont été défini par défaut .

Chapitre III : Modélisation et Simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer.

The screenshot shows the 'Feed Water - Seawater - Standard Reference' configuration screen. The 'Water Type' is set to 'Sea Water' and the 'Water Sub-type' is 'Membrane pretreatment, SDI < 3'. The 'Temperature' section shows a design temperature of 25.0°C. The 'Organic Content' section shows a TOC of 0.00 mg/L. The 'Additional Feed Water Information' section is empty. The 'Cations' table shows a total of 13,184.890 mg/L and 619.681 meq/L. The 'Anions' table shows a total of 22,771.960 mg/L and 619.575 meq/L. The 'Neutrals' table shows a total of 6.024 mg/L. The 'Total Dissolved Solids' is 35,962.512 mg/L, the 'Charge Balance' is 0.000000 meq/L, and the 'Estimated Conductivity' is 53,422.79 µS/cm.

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
NH ₄	0.000	0.000	0.000
K	408.410	522.742	10.446
Na	11,032.981	24,016.307	479.908
Mg	1,313.669	5,409.647	108.099
Ca	421.694	1,053.100	21.044
Sr	8.135	9.293	0.186
Ba	0.000	0.000	0.000
Total Cations:	13,184.890		619.681

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
CO ₂	14.675	24.475	0.489
HCO ₃	107.255	87.966	1.758
NO ₂	0.000	0.000	0.000
Cl	19,804.216	27,954.832	558.610
F	1.330	3.504	0.070
SO ₄	2,775.629	2,891.886	57.787
Br	68.855	43.124	0.862
PO ₄	0.000	0.000	0.000
Total Anions:	22,771.960		619.575

Symbol	mg/L
SiO ₂	1.000
B	4.594
CO ₂	0.430
Total Neutrals:	6.024

Total Dissolved Solids : 35,962.512 mg/L Charge Balance: 0.000000 meq/L Estimated Conductivity: 53,422.79 µS/cm

Figure (III.9): l'entrée de feedwater .

5. Passer aux entrées RO (osmose inverse) .

On passe de l'entrée **feed water** a **reverse osmosis** pour introduire les autres paramètres .

6. On peut préparer une conception étagée en interne donc dans un récipient sous pression il est généralement courant d'utiliser le même élément dans toutes les positions.

Chapitre III : Modélisation et Simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer.

	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4	Element 5	Element 6	Element 7
Product:	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440
Active Area:	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)
Max. Pressure:	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)
Flow:	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)
Salt Rejection (%):	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80
Boron Rejection (%):	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5
Salt:	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl
Test Pressure:	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)
Concentration:	32000	32000	32000	32000	32000	32000	32000
Recovery (%):	8	8	8	8	8	8	8
Diameter:	8	8	8	8	8	8	8

Active Area units: square feet (square meters)
Pressure unit: psi (bar)
Flow unit: gallons per day (cubic meters per day)

Figure (III.10): Tableau des éléments de la membrane choisi.

IMPORTANT : Au long du récipient sous pression , la pression osmotique augmente , il y a une chute de pression due au débit dans les canaux d'alimentation et de saumure , donc il y a moins de pression d'alimentation disponible dans les éléments de queue et une pression osmotique plus élevée de sorte qu'ils finissent par être beaucoup moins productifs .

7. La majeure partie due de la conception :

- passer à l'endroit où on peut spécifier un élément des options ,
- On fait apparaître cette autre petite fenêtre contextuelle , en principe on peut spécifier un élément différent pour chaque position dans le navire .
- Dans ce cas , nous allons utiliser le même élément, puis automatiquement le tableau va être rempli à droite .

Chapitre III : Modélisation et Simulation des systèmes de dessalement de l'eau de mer.

Element Configuration - Internally Staged Design

	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4	Element 5	Element 6	Element 7
Product:	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440	SW30XLE-440
Active Area:	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)	440 (40.9)
Max. Press:	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)
Flow:	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)	9,900 (37.5)
Salt Rejection (%):	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80
Boron Rejection (%):	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5
Salt:	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl
Test Pressure:	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)
Concentration:	32000	32000	32000	32000	32000	32000	32000
Recovery (%):	8	8	8	8	8	8	8
Diameter:	8	8	8	8	8	8	8

Active Area units: square feet (square meters)
 Pressure unit: psi (bar)
 Flow unit: gallons per day (cubic meters per day)

Figure (III.11): Tableau des éléments .

8. Spécifier les éléments de la membrane dans les deux étages :
 Dans ce cas , nous allons utiliser le même élément dans les deux étages .
 (stage 1 & stage 2)
 L'élément utilisée est SW30XLE-440i .

Reverse Osmosis Pass Configuration

Configuration for Pass 1

Number of Stages: 1 2 3 4 5

Flow Factor:

Temperature: Design °C

Pass Permeate Back Pressure: bar

Flows

Feed Flow: m³/h

Recovery: %

Permeate Flow: m³/h

Flux: LMH

Conc. Recycle Flow: m³/h

Bypass Flow: m³/h

	Stage 1	Stage 2
# PV per stage	32	12
# Els per PV	7	7
Element Type	SW30XLE-440i	SW30XLE-440i
Specs		
Total Els per Stage	224	84
Pre-stage ΔP (bar)	0.31	0.20
Stage Back Press (bar)	0.00	0.00
Boost Press (bar)	N/A	0
Feed Press (bar)	80	N/A
% Conc to Feed	0.00	0.00
Flow Factor	0.85	0.85

System Configuration

Feed → [Membrane] → Concentrate (red arrow) and Permeate (blue arrow)

Figure (III.12):entrée Osmose inverse .

- On tape sur (Summaryreport) , Calculating report et les résultats seront affichés Sur l'écran .

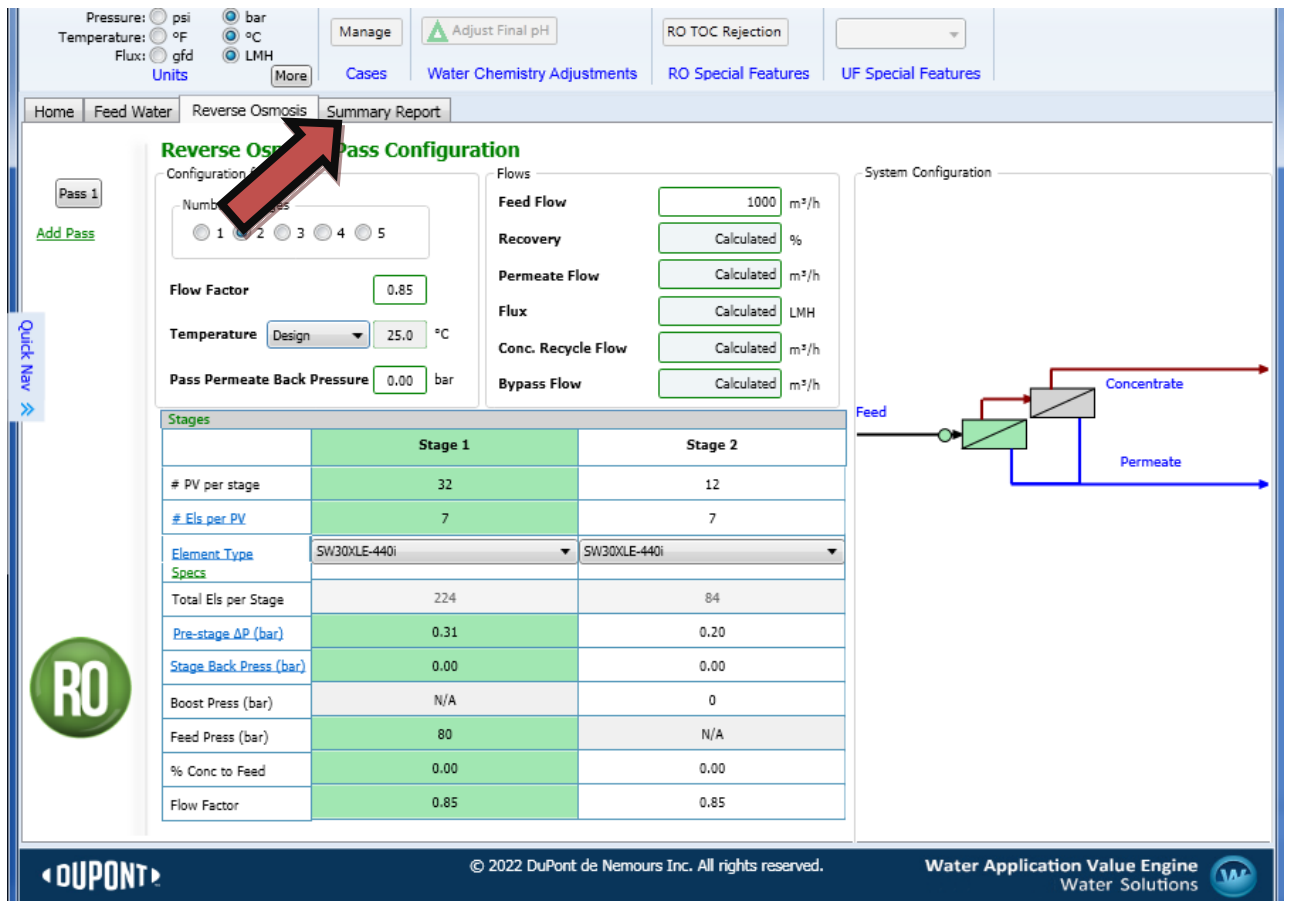


Figure (III.13): report affichage des résultats .

III.6. Conclusion :

Le traitement de l'eau nécessite souvent plus d'une technologie pour atteindre la qualité souhaitée. La plupart des logiciels de conception d'usines de traitement de l'eau ne vous permettent pas d'optimiser les systèmes à technologies multiples, nécessitant un logiciel séparé et plus de temps pour la configuration et la gestion.

Et Wave a la capacité de générer une conception multiprocessus combinant UF ultrafiltration, RO Osmose inverse et échanges d'ions.

On a généré une conception d'osmose inverse RO avec un prétraitement conventionnelle et on a montré les étapes de la simulation.

Chapitre IV :

Interprétation Des Résultats.

Introduction :

Cette simulation montre des résultats de ratios de production d'eau potable dans une unité de dessalement de l'eau de mer.

WAVE est un logiciel de modélisation expert intégré pour la conception de stations d'épuration, y compris la conception de stations d'épuration, offrant :

Conception flexible utilisant trois technologies, avec des combinaisons de fonctionnement à plusieurs unités, plus la possibilité de spécifier le débit d'alimentation du système ou le débit net du produit.

Un moteur de calcul puissant avec la capacité d'exécuter des conceptions complexes à des niveaux de précision élevés.

Amélioration des calculs et de l'interface de l'équilibre hydrique.

L'objectif :

- Produire une eau potable avec :
 - ✓ Un débit de perméat d'environ 431.9 m³ /h .(Partie I).
 - ✓ Un débit de perméat d'environ 479m³ /h (Partie II) .
 - ✓ Un bon rendement de traitement.
 - ✓ Concentrât du premier RO dirigé vers un deuxième étage.
 - ✓ Introduire une autre partie de simulation en changeant la salinité et la membrane.

- Etude des caractéristiques :
 - ✓ De la membrane d'osmose inverse utilisée .
 - ✓ Une comparaison entre les membranes .
 - ✓ Les différents débits sortants (péméats et concentrâts) de chaque osmoseur.
 - ✓ Evolution des différentes concentrations des concentrâts.
 - ✓ La perméabilité de chaque osmoseur.
 - ✓ Les pressions de chaque osmoseur.

IV. Les résultats :

IV.1. Le système de configuration :

Sur le diagramme suivant on a un double stade RO est lorsque le flux concentré ou de rejet du premier système RO est dirigé vers un deuxième système RO pour récupérer l'eau, respectivement.

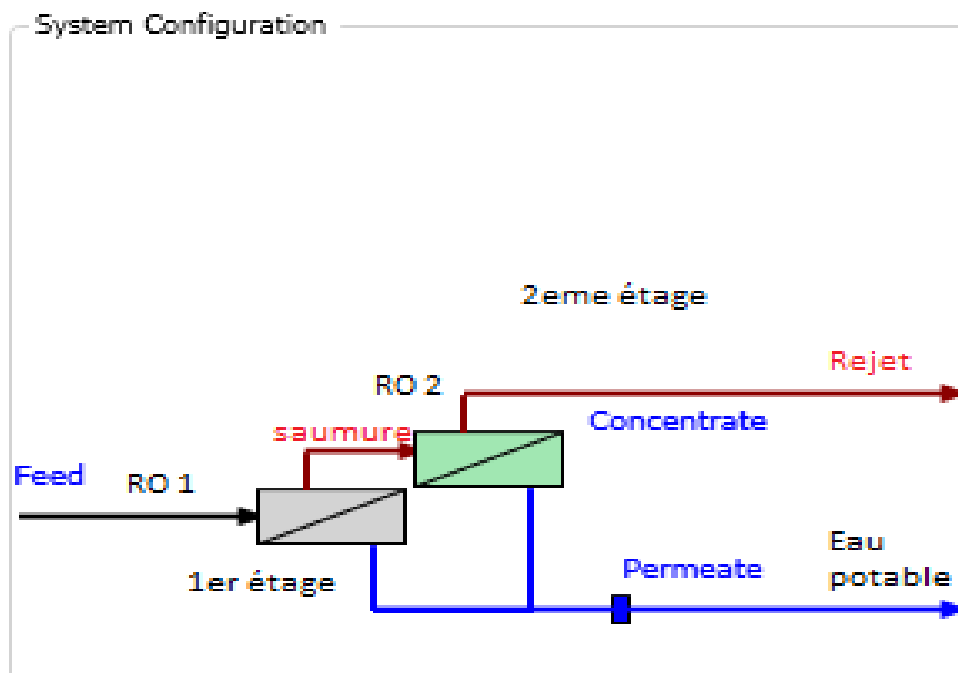


Figure (IV.1): Le système Générale d'un seul passage et deux étages .

IV.2. Le flux du système d'osmose inverse :

➤ Description du tableau suivant :

A l'entrée du système on a un débit de 1000 m³/h c'est l'eau d'alimentation.

Ensuite L'opération d'osmose inverse comprend une haute pression appliquée afin de conduire l'eau à travers des membranes semi-perméables qui rejettent les ions de sel.

Si on a Une récupération plus élevée du système on a plus d'eau produite.

On aura donc, à partir du courant d'eau de mer qui a une plus grande concentration saline, un courant d'eau produit ayant une concentration plus faible (99.7% de sels retenus par cette membrane) qui est le perméat avec un taux de 43.2 % (quotient entre le débit d'eau

produite et le débit d'eau d'alimentation). Un autre courant de rejet, la saumure, avec une teneur en sels bien supérieure à celle du courant d'alimentation.

RO Summary Report

RO System Flow Diagram

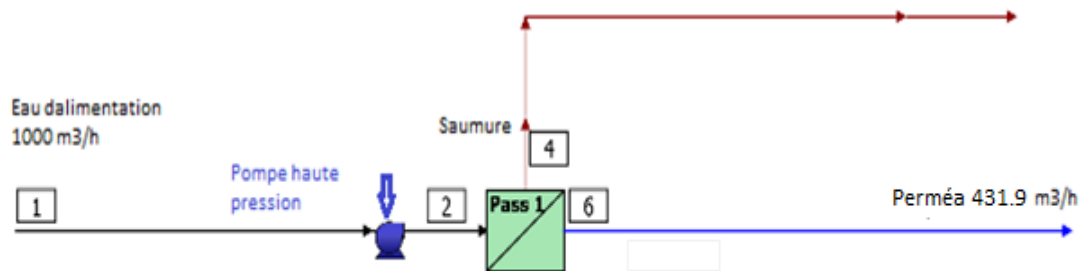


Figure (IV.2): Diagramme de flux.

➤ Description du system :

- ❖ Débit d'entrée: 1000 m3/h .
 - ❖ Pression appliqué: 80 bars .
 - ❖ Récupération: 43.2 %.
 - ❖ Débit de perméa : 431.9 m3/h.
 - ❖ Rejet : 567.3 m3/h .
- On a un débit d'entrée de 1000 m3/h , on applique une pompe de haute pression de 80 bars , le débit rente au système d'osmose inverse pour le but d'éliminer les sels donc :
- on a récupéré un flux de 431.9 m3/h qui est le perméa et on a une rejection de 567.3 m3/h du saumure .
- Le TDS diminue dans le flux de perméat et augmente au concentrat .
- La pression de l'alimentation diminue dans chaque élément .

#	Description	Flow (m ³ /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	1,000	35,962	0.0
2	Net Feed to Pass 1	996.7	36,081	80.0
4	Total Concentrate from Pass 1	567.3	63,321	49.4
6	Net Product from RO System	431.9	87.37	0.0

RO System Overview

Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	43.2 %
System Flow Rate	(m ³ /h)	Net Feed =	1,000	Net Product =	431.9		

Tableau(IV.1): Description du système.

IV.3. Un aperçu sur le système d’Osmose inverse:

- ❖ **Nom du flux : Eau de mer – Référence standard --**
- ❖ **Type d'eau Eau de mer : (membrane prétraitement SDI <3) .**
- ❖ **Le total des solides dissous (TDS) :**

Le total des solides dissous, Dans le cas de l’eau de mer, le **TDS** mesure surtout la concentration de sels dissous tels que le chlorure de sodium, le magnésium et le calcium.

- ♦ **NDP est la somme de tous forces agissant sur la membrane.**
- ♦ **Recovery:** c’est le rapport entre le débit du perméat et le débit d'alimentation. Quand le recouvrement augmente, le débit du perméat diminue et stagne si la concentration en sel atteint des valeurs telles que la pression osmotique est égale à la pression de l'alimentation.
- ♦ Recovery 43.2 % ➡ c’est la quantité d'eau qui est « récupérée » comme une bonne eau de perméat. Une autre façon de penser à la récupération est la quantité d'eau qui n'est pas envoyée à l’égout sous forme de concentré, mais plutôt collectée sous forme de perméat ou produit de l'eau.
- ♦ **Plus la récupération est élevée, moins vous envoyez d'eau à l'évacuation car on va économiser plus d'eau de perméat.**

➤ Ce tableau résume tous les paramètres:

Pass		Pass 1
Stream Name		Seawater - Standard Reference
Water Type		Sea Water (Membrane pretreatment, SDI < 3)
Number of Elements		308
Total Active Area	(m ²)	12590
Feed Flow per Pass	(m ³ /h)	996.7
Feed TDS ^a	(mg/L)	36,081
Feed Pressure	(bar)	80.0
Flow Factor Per Stage		0.85, 0.85
Permeate Flow per Pass	(m ³ /h)	431.9
Pass Average flux	(LMH)	34.3
Permeate TDS ^a	(mg/L)	87.37
Pass Recovery		43.3 %
Average NDP	(bar)	34.8
Specific Energy	(kWh/m ³)	6.45
Temperature	(°C)	25.0
—		—
pH		8.1
Chemical Dose		-
RO System Recovery		43.2 %
Net RO System Recovery		43.2%

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B. It does not include NH₃ and CO₂

Tableau(IV.2): Les paramètres généraux.

➤ **La membrane utilisée (SW30XLE-440i Dry) :**

Ces éléments n'ont pas de date d'expiration, ce qui facilite la maintenance de l'entrepôt et la planification des stocks.

Les éléments secs n'ont pas besoin d'être re-conservés tandis que la solution de conservation des éléments humides doit être vérifiée après 12 mois de stockage et éventuellement remplacée. Cette opération est très laborieuse et peut entraîner des coûts élevés.

Chapitre IV : Interprétation Des Résultats.

Des garanties plus attractives. Le temps de stockage autorisé avant le début obligatoire de la garantie a été prolongé de 6 mois.

En raison du poids plus faible et de la faible consommation d'énergie et d'eau lors des tests, les éléments secs sont plus respectueux de l'environnement que les éléments humides, plus précisément les éléments secs représentent une réduction de 20 % des émissions de CO2 par rapport aux éléments humides.

Les éléments secs FilmTec™ SSW30XLE-440i offrent un coût de cycle de vie durablement inférieur pour l'eau d'alimentation à salinité moyenne et élevée en combinant un rejet élevé et une faible performance énergétique avec la zone active la plus élevée et une entretoise d'alimentation épaisse.

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow (m ³ /h)	Recirc Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Boost Press (bar)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Press Drop (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (LMH)	Perm Press (bar)	Perm TDS (mg/L)
1	SW30XLE-440i	32	7	996.7	0.00	79.7	0.0	623.2	71.4	8.3	375.3	41.0	0.0	69.76
2	SW30XLE-440i	12	7	623.3	0.0	71.2	0.0	567.3	49.4	21.9	56.6	16.5	0.0	204.2

Tableau(IV.3): performance de la membrane.

- **Tableau des flux et de concentration :**
- **Les pressions :**

La perte de charge à travers les membranes d'OI est en fonction du nombre d'éléments par tube de pression, **la pression diminue dans les différents éléments de la membrane**, Un courant qui aussi, sort avec la même pression que l'entrée de l'eau dans les membranes, avec une perte de charge. Une perte importante d'énergies, Pour la récupérer on doit exploiter cette énergie pour l'usine, on a mis un système de récupération d'énergie à l'aide d'échangeurs de pression PX.

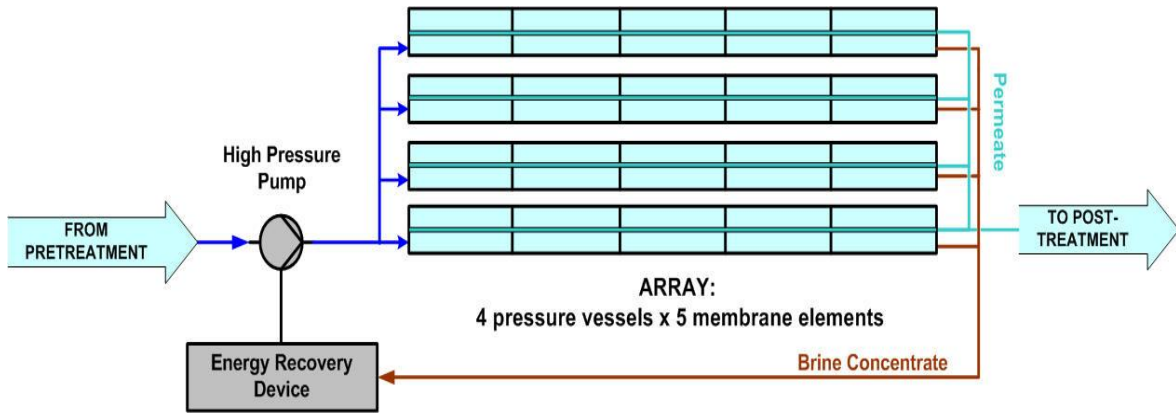


Figure (IV.3): Récupération d'énergie.

Grâce au système de récupération d'énergie, il est possible de réutiliser l'énergie du concentrât. Le concentrât est dirigé vers le système de récupération d'énergie, où il transmet directement son énergie à une partie de l'eau d'alimentation.

➤ **Facteur de concentration :**

Le facteur de concentration est lié à la récupération du système RO et est une équation importante pour RO conception du système. Plus vous récupérez d'eau sous forme de perméat (plus le % de récupération est élevé), et les sels concentrés et les contaminants se collecte vers le flux de concentré donc la concentration du perméat diminue.

Stage	Element	Recovery (%)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Feed TDS (mg/L)	Conc Flow (m ³ /h)	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/L)
1	1	6.9	31.2	79.7	36,080	29.0	2.13	45.39
1	2	6.8	29.0	78.2	38,715	27.1	1.99	51.97
1	3	6.8	27.1	76.8	41,539	25.2	1.83	59.90
1	4	6.7	25.2	75.5	44,539	23.6	1.68	69.58
1	5	6.5	23.6	74.3	47,692	22.0	1.52	81.28
1	6	6.2	22.0	73.3	50,962	20.7	1.36	95.59
1	7	5.9	20.7	72.3	54,303	19.5	1.21	113.2
2	1	2.2	51.9	71.2	57,659	50.8	1.13	119.8
2	2	1.9	50.8	67.9	58,928	49.9	0.97	140.8
2	3	1.6	49.9	64.7	60,062	49.1	0.82	169.0
2	4	1.4	49.1	61.5	61,048	48.4	0.66	208.6
2	5	1.1	48.4	58.4	61,873	47.9	0.52	268.2
2	6	0.8	47.9	55.4	62,528	47.5	0.38	368.3
2	7	0.5	47.5	52.4	63,010	47.3	0.24	569.5

Tableau(IV.4): Tableaux des flux et de pressions.

➤ **Concentrations des sels :**

➤ **Passage de sel :**

C'est simplement l'inverse du rejet de sel C'est la quantité de sels qui passent par le système RO. Plus le passage de sel n'est bas, plus mieux le système fonctionne. Un passage de sel élevé peut signifier que les membranes doivent être nettoyées ou remplacées

% de passage de sel = (1---% de rejet de sel).

- ◆ le traitement d'osmose inverse enlève les solides dissous présents de l'eau de mer donc il est le responsable de la forte concentration de TDS.
- ◆ une diminution du TDS de **32662a87.37** mg/l cela signifie qu'on a une bonne rejection des sels.
- ◆ Le PH La marge acceptable du pH de l'eau potable est comprise entre 6.5 et 8,5.

- ◆ Pour ajuster le pH final à la valeur du pH_s au pos-traitement ; il convient alors d'utiliser Calcite Pour neutraliser jusqu'à un $pH +7$.La **Calcite** est un média filtrant naturel à base de carbonate de calcium. Il corrige le **PH** de l'eau pour atteindre un équilibre non corrosif.
- ◆ La solubilité est définie comme étant quantité maximale de sels dissous dans l'eau , lorsque cette quantité est atteinte, la solution est saturée, et lorsque cette quantité est dépassée, on dit qu'il y a précipitation du soluté .
- ◆ A propos du tableau on voit une saturation cela veut dire qu'il ya pas de précipitations des sels.
 - Pas de précipitations de Ba^{2+} .
 - Pas de précipitations de NO_3^- .
 - Pas de précipitations de SiO_2 .

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ⁺	408.4	654.7	718.8	1.06	3.21	1.35
Na ⁺	11,033	17,688	19,423	24.99	73.33	31.32
Mg ⁺²	1,314	2,107	2,315	0.69	1.94	0.86
Ca ⁺²	421.7	676.5	743.1	0.22	0.62	0.27
Sr ⁺²	8.14	13.05	14.34	0.00	0.01	0.01
Ba ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃ ⁻²	17.21	29.02	32.02	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	104.7	165.8	181.7	0.39	0.96	0.46
NO ₃ ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F ⁻	1.33	2.13	2.34	0.00	0.01	0.00
Cl ⁻	19,804	31,751	34,868	41.17	120.7	51.60
Br ⁻¹	68.85	110.4	121.2	0.21	0.63	0.27
SO ₄ ⁻²	2,776	4,453	4,892	0.59	1.62	0.72
PO ₄ ⁻³	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	1.00	1.60	1.76	0.00	0.01	0.00
Boron	4.59	7.12	7.71	0.42	1.07	0.51
CO ₂	0.42	0.78	0.89	0.48	0.74	0.52
TDS ^a	35,962	57,660	63,321	69.76	204.2	87.37
Cond. μS/cm	53,424	80,752	87,601	147	423	183
pH	8.1	8.0	8.1	6.1	6.3	6.1

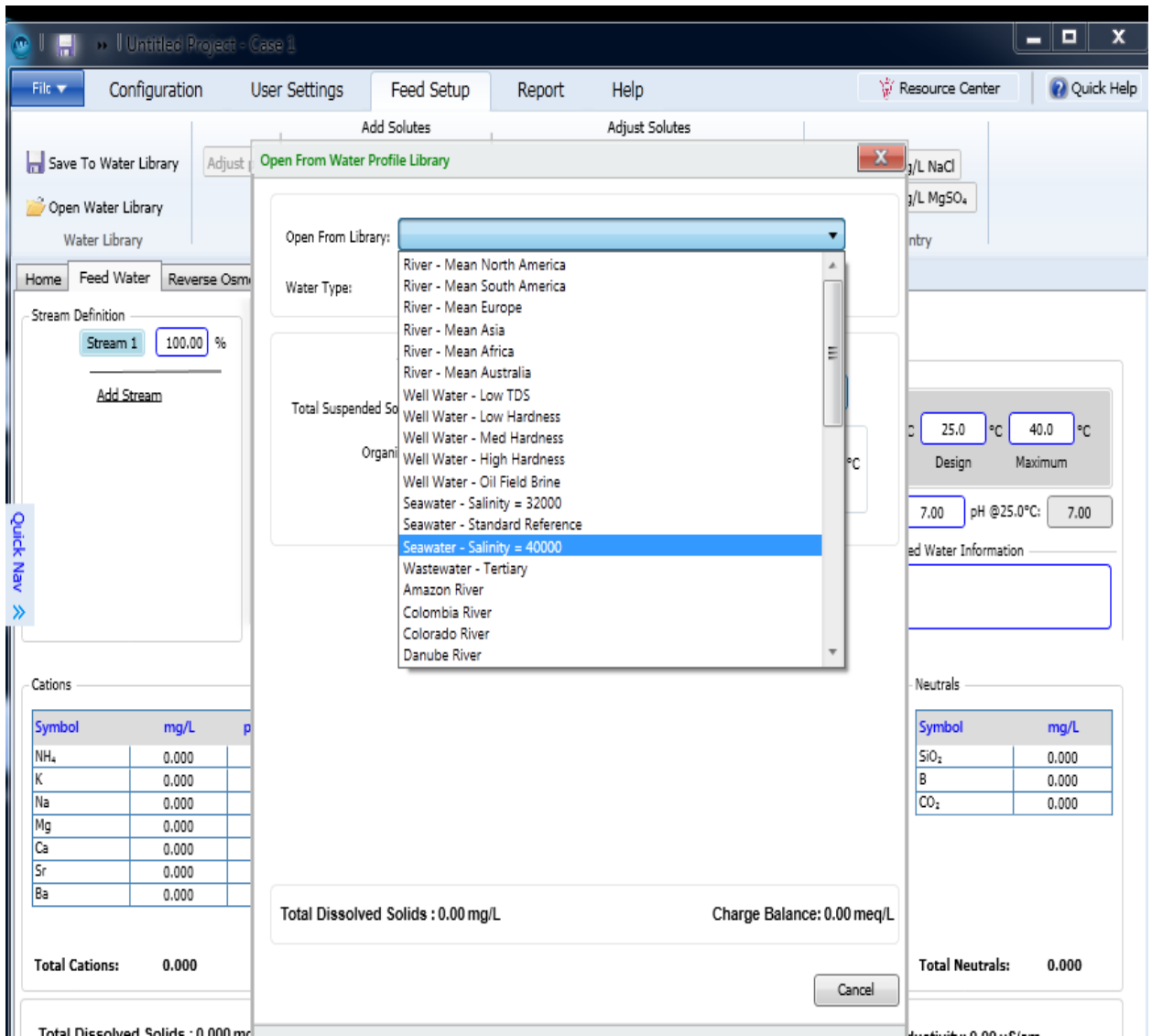
*Tableau(IV.5):*Concentrations des sels .

IV.5. Effet des paramètres de système :

IV.5.1 Effet du Salinité sur La conductivité, charge et TDS :

Si on augmente la salinité de l'eau de mer Salinité = 40000 mg/L, par rapport à la première partie qui était de 36081 mg/L on aura un changement des paramètres de la conductivité et la charge :

Chapitre IV : Interprétation Des Résultats.



*Figure (IV.4):*Le type de l'eau de mer .

Cations				Anions				Neutrals	
Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Symbol	mg/L
NH ₄	0.000	0.000	0.000	CO ₂	16.771	27.972	0.559	SiO ₂	1.143
K	466.754	597.419	11.938	HCO ₃	122.577	100.533	2.009	B	5.250
Na	12,609.121	27,447.208	548.466	NO ₂	0.000	0.000	0.000	CO ₂	0.491
Mg	1,501.336	6,182.454	123.541	Cl	22,632.493	31,947.113	638.386		
Ca	481.936	1,203.543	24.050	F	1.520	4.005	0.080		
Sr	9.298	10.621	0.212	SO ₄	3,172.148	3,305.012	66.043		
Ba	0.000	0.000	0.000	Br	78.691	49.284	0.985		
				PO ₄	0.000	0.000	0.000		
Total Cations:	15,068.445		708.207	Total Anions:	26,024.200		708.061	Total Neutrals:	6.884
Total Dissolved Solids : 41,099.112 mg/L				Charge Balance: 0.073674 meq/L				Estimated Conductivity: 60,070.45 µS/cm	

*Figure (IV.5):*Les valeurs des sels , conductivité et la charge .

- ✚ Le TDS : 41099.112 mg/L .
- ✚ La charge : 0.073674 meq/L.
- ✚ La conductivité : 60070.45 $\mu S/cm$.

✚ **L'effet sur la conductivité :**

- ✚ Plus le niveau de sels est élevé plus la conductivité est élevée .
- ✚ La salinité augmente au concentrat et diminue au perméa car il contient moins des sels .

IV.5.2 Effet dechangement de La membrane :

On a mis le produit seamaxx-440i car on a augmenté la salinité. Les éléments Seamaxx™-440i sont le choix pour les systèmes d'eau de mer fonctionnant à des hauts niveaux de salinité et de température faibles à moyens,

	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4	Element 5	Element 6	Element 7
Product:	Seamaxx™-44	Seamaxx™-44	Seamaxx™-44	Seamaxx™-44	Seamaxx™-44	Seamaxx™-44	Seamaxx™-44
Active Area:	Seamaxx™-440i		440(40.9)	440(40.9)	440(40.9)	440(40.9)	440(40.9)
Max. Pressure:	SW30XFR-400/34i		1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)	1200 (82.7)
Flow:	SW30XLE-400		17,000(64.3)	17,000(64.3)	17,000(64.3)	17,000(64.3)	17,000(64.3)
Salt Rejection (%):	SW30XLE-440i		99.7	99.7	99.7	99.7	99.7
Boron Rejection (%):	SW30ULE-400 (obsolete 9/2019)		89	89	89	89	89
Salt:	SW30ULE-440i (obsolete 9/2019)		NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl
Test Pressure:	SW30HRLE-370/34i		800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)	800 (55.2)
Concentration:	SW30HRLE-400 (obsolete 9/2019)		32000	32000	32000	32000	32000
Recovery (%):	8	8	8	8	8	8	8
Diameter:	8	8	8	8	8	8	8

Active Area units: square feet (square meters)
 Pressure unit: psi (bar)
 Flow unit: gallons per day (cubic meters per day)

Figure (IV.6):Tableau des éléments.

➤ **Description du système et comparaison entre le premier et le deuxième :**

Ici on a le même principe que le premier sauf qu'on a changé la salinité et la membrane qui fonctionne à haute niveau de salinité.

On a pu récupérer 479.9 m3/h du perméate mais par rapport au premier le TDS est plus élevée donc la première membrane a une forte capacité de rejection.

- Débit d'entrée : 1000 m3/h .
- Pression appliqué : 80 bars .

- Récupération : 48.0 %.
- Débit de perméate : 479.9 m³/h.
- Rejet : 510.6 m³/h .

#	Description	Flow (m ³ /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	1,000	41,099	0.0
2	Net Feed to Pass 1	996.8	41,233	80.0
4	Total Concentrate from Pass 1	510.6	78,008	53.0
6	Net Product from RO System	479.9	210.5	0.0

RO System Overview

Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	48.0 %
System Flow Rate	(m ³ /h)	Net Feed =	1,000	Net Product =	479.9		

Tableau (IV.6):Tableau de Description .

- Les parametres généraux :
 - ◆ Nom du flux : Eau de mer – Référence standard --
 - ◆ Type d'eau Eau de mer : (membrane prétraitement SDI <3) .
 - ◆ Salinité : 40000 mg/L.
 - ◆ Le total des solides dissous (TDS) :

Le total des solides dissous, Dans le cas de l'eau de mer, le **TDS** mesure surtout la concentration de sels dissous tels que le chlorure de sodium, le magnésium et le calcium.

- ◆ Recovery 48 % ➡ est la quantité d'eau qui est « récupérée » comme une bonne eau de perméate. **Plus la récupération est élevée, moins vous envoyez d'eau à l'évacuation car on va économiser plus d'eau de perméate.**

Chapitre IV : Interprétation Des Résultats.

Pass		Pass 1
Stream Name		Seawater - Salinity = 40000
Water Type		Sea Water (Membrane pretreatment, SDI < 3)
Number of Elements		308
Total Active Area	(m ²)	12590
Feed Flow per Pass	(m ³ /h)	996.8
Feed TDS ^a	(mg/L)	41,233
Feed Pressure	(bar)	80.0
Flow Factor Per Stage		0.85, 0.85
Permeate Flow per Pass	(m ³ /h)	479.9
Pass Average flux	(LMH)	38.1
Permeate TDS ^a	(mg/L)	210.5
Pass Recovery		48.1 %
Average NDP	(bar)	26
Specific Energy	(kWh/m ³)	5.80
Temperature	(°C)	25.0
Specific Energy	(kWh/m ³)	5.80
Temperature	(°C)	25.0
pH		8.1
Chemical Dose		-
RO System Recovery		48.0 %
Net RO System Recovery		48.0%

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B. It does not include NH₃ and CO₂

Tableau (IV.7): Les paramètres généraux .

IV.5.3 Effet du Performence de la membrane Seamaxx-440i :

➤ **Une petite comparasion entre les deux memembranes :**

SW30XLE-440i	Seamaxx-440i
Haute réjection et faible performance énergétique avec la zone active la plus élevée et une entretoise d'alimentation épaisse.	Utilisé pour Une Eau à haute salinité. Une productivité élevée de tous les éléments.

Tableau (IV.8): comparasion entre les deux memembranes.

Ses caractéristiques :

Les éléments Seamaxx™-440i sont le choix pour les systèmes d'eau de mer fonctionnant à des niveaux de salinité relativement élevée. Le débit de l'élément est nettement supérieur aux débits.

Cette productivité extraordinairement élevée des éléments entraîne des économies substantielles, principalement en termes de consommation d'énergie par rapport aux produits SWRO conventionnels à faible consommation d'énergie.

Ils Aident à réduire les coûts d'exploitation du système et le risque de fuite des joints toriques.

Le processus de fabrication de la membrane sans oxydation se traduit par une grande robustesse de la membrane et des performances stables à long terme.

La fabrication automatisée et précise donne un plus grand nombre de feuilles de membrane plus courtes, réduisant ainsi l'encrassement tout en maximisant l'efficacité de l'élément.

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow	Recirc Flow	Feed Press	Boost Press	Conc Flow	Conc Press	Press Drop	Perm Flow	Avg Flux	Perm Press	Perm TDS
				(m³/h)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(bar)	(bar)	(m³/h)	(LMH)	(bar)	(mg/L)
1	Seamaxx™-440i	32	7	996.8	0.00	79.7	0.0	552.4	72.2	7.5	446.5	48.8	0.0	159.6
2	Seamaxx™-440i	12	7	552.4	0.0	72.0	0.0	519.6	53.0	19.0	33.4	9.7	0.0	890.2

Tableau (IV.9):Performance de la membrane.

➤ **La concentration des sels :**

- ◆ **Les sels :** L'objectif est d'éliminer le maximum des sels pour obtenir une eau répondant aux critères d'utilisation.
- ◆ Nous constatons que les ions de potassium (K^+) et de sulfate (SO_4^{2-}) sont les plus favorisés à passer à travers la membrane .
- ◆ **La conductivité :** Le vieillissement des membranes d'osmose inverse se traduit par une dérive croissante de la conductivité en sortie de membrane .
- ◆ **Le TDS :** La plupart des réglementations relatives à l'eau potable dans le monde; fixe la limite de tolérance de la concentration en TDS à 500 mg/l.
- ◆ Le taux de rejection de TDS accompagnent toujours les débits élevés ; cela s'explique par le fait que les débits d'alimentation élevés améliorent le transfert de masse .

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ⁺	466.8	842.9	895.3	2.49	14.41	3.32
Na ⁺	12,609	22,779	24,199	57.15	319.9	75.44
Mg ⁺²	1,501	2,716	2,888	1.61	8.59	2.10
Ca ⁺²	481.9	872.0	927.0	0.50	2.75	0.66
Sr ⁺²	9.30	16.82	17.88	0.01	0.05	0.01
Ba ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃ ⁻²	21.16	39.59	41.97	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	118.2	211.0	224.1	0.80	3.98	1.02
NO ₃ ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F ⁻	1.52	2.74	2.92	0.01	0.05	0.01
Cl ⁻	22,632	40,893	43,446	94.22	527.1	124.3
Br ⁻¹	78.69	141.9	150.7	0.65	3.55	0.85
SO ₄ ⁻²	3,172	5,741	6,104	1.38	7.19	1.78
PO ₄ ⁻³	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	1.14	2.06	2.19	0.01	0.05	0.01
Boron	5.25	8.87	9.26	0.78	2.59	0.91
CO ₂	0.46	1.04	1.13	0.57	0.83	0.59
TDS ^a	41,099	74,268	78,908	159.6	890.2	210.5
Cond. μS/cm	60,072	100,585	105,992	332	1,773	436
pH	8.1	8.1	8.1	6.3	6.8	6.4

Tableau (IV.10):les concentrations des sels .

- **Les pressions** : La perte de charge à travers les membranes d'OI est en fonction du nombre d'éléments par tube de pression, **la pression diminue dans les différentes éléments de la membrane,**
- **Le TDS** : du flux de concentrat est plus élevé que celle du perméat en raison de dissolution des sels .

Chapitre IV : Interprétation Des Résultats.

Stage	Element	Recovery (%)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Feed TDS (mg/L)	Conc Flow (m ³ /h)	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/L)
1	1	9.9	31.2	79.7	41,232	28.1	3.09	83.73
1	2	9.6	28.1	78.2	45,740	25.4	2.70	103.9
1	3	9.1	25.4	76.9	50,569	23.1	2.31	130.6
1	4	8.4	23.1	75.7	55,592	21.2	1.94	165.9
1	5	7.5	21.2	74.7	60,648	19.6	1.60	212.9
1	6	6.6	19.6	73.8	65,553	18.3	1.29	275.6
1	7	5.6	18.3	73.0	70,137	17.3	1.03	359.1
2	1	2.0	46.0	72.0	74,267	45.1	0.93	392.8
2	2	1.6	45.1	69.2	75,772	44.4	0.70	518.4
2	3	1.1	44.4	66.4	76,950	43.9	0.50	724.4
2	4	0.7	43.9	63.6	77,809	43.6	0.32	1,109
2	5	0.4	43.6	61.0	78,369	43.4	0.18	1,945
2	6	0.2	43.4	58.3	78,680	43.3	0.09	3,722
2	7	0.1	43.3	55.6	78,831	43.3	0.05	6,445

*Tableau (IV.11):*Tableaux des flux (Partie II).

RO Chemical Adjustments

	Pass 1 Feed	RO 1 st Pass Conc
pH	8.1	8.1
Langelier Saturation Index	1.2	1.75
Stiff & Davis Stability Index	0.12	0.69
TDS ^a (mg/l)	41,099	78,908
Ionic Strength (molal)	0.83	1.61
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	118.2	224.1
CO ₂ (mg/l)	0.46	1.13
CO ₃ ⁻² (mg/L)	21.16	41.97
CaSO ₄ (% saturation)	26.2	60.1
BaSO ₄ (% saturation)	0.00	0.00
SrSO ₄ (% saturation)	18.4	49.5
CaF ₂ (% saturation)	24.6	144.7
SiO ₂ (% saturation)	0.80	1.5
Mg(OH) ₂ (% saturation)	2.6	4.3

Tableau (IV.12): Concentration du Concentrât et de flux.

IV.5.4 Effet de la première membrane sur la productivité si on augmente la salinité :

On utilise la première membrane SW30XLE-440i mais cette fois-ci avec une salinité de 40000 mg/L, On obtient ca :

- ✓ Une faible récupération de 37.6 %.
- ✓ Cela veut dire que cette membrane ne fonctionne pas avec une eau de forte salinité
Contrairement à la membrane seamaxx-440i qui a un taux de récupération plus élevée de tous les éléments .

#	Description	Flow (m ³ /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	1,000	41,099	0.0
2	Net Feed to Pass 1	996.8	41,233	80.0
4	Total Concentrate from Pass 1	623.5	65,854	46.4
6	Net Product from RO System	375.7	107.6	0.0

RO System Overview

Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	37.6 %
System Flow Rate	(m ³ /h)	Net Feed =	1,000	Net Product =	375.7		

Tableau (IV.13): Description du système.

IV.6. Conclusion :

IV.6.1. Résumé des résultats obtenus :

	Partie I	Partie II
Débit	1000 m ³ /h	1000 m ³ /h
Pression appliquée	80 bar	
Perméa	431.9 m ³ /h	479.9 m ³ /h
Rejet	567.3 m ³ /h	510.6 m ³ /h
Récupération	43.2 %	48 %
TDS de l'eau de mer avant le traitement .	36081 mg/L	41099 mg/L
TDS de perméa après le traitement .	87.37 mg/L	210 mg/L
PH	8.1	8.1
Membrebrane utilisé	SW30XLE-440i	Seamaxx-440i

Tableau (IV.14): Comparaison entre les deux parties .

Dans cette simulation, le nombre d'étapes sélectionné est deux étapes / un seul passage, ce qui signifie que l'eau ne traverse la membrane d'osmose inverse qu'une seule fois. Les résultats suivants de la simulation WAVE.

Pour la membrane DuPontFilmTec™ **SW30XLE-440i** utilisant un PV avec une capacité de 7 membranes dans la partie I, et **Seamaxx-440i** dans la partie II.

Le total des solides dissous (TDS) de l'eau de perméat du produit a une valeur de 87.37 et 210 mg/L. Cette valeur répond à l'exigence de Permenkes RI n° 32/2017, avec un niveau maximum de 1000 mg/L.

TDS recommandé : Un faible niveau de TDS signifie qu'il y a moins de solides dissous dans l'eau et que l'eau est principalement constituée de molécules d'eau. Le résultat est une eau qui a bon goût.

Le pH a une valeur est de 8,1, ce qui répond également à la norme de Permenkes dans une plage de 6,5 à 8,5.

Le but de ce traitement c'est pour éliminer le max des sels environ 99% contenus dans l'eau de mer en raison de leur danger sur la santé.

- ✓ **SiO₂** : silice cristalline peuvent induire une irritation des yeux et des voies respiratoires, des bronchites chroniques et une fibrose pulmonaire irréversible nommée silicose.
- ✓ **Br** : corrosive pour les yeux, l'inhalation peut provoquer une pneumonie.

La simulation aussi n'avait aucun échec de conception potentiel (avertissements de conception RO), de sorte que la membrane pouvait être utilisée.

En conclusion que les variations de la salinité, de la température ou de la pression de la pompe peuvent influencer la productivité apparente et le rejet d'un système à membrane, ce qui rend moins évident le moment où un changement réel dans les performances de la membrane s'est produit.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le dessalement, notamment de l'eau de mer. Il est aujourd'hui pratiqué dans 15.906 usines réparties dans 177 pays , Toutes les techniques de dessalement de l'eau de mer sont très intéressantes au vu de leurs performances , Nous nous intéressant beaucoup plus sur la technique d'osmose inverse Car Ce procédé permet d'obtenir une eau pure rapidement et à moindre coût.

Alors dans ce travail on a pu faire une étude bibliographique sur les techniques de dessalement et son impact sur l'environnement , on a représenté la technique d'osmose inverse et on a montré les modules des membranes , puis on a pu réaliser une conception étagée qui permet de produire une eau pure de haute qualité et on a fait des études sur les membranes qui peuvent être utilisées pour une haute salinité d'eau de mer .

Au terme de cette étude , On conclut que Le choix du type de système membranaire dépend d'un grand nombre de paramètres, tels que les coûts, les risques de colmatages des membranes, la densité, et le nettoyage nécessaires.

Pour économiser l'énergie électrique on a mis un système de récupération d'énergie PX qui peut récupérer environ 60% d'énergie , et on a pensé aussi au milieu aquatique de l'effet de la forte salinité car l'élimination de la saumure libérée par les processus industriels a un impact négatif sur notre planète. Par conséquent, le traitement de l'eau de saumure offre une solution pour extraire plutôt le sel de ces eaux pour le réutiliser.

Conclusion générale

La première étape du traitement de l'eau salée consiste à extraire autant d'eau « pure » que possible. Lorsque vous utilisez des modules de « dé-sursaturation », vous pouvez récupérer jusqu'à 95 %. Ce qui reste est un flux de saumure hautement concentré, que vous pouvez ensuite conserver dans un bassin d'évaporation ou atteindre Zéro Déchet Liquide grâce à un processus thermique ou à basse température.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] Yann l'Hôte, « Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologique en Europe », Hydrologie Continentale.
- [2] Jean-Marie Rovel (Dessalement de leau de mer) le 01 Févr.2017 .
- [3] <https://WWW.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-eau>.
- [4] <https://www.istockphoto.com/fr/photos/h2o-atome> .
- [5] <https://www.activeau.fr/cycle-de-l-eau.htm> .
- [6] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cycle_de_leau.png .
- [7] Marillys Macé Co-auteur « L'eau potable », Annales de Mines – Responsabilité et Environnement .
- [8] <https://fr.slideshare.net/mercheguillen/le-relief-et-les-eaux>.
- [9] <https://www.isostar.fr/blog/quelle-est-limportance-de-leau-dans-le-corps-humain> .
- [10] IAEA Bulletin 53-1-Septembre 2011 .
- [11] M. GUÉRINI Jean-Noël (Bouches-du-Rhône - SOC) publiée le 15/04/2010 .
- [12] A .Yasmine . Maghreb emergent Novembre 14 , 2022 .
- [13] N.LOUIS La corne de l'Afrique victime de la sécheresse Publié le 14 juillet 2011.
- [14] <https://fr.quora.com/>
- [15] Alain Gerschel, Liaisons intermoléculaires : Les forces en jeu dans la matière condensée, Paris, EDP Sciences, 2012, 2e éd.
- [16] T.W. Martin et Zygmunt S. Derewenda, « The name is bond — H bond », Nature Structural Biology .
- [17] <https://webphysique.fr/liaison-hydrogene/>
- [18] <https://ecampusontario.pressbooks.pub/>
- [19] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-point-d-ebullition>.
- [20] Philippe Souchu , Propriétés physiques de l'eau . Publié le 8 juillet 2014
- [21] <https://www.gwp.org/fr/LES-DEFIS-MAJEURS/Leau-et-les-ecosystemes-/>
- [22] Marcel Pagnol, 1963 - L'eau des collines

Bibliographie

- [23] Eduterre – ENS Lyon.
- [24] <https://www.cieau.com/>
- [25] Antoine Decrouy. Les eaux de surface publié le 10 juin 2022 .
- [26] <https://www.eaufrance.fr/les-eaux-souterraines>
- [27] <https://www.seop.fr/fiche/134004/eau-potable-eaux-usees-et-eau-pluviale->
- [28] <https://www.cieau.com/connaitre-leau/leau-dans-la-nature/les-eaux-de-surface.>
- [29] Statistiques sanitaires mondiales 2012 / OMS
- [30] A. KADI ..Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 42(2) April 1997 .
- [31] Arnaud Mokrani ,Leau et les activités agricoles publié le 01.10.09
- [32] Shiklomanov dans courrier de l'UNESCO.
- [33] Michel Roustan et Alain Grasmick . L'eau a découvert p. 170-171 .
- [34] <https://www.eaufrance.fr/leau-potable-et-lassainissement.>
- [35] <https://culturesciences.chimie.ens.fr/>
- [36] <https://www.veolia.com/fr/solution/dessalement-eau-mer-eau-potable>
- [37] P. Danis. Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, J 2700. Juin 2003.
- [37] Lawson, K.W.; Lloyd, D.R. Membrane distillation. J. Membr. Sci. 1997, 124, 1–25. [Google Scholar]
- [39] Lei, Z.; Chen, B.; Ding, Z. Membrane distillation. In Special Distillation Processes; Lei, Z., Chen, B., Ding, Z., Eds.; Elsevier Science: Amsterdam, the Netherlands, 2005; pp. 241–319. [Google Scholar]
- [40] Findley, M.E. Vaporization through porous membranes. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. 1967, 6, 226–230.
- [41] Philippe Bandelier (Principaux procédés industriels de dessalement d'eau de mer)
- [42] <https://www.lexpress.fr/>
- [43] <https://www.techno-science.net/definition/6672.html>
- [44] <https://www.chemdocwater.com/osmose-inverse/>
- [45] <https://www.my.editions-ue.com/catalog/>
- [46] <https://www.aquaportail.com/definition--osmose-inverse.html.>

Bibliographie

- [47] <https://www.aquariophilie-aquarium.fr/Eau/Qualite-eau/osmose.html>
- [48] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-osmotique>
- [49] <https://www.books.openedition.com/editionscnrs/9815>.
- [50] <https://www.jean-marc-gil-toutsurlabotanique.fr/>
- [51] Le Monde et Nous • (environnement et nature ; en osmose) 14/06/2008
- [52] <https://www.eduterre.enslyon.fr>
- [53] <https://www.aquathermia.com>
- [54] <https://www.hydro.com/osmose-inverse/>.
- [55] <https://www.culturesciences.chimie.ens.fr/>
- [57] https://www.enviroboite.net/IMG/1006_Desalinisation_eau_mer
- [58] <https://www.directindustry.fr>
- [59] Jean Margat, Thierry Ruf (Les eaux souterraines) juin 2014 .
- [60] <https://www.shf-lhb.org/>
- [61] <https://www.superlit.com/fr/applications/acheminement-et-evacuation-deau-de-mer>.
- [62] https://www.academia.edu/dessalement_de_leau_de_mer_par_Osmose_inverse .
- [63] <https://www.handbook.fr/procedes>
- [64] F. LEFORT, G. RANDON, J-M. MONGIN, D. LE MAUX, 2002 : La nanofiltration: un procédé bien adapté à la problématique des eaux bretonnes , T.S.M. n°3, mars 2002
- [65] Cakaew T. (2009). Procédés Hybrides à membranes pour le traitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Thèse doctorat. Toulouse. Université de Toulouse.213
- [66] Leparc J., Rapenne S., Courties C., Lebaron P.,Croué J.P. (2007). Jacquemet V. et Turner G., Water quality and performance evaluation at seawater reverse osmosis plants through the use of advanced analytical tools, Desalination 203 243–255.
- [67] Gaid K. et Treal Y. (2007). Le dessalement des eaux par osmose inverse : l'expérience de Véolia Water, Desalination 203 1-14.
- [68] Pearce G.K. (2007). The case study of UF/MF pretreatment to RO in seawater applications, Desalination 203 286-295.
- [69] Document de la station. «UTE, desalodra Ténès Opération et Maiteniments O &M », juin 2016.

Bibliographie

- [70] <https://www.pompetraitementdeau.com/surpresseurs-booster-pump/>
- [71] <https://www.repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/9788.pdf>.
- [72] <https://www.pureaqua.com/systeme-dosmose-inverse-industrielle-ro-400/>
- [73] W.J.MASSCHELEIN (1996) : « Processus unitaires du traitement de l'eau potable », 11 rue Lavoisier. Paris, France.
- [74] C.Cardot, Génie de l'environnement, Les traitements de l'eau. Edition : Ellipses. 247p,
- [75]<https://www.sofise-filtration.com/industries-pharma-biotech>.
- [76]<https://www.researchgate.net/figure/Positionnement-des-procedes>.
- [77] <https://www.pravarini.free.fr/TraitEP04.htm>
- [78]B.Chaufer, M.Mereilles-Masbernat, P.Aimar, Présentation des membranes in: Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. G.Daфин ,F.René , P.Aimar , Paris, Lavoisier - Tec & Doc: 41-56, 1998.
- [79]S. Nisan, 2008. A Comprehensive economic evaluation of desalination systems, using renewable, fossil fuelled based and nuclear energies, including external environmental costs, Desalination, 229,
- [80] C.Bliefert et al, Chimie de l'environnement (air, eau, sols et déchets). Edition: Boeck &larciel, 2001
- [81]<https://www.espritsante.com/articles/osmose-inverse-separation-phase-liquide>
- [82] L. Daniel Degrémont, Rueil-Malmaison (Applications des membranes d'osmose au traitement de l'eau) .
- [83]<https://www.hydranet.net/hydranet-content/telechargements/descriptions-principaux-procedes/eaux-usees-osmose-inverse-hydranet.pdf>
- [84] C.Bliefert et al, Chimie de l'environnement (air, eau, sols et déchets). Edition: Boeck &larciel, 2001
- [85] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement>
- [86] <https://www.genie-alimentaire.com/spip.php.article299>
- [87] <https://www.eeasm.org/images/JourneesEau2016-Conferences/>
- [88] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement> .
- [89] <http://dessalement.wordpress.com/> consulté le 18/05/2023.

Bibliographie

- [90] L. et al Tian, . Economic evaluation of seawater desalination for nuclear heating reactor with multi-effects distillation, *Desalination*, 180, 53-61 .
- [91] M. Al-Shammiri, M. Safar, Multi-effect distillation plants: state of the art, *Desalination* 126
- [92] <https://www.anses.fr/fr/system/files>.
- [93] <https://www.mustknowhow.com/qualite-de-leau/avantages-et-inconvenients-des-systemes-a-osmose-inverse-purification-de-leau>.
- [94] condorchem.com/fr/blog/losmose-inversee-et-ses-differentes-applications/
- [95] Osbourne, Alan. *Modern Marine Engineers Manual*. (1965). Cornell Maritime Press, inc.
- [96] <https://www.lenntech.fr/>
- [97] <https://www.merus.fr/eau-de-refroidissement/>
- [98] <https://www.niskae.fr/traitement-des-eaux-de-refroidissement.html>
- [99] Jacquet violleau, V., (1999) : Déminéralisation par électrodialyse en présence d'un complexant, application au lactosérum. N° d'ordre 1627. Pages 1-
- [100] N.M. Abdel-Jabbar, H.M. Qiblawey, F.S. Mjalli, H. Ettouney, Simulation of large capacity MSF brine circulation plants, *Desalination* 501–514.
- [101] <https://www.caspeo.net/fr/conseils-etudes-ingenierie-procedes-industriels/>
- [102] R. L. Motard, M. Shacham et E. M. Rosen, « *Steady state chemical process simulation* », *AIChE Journal*, vol. 21, no 3, 1975, p. 417–436 (consulté le 21 Avril 2023)
- [103] C. L. Rhodes, « *The Process Simulation Revolution: Thermophysical Property Needs and Concerns* », *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 41, no 5, 1er janvier 1996, p. 947.
- [104] Abdelkrim Belkadi, « *Modélisation de la matière avec l'équation SAFT pour la prédiction des propriétés thermodynamiques des fluides complexes à travers Simulis thermodynamics* », Thèse de doctorat à l'Institut National Polytechnique de Toulouse
- [105] <https://www.udemy.com/course/dessalement-imsdesign/>.
- [106] <https://www.dupont.com/water/resources/rosa-software.html>.
- [107] <https://www.dupont.com/water/resources/Wave-software.html>.
- [108] https://www.underconsideration.com/brandnew/archives/new_logo_for_wave.