



UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB, Blida 1  
Faculté de Technologie  
Département Energie renouvelables



*Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER*

*Filière : Energies renouvelables*

*Spécialité : Conversion Thermique*

## Thème

# Etude et réalisation d'un système de dessalement d'eau fonctionnant aux énergies renouvelables

**Présenté par :**

DIB Youcef

**Soutenu publiquement, le 09 Juillet 2023, devant le jury composé de :**

Mme KASBADJI MERZOUK Nachida	Directrice de recherche	USDB	Présidente
Mr MERZOUK Mustapha	Professeur	USDB	Examineur
Mr KACI Karim	MAA	USDB	Examineur
Mme TIGRINE Zahia	MRA	UDES	Encadreur
Mme FERRADJI Fatima Zohra	MCB	USDB	Co-Encadreur

**Juillet 2023**

# *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier « Allah » le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Ce travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été effectué au sein du laboratoire de Distillation et Dessalement des eaux saumâtres et de mer (DDESM), Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), Bou Ismail, Tipaza sous la direction de Dr. Zahia TIGRINE.

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma sincère gratitude à mon encadreur, Dr. TIGRINE Zahia, Maître de recherche à l'UDES, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et sa confiance tout au long de ce projet. L'achèvement de ce travail n'aurait pas été possible sans l'investissement dont elle a fait preuve tout au long de ce mémoire. Mes plus sincères remerciements vont au Dr. FERRADJI Fatma qui a Co-encadré ma thèse et a largement participé à sa réalisation. Je la remercie également pour sa disponibilité, son écoute et l'attention qu'elle a portée tout au long de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à tous mes professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont prodigué au cours de ces cinq ans passés à l'université de Blida.

Je souhaite exprimer ma gratitude au Dr. Nachida KASBADJI Merzouk pour son précieux soutien, ses conseils avisés et ses corrections apportées à mon mémoire. J'apprécie sincèrement son aide et son engagement envers mon projet. Je tiens également à remercier vivement d'avoir accepté d'être la présidente du jury lors de ma soutenance. Sa présence en tant que présidente est très significative, et je suis honoré(e) de pouvoir bénéficier de son expertise et de ses conseils.

Je tiens également à remercier chaleureusement Pr MERZOUK Mustapha et Mr KACI Karim pour avoir accepté d'évaluer mon travail et de l'enrichir grâce à leurs précieuses suggestions. Leur contribution est d'une grande importance pour l'amélioration de mon travail de recherche.

Je tiens également à remercier toutes les personnes et intervenants du centre de recherche UDES, qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de répondre à mes questions durant mes recherches en particulier à Mr Kamel Benabdelaziz et au Dr. CHEKIREF Fathia, qui m'ont encouragé et soutenu durant la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Dr. Louassa, Dr. Boudia et Mr. Djatou pour leur précieuse aide et leurs conseils dans la réalisation de mon mémoire.

## **Dédicace**

J'adresse mes remerciements par un grand respect et gratitude à mes très chers parents qui sont la lumière de ma vie, qui ont tant souffert et se sont sacrifiés pour que je sois heureux, pour leurs conseils, leur affection et leurs encouragements.

Je le dédie à : Mon très cher frère qui m'a aidé et qui est toujours présent à mes côtés. Mes très chères sœurs qui m'ont soutenue affectivement tous le long de ma formation.

A mes chers amis, je vous remercie d'avoir été avec moi, merci pour votre soutien et votre encouragement durant toutes mes années d'étude, j'ai de la chance d'avoir votre amitié, je vous souhaite une vie pleine de réussite, bonheur, joie et santé.

## ملخص

كان الهدف من هذه الأطروحة هو إجراء دراسة تصميم محطة التناضح العكسي التي تعمل بالطاقة الشمسية الكهروضوئية و طاقة الرياح، تبلغ إنتاجية 24 محطة م<sup>3</sup>/يوم. تم تقييم الأغشية المختلفة باستخدام برنامج IMSdesign لاختيار البرنامج الذي يقدم أفضل أداء من حيث تقليل TDS وصلابة المياه واستهلاك الطاقة. تم حجم المولد الكهروضوئي الشمسي باستخدام برنامج PVsyst ، بينما تم حجم توربينات الرياح باستخدام برنامج WAsp لتلبية متطلبات الطاقة للنظام. تم الحصول على المكونات اللازمة للتركيب العملي من فريق تحلية المياه DDESM في UDES. أكدت الاختبارات التجريبية تأثير ضغط الماء والملوحة على إنتاج المياه العذبة، وسلطت الضوء على أهمية هذه المعلمات عند تصميم وتشغيل نظام التناضح العكسي. توضح هذه الدراسة قيمة دمج الطاقات المتجددة في تحلية المياه، مما يوفر حلاً واعدًا لتلبية احتياجات مياه الشرب.

**الكلمات المفتاحية:** تحلية المياه ، التناضح العكسي ، توربينات الرياح ، أنظمة الطاقة الكهروضوئية.

## Résumé

L'objectif de ce mémoire était de réaliser une étude de conception et de dimensionnement d'une installation d'osmose inverse alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne, avec une capacité de production moyenne de 24 m<sup>3</sup>/jour. Différentes membranes ont été évaluées à l'aide du logiciel IMSdesign pour choisir celle offrant les meilleures performances en termes de réduction du TDS, de la dureté de l'eau et de la consommation d'énergie. Le dimensionnement d'un générateur solaire photovoltaïque a été réalisé à l'aide du logiciel PVsyst, tandis que le dimensionnement de l'éolienne a été effectué à l'aide du logiciel WAsp pour répondre aux besoins énergétiques du système. Les composants nécessaires ont été acquis pour la réalisation pratique de l'installation auprès de l'équipe de dessalement DDESM, UDES. Des essais expérimentaux ont confirmé l'impact de la pression et de la salinité de l'eau sur la production d'eau douce, mettant en évidence l'importance de ces paramètres lors de la conception et de l'exploitation d'un système d'osmose inverse. Cette étude démontre l'intérêt d'intégrer les énergies renouvelables dans le dessalement de l'eau, offrant une solution prometteuse pour répondre aux besoins en eau potable.

**Mots clés :** dessalement, osmose inverse, éolienne, system PV.

## Abstract

The aim of this thesis was to carry out a design and sizing study for a reverse osmosis plant powered by solar photovoltaic and wind energy, with an average production capacity of 24 m<sup>3</sup>/day. Different membranes were evaluated using IMSdesign software to select the one offering the best performance in terms of TDS reduction, water hardness and energy consumption. The solar photovoltaic generator was sized using PVsyst software, while the wind turbine was sized using WAsp software to meet the system's energy requirements. The components required for practical installation were acquired from the DDESM desalination team at UDES. Experimental tests confirmed the impact of water pressure and salinity on freshwater production, highlighting the importance of these parameters when designing and operating a reverse osmosis system. This study demonstrates the value of integrating renewable energies into water desalination, offering a promising solution for meeting drinking water needs.

**Keywords:** desalination, reverse osmosis, wind turbine, PV system.

## Sommaire

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux .....	II
Nomenclature – Symbole Acronymes.....	III
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I.....</b>	<b>1</b>
<b>REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>1</b>
I.1 Introduction.....	4
I.1.....	4
I.2 Dessalement .....	4
I.2.1 Définition .....	4
I.2.2 Histoire du Dessalement.....	4
I.2.3 Dessalement dans le monde .....	4
I.2.4 Dessalement en Algérie.....	7
I.3 Procédés de Dessalement.....	9
I.3.1 Les procédés thermiques .....	9
I.3.1.1 Dessalement par distillation à multiples effets MED .....	9
I.3.1.2 Dessalement par distillation multi flash MSF.....	10
I.3.1.3 Dessalement par compression de vapeur .....	10
I.3.2 Procédés membranaires.....	11
I.3.2.1 Osmose Inverse .....	11
I.3.2.2 Électrodialyse .....	12
I.3.2.3 Distillation membranaire MD.....	12
I.4 Comparaison entre les procédés de Dessalement .....	13
I.5 Dessalement & Energies renouvelables .....	14
I.6 Principaux Travaux sur le Dessalement par Energie Renouvelables.....	16
I.7 Conclusion .....	19
<b>Référence : .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapitre II .....</b>	<b>22</b>
<b>MISE EN EQUATIONS DU SYSTEME.....</b>	<b>22</b>
II.1 Introduction.....	23
II.2 Description de l'installation.....	23
II.2.1 L'osmoseur .....	23
A. Prélèvement d'eau de mer ou saumâtre.....	24

B. Prétraitement.....	24
C. Système de pompage .....	24
D. Unité de séparation membranaire (Traitement) .....	24
E. Tube de pression (Carter).....	26
F. Eléments influant sur la qualité des membranes .....	27
II.2.2 . Description d'un Système photovoltaïque autonome couplé à l'osmose inverse.....	28
II.2.3 . Description d'un système éolien couplé avec l'OI.....	28
II.3 . Modélisation.....	30
II.3.1 . Principaux paramètres de fonctionnement du procédé membranaire .....	30
A. Estimation de l'énergie requise pour le dessalement.....	30
II.4 . Dimensionnement du Champ Photovoltaïque.....	32
A. Estimation des besoins d'électricité.....	33
B. Détermination de la puissance totale requise .....	33
C. Dimensionnement d'onduleur .....	35
D. Dimensionnement d'un régulateur.....	35
E. Dimensionnement des câbles électriques .....	36
F. Présentation des logiciel PVSYSTT.....	36
II.5 Modélisation des éoliennes .....	37
A. Caractérisation de la vitesse du vent .....	37
B. Vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et variance .....	38
B. Extrapolation des paramètres de Wei bull.....	39
Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïel.....	39
Modèle-modifié d'extrapolation de Justus .....	39
D. Fonctionnement de l'éolienne .....	39
E. Présentation du logiciel utilisé WASP.....	41
II.6 Conclusion .....	42
Référence : .....	42
<b>Chapitre III.....</b>	<b>45</b>
III.1 Introduction.....	46
III.2 Etude et dimensionnement d'un système d'osmose inverse solaire. ....	46
III.2.1 Conception et dimensionnement d'un système d'OI par IMSDesign .....	46
III.2.1.1 Conditions de travail .....	46
III.2.1.2 L'analyse de l'eau .....	46
III.2.1.3 Choix et optimisation de la membrane .....	47

III.2.1.4 Choix et optimisation de la configuration du system d'OI .....	49
III.2.1.5 Présentation des différents scénarios .....	50
III.2.1.6 Effet de la température sur la performance de la membrane .....	55
III.2.2 Dimensionnement d'une installation solaire PV en site isolé .....	56
A. Dimensionnement analytique .....	56
A.1 Estimation des besoins en électricité .....	56
A.2 Détermination du nombre de panneaux PV .....	57
A.3 Dimensionnement des batteries de stockage .....	57
A.4 Dimensionnement du régulateur .....	57
A.5 Dimensionnement des câbles électriques .....	57
B. Dimensionnement à l'aide du logiciel PVSYST .....	58
B.1 Résultats du dimensionnement d'un générateur PV par simulation numérique (Psyst )..	58
B.2 Diagramme journalier d'entrée/sortie .....	58
B.3 Bilan énergétique .....	59
III.2.3 Dimensionnement de l'éolien .....	60
A. Données sur le vent et description du site .....	60
B. L'éolienne utilisée .....	62
III.3 Montage du système d'osmose inverse .....	65
III.4 Tests expérimentaux et analyse des résultats .....	66
III.4.1 Dispositif expérimental .....	66
III.4.2 Conditions des tests Expérimentaux .....	67
III.4.3 Performance du système d'osmose inverse .....	68
A. Analyse du débit en fonction de la salinité et de la pression .....	68
B. L'effet de salinité .....	73
C. Analyse des eaux avant et après traitement à membrane .....	74
D. Energie consommé PV par le système .....	75
III.5 Conclusion .....	77
Référence .....	78
Conclusion générale .....	79

## Nomenclature - Symboles-Acronymes

- A** : Surface de la roue d'une éolienne ( $m^2$ ).
- C<sub>A</sub>** : Concentration de l'eau d'alimentation (g/L).
- C<sub>P</sub>**: Concentration de la même espèce dans le perméat(g/L).
- C<sub>R</sub>**: Concentration de l'espèce à retenir dans le concentrât (g/L).
- C<sub>dP</sub>**: Coefficient de perte.
- C<sub>cp</sub>** : Coefficient de correction de puissance de l'onduleur.
- C<sub>m</sub>** : Concentration en NaCl à la surface de la membrane (g/L).
- C<sub>1</sub>** : Facteur d'échelle de Weibull à 10m (m/s).
- C<sub>2</sub>** : Facteur d'échelle de Weibull extrapolé(m/s).
- CaCO<sub>3</sub>** : Carbonate de calcium.
- CaSO<sub>4</sub>**: Sulfate de calcium.
- E<sub>C</sub>** : Energie de consommation(KWh/m<sup>3</sup>).
- E<sub>M</sub>**: Eclaircmnt moyenne dans la journée (W/m<sup>2</sup>).
- E<sub>j</sub>**: Consommation d'énergie journalière(KWh/m<sup>2</sup>)..
- f(V)** : Fréquence de la vitesse du vent.
- I<sub>e</sub>**: Intensité du courant d'entrée du régulateur (A).
- I<sub>s</sub>** : L'intensité de courant de sortie(A).
- I<sub>m</sub>** : Intensité maximale de chaque module (A).
- J<sub>solvant</sub>** : Flux de solvants ( $m^{-1}.s^{-1}$ ).
- K**: Nombre de circuit de module monté en parallèle.
- K<sub>1</sub>**: Facteur de forme de Weibull à 10m.
- K<sub>2</sub>** : Facteur de forme de Weibull extrapolé à certaine hauteur.
- K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** : Sulfate de potassium.
- L**: Longueur du conducteur (m) .
- MgCl<sub>2</sub>** : Chlorure de magnésium.
- MgCO<sub>3</sub>** : Carbonate de magnésium.
- MgSO<sub>4</sub>** : Sulfate de magnésium.
- N** : Nombre de jours d'autonomie souhaité.
- N<sub>bat</sub>** : Nombre de Batterie.
- N<sub>br</sub>** : Nombre d'équipements .
- N<sub>e</sub>** : Nombre d'heures équivalentes .
- N<sub>panneau</sub>** : Nombre de panneau.
- P<sub>C instalee</sub>** : Puissance totale requise (Watt).
- P<sub>c panneau</sub>** : Puissance crête de panneau(W<sub>C</sub>).
- P<sub>d</sub>** : Profondeur de décharge .
- P<sub>e</sub>**: Puissance de l'équipement(Watt).
- P<sub>loss</sub>** : Pertes de charge due à l'écoulement de l'eau dans les tuyauteries.
- P<sub>m</sub>** : Puissance moyenne disponible (W).
- P<sub>moy</sub>** : Densité de puissance moyenne disponible(W/m<sup>2</sup>).
- P<sub>t</sub>**: Puissance totale des récepteurs(W).
- P<sub>u,moy</sub>**: Puissance moyenne utilisable(W).

**P<sub>utile</sub>** : Puissance moyenne réellement utilisable (W).

**P** : Puissance de la pompe(W).

**P<sub>c</sub>** : Puissance crête(W).

**Q<sub>A</sub>** : Débit d'alimentation (m<sup>3</sup>/h).

**Q<sub>C</sub>** : Débit de concentrât(m<sup>3</sup>/h).

**Q<sub>P</sub>** : Débit de perméat (m<sup>3</sup>/h).

**R** : Constante des gaz idéaux(J/mol.K).

**S** : Surface de la membrane( m<sup>2</sup>).

**S<sub>c</sub>**: Section du conducteur(mm<sup>2</sup>)..

**T**:Température de l'eau (K).

**T<sub>R</sub>** : Sélectivité d'une membrane.

**U** : Tension aux bornes du générateur (V).

**U<sub>c</sub>**: Chute de tension(V).

**V** : Tension nominale de la batterie. (V).

**V<sub>n</sub>** : Vitesse nominale (m/s).

**V<sub>moy</sub><sup>3</sup>** : Vitesse cubique moyenne du vent(m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>).

**V<sub>moy</sub>** : Vitesse moyenne du vent(m/s).

**V<sub>a</sub>** : Vitesse d'arrêt (m/s). .

**V<sub>S</sub>** : Volume du soluté (m/s). .

**V<sub>D</sub>** : Vitesse de démarrage (m/s).

**Y** : fraction de débit / Taux de conversion (%).

**n** : Quantité molaire (mol) .

**r** : Résistance du conducteur( $\Omega$ ) .

**t** : temps de conversion(h)

**t<sub>1</sub>** : Duree d'utilisation (h)

**v** : Vitesse du vent(m/s).

**z<sub>0</sub>** : Rugosité (m).

**z<sub>1</sub>** : Hauteur à 10m (m).

**z<sub>2</sub>** : Hauteur supérieure à 10m (m).

**Cl** : Chlorure.

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone .

**$\Gamma$**  : Fonction Gamma.

**$\alpha$**  : Coefficient osmotique .

**$\eta$**  : Rendement de la machine.

**$\rho$**  : Masse volumique de l'air (Kg/m<sup>3</sup>).

**$\Delta\pi$**  : Pression osmotique (bar).

**$\Delta P$**  : Pression de pompage(bar).

**$\eta_p$**  : Efficacité hydraulique de la pompe.

**$\eta_{ond}$**  : Rendement d'onduleur

**$\rho_s$** : Résistivité valant  $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  .

**AEC** : Algerian energy company.  
**CDER** : Centre de développement des énergies renouvelables .  
**CEA** : Commissariat à l'Energie Atomique .  
**DDESM** : Laboratoire de dessalement des eaux saumâtre et de mer .  
**ED** : Electrodialyse.  
**FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture .  
**HDH**: hybride humidification-déshumidification.  
**HWT** :Horizontal wind turbine .  
**MD** : Distillation membranaire  
**MED** : Distillation à multiples effets .  
**MENA** : Moyen-Orient et Afrique du Nord.  
**MRE** : Ministère des Ressources en Eaux .  
**MSF** : Distillation multi flash .  
**Na<sup>+</sup>** : Sodium.  
**NaCl** : chlorure de sodium.  
**NPC**: Net Present Cost.  
**OI** : Osmose inverse.  
**OMS** : Organisation mondiale de la santé .  
**ONU** : L'Organisation des Nations Unies  
**PV**: Photovoltaïque .  
**SOW** : Safe Operating Window.  
**TAC** :Alcalinité totale  
**TH** : teneur totale en dureté  
**UDES** : Unité de développement des équipements solaire.  
**USD** : United States dollar.  
**VCD** : Dessalement par compression de vapeur

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I .1:</b> Stress hydrique dans le monde .....	5
<b>Figure I .2:</b> Croissance mondiale du dessalement, 1960-2020 .....	5
<b>Figure I .3 :</b> Évolution des capacités de dessalement d'eau de mer au région MENA, en millions de m <sup>3</sup> /jour .....	6
<b>Figure I .4:</b> Localisation géographique de 13 stations de dessalement d'eau de mer en Algérie .....	8
<b>Figure I .5:</b> Capacité des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie. ....	8
<b>Figure I .6:</b> Capacité des stations de dessalement de l'eau saumâtre en Algérie. ....	9
<b>Figure I .7:</b> Procédé de dessalement par distillation à multiples effets MED.....	10
<b>Figure I .8:</b> Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF .....	11
<b>Figure I .9:</b> Procédé de dessalement par compression de vapeur. ....	11
<b>Figure I .10:</b> Procédé de l'osmose inverse .....	12
<b>Figure I .11:</b> Procédé de dessalement par électrodialyse .....	13
<b>Figure I .12:</b> Schéma de principe de la distillation membranaire .....	13
<b>Figure I .13:</b> Répartition des technologies de dessalement .....	14
<b>Figure I .14 :</b> Diagramme des technologies de dessalement basées sur les énergies renouvelables .....	15
<b>Figure I .15 :</b> des technologies de dessalement basées sur les énergies renouvelables ...	15
<b>Figure I .16 :</b> Schéma du système de dessalement hybride HDH-RO .....	19

### Chapitre II

<b>Figure II-1:</b> Etapes du dessalement par OI.....	25
<b>Figure II.2:</b> Structure d'une membrane organique plane et asymétrique en polyamide..	27
<b>Figure II.3:</b> Modules d'osmose inverse .....	28
<b>Figure II.4:</b> Modules spirales .....	28
<b>Figure II.5:</b> Emplacement des éléments dans un corps de pression.....	29
<b>Figure II.6 :</b> Schéma de principe d'un système photovoltaïque couplé par osmose inverse	31
<b>Figure II.7 :</b> System éolienne couplé par system OI.....	29
<b>Figure II.8 :</b> Unité élémentaire d'osmose inverse.....	30
<b>Figure II.9 :</b> Carte de l'irradiation solaire en Algérie .....	32
<b>Figure II.10:</b> Plateforme du logiciel PVsystt (interface graphique). ....	39
<b>Figure II.11:</b> Courbe typique de puissance récupérée P(W) en fonction de la vitesse du vent V(m/s).....	40
<b>Figure II.12:</b> WAsp interface.....	41

### Chapitre III

<b>Figure III.1:</b> Variation du TDS et de la consommation d'énergie en fonction du taux de conversion pour différentes membranes. ....	48
<b>Figure III.2:</b> Présentation de la configuration « scenario 01 ». ....	50
<b>Figure III.3:</b> Présentation de la configuration à deux étages « scenario 02 ». ....	51
<b>Figure III.4:</b> Configuration « scenario 03 » avec quatre étages. ....	51
<b>Figure III.5:</b> Présentation schématique d'un système deux étages « scenario 04 ». ....	52
<b>Figure III.6:</b> Présentation schématique d'un système « configuration 05 ». ....	54
<b>Figure III.7:</b> Présentation schématique d'un système double passe « scenario 06 ». ....	53
<b>Figure III.8:</b> Variation de la TDS d'eau produite, l'énergie spécifique et débit d'alimentation pour les différents scenarios, ESPA02-4040. ....	55
<b>Figure III.9:</b> Résultats de l'analyse chimique de l'eau avant et après traitement par la membrane 'ESPA2-4040 « scenario3 ». ....	54
<b>Figure III.10:</b> Variation de l'énergie consommée (a) et la TDS(b) en fonction de la température d'eau d'alimentation en utilisant la membrane « ESPA02-4040 ». ....	55
<b>Figure III.11:</b> Diagramme d'entrée/sortie journalier de notre système. ....	60
<b>Figure III.12:</b> Diagramme des pertes sur l'année entière. ....	61
<b>Figure III.13:</b> Sélection des zones pour l'identification de la rugosité de chaque partie du terrain sur Google Earth. ....	61
<b>Figure III.14:</b> Topographie du site. ....	62
<b>Figure III.15:</b> Longueurs de rugosité et topographie de la région étudiée. ....	62
<b>Figure III.16:</b> Rose de vent ....	63
<b>Figure III.17:</b> Distribution annuelle des fréquences. ....	63
<b>Figure III.18:</b> Carte des vitesses de vent annuelle à 27 m au dessus du sol. ....	65
<b>Figure III.19:</b> Présentation de tout le matériel acquis et réalisé nécessaire à la mise en place d'un système d'osmose inverse. ....	66
<b>Figure III.20:</b> Présentation du système d'osmose inverse réalise. ....	67
<b>Figure III.21:</b> Système d'osmose inverse installé sur la plateforme de l'UDES . ....	68
<b>Figure III.22:</b> Variation du débit de perméat en fonction de la pression pour les différentes salinités étudiées. ....	69
<b>Figure III.23:</b> Variation du taux de conversion du module membranaire pour différentes salinités en fonction de la pression. ....	70
<b>Figure III.24:</b> Variation des TDS du perméat pour différentes eau d'alimentation en fonction de la pression. ....	71
<b>Figure III.25:</b> Variation des débits en fonction de la pression pour les faibles salinités. ....	72
<b>Figure III.26:</b> Variation des débits en fonction de la pression pour les fortes salinités. ....	72
<b>Figure III.27:</b> Variation du débit du perméat pour une salinité de (1.2g/L) et TDS en fonction de la pression. ....	73
<b>Figure III.28:</b> Variation du débit du perméat pour une salinité de (8g/L) et TDS en fonction de la pression. ....	74

<b>Figure III.29:</b> Variation des débits de perméat, du taux de conversion, du TDS et de connectivité en fonction de différentes salinités d'alimentation.....	75
<b>Figure III.30:</b> Résultats de l'analyse des eaux avant et après traitement à membrane.....	76
<b>Figure III.31:</b> Puissance fournie par la pompe HP en fonction de la pression a différentes TDS. .....	76
<b>Figure III.32:</b> Evolution de la puissance fournie par la pompe HP en fonction du débit de production : eau d'une faible salinité de 1.2 g/L, et l'eau d'une forte salinité de 8 g/L.....	77
<b>Figure III.33:</b> Variation de l'énergie spécifique consommée (SEC) pour différentes salinités d'alimentation.....	7

## Liste des tableaux

### Chapitre I :

<b>Tableau I-1:</b> Comparaison entre les procédés de dessalement .....	14
---	----

### Chapitre II:

<b>Tableau II-1:</b> Potentiel solaire en Algérie .....	32
<b>Tableau II-2:</b> Expressions des vitesses moyennes, des vitesses cubiques moyennes selon le modèle utilisé. ....	38
<b>Tableau II-3:</b> Modèles choisis pour l'étude à long terme .....	39

### Chapitre III:

<b>Tableau III-1:</b> Analyse physico-chimique de l'eau saumâtre.. ....	47
<b>Tableau III-2:</b> Limites maximales de fonctionnement de la membrane testée. ....	49
<b>Tableau III-3:</b> Les différentes configurations proposées pour system OI. ....	49
<b>Tableau III-4:</b> besoins du system .....	56
<b>Tableau III-5:</b> Résultats de la simulation. ....	58
<b>Tableau III-6:</b> Bilan énergétique de la simulation PVsystt.....	59
<b>Tableau III-7:</b> Fiche technique de la Permanent Magnet 3KW .....	62
<b>Tableau III-8:</b> Résumé du climatologie éolien régional .....	634
<b>Tableau III-9:</b> Estimation des principaux paramètres. ....	64
<b>Tableau III-10:</b> Résultats de l'analyse physico-chimique des eaux saumâtres. ....	68
<b>Tableau III-11:</b> Modèle mathématique qui présente la variation de débit de perméat avec la puissance de la pompe pour différentes salinités. ....	76

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La pénurie d'eau est un problème majeur dans de nombreuses régions du monde. Selon les estimations de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), environ 2,2 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à de l'eau potable salubre et environ 4,2 milliards ne disposent pas de services d'assainissement de base [1]. En 2040, il est estimé 2,5 milliards de personnes souffriront du manque d'eau à cause de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations en eau [1].

La pénurie d'eau est souvent causée par une combinaison de facteurs naturels et humains, tels que le changement climatique, la pollution de l'eau, la croissance de la population, l'urbanisation, la surconsommation d'eau, la mauvaise gestion des ressources en eau et les conflits politiques. Les régions les plus touchées par la pénurie d'eau sont généralement les régions arides et semi-arides, notamment en Afrique du Nord et du Sahel, en Asie centrale, au Moyen-Orient, en Inde et dans certaines parties de l'Amérique latine.

Le stress hydrique a des conséquences graves sur la santé humaine, l'agriculture, l'économie et l'environnement. Elle peut entraîner des maladies d'origine hydrique, la dégradation des sols, la réduction des rendements agricoles, la famine, la migration forcée, la pauvreté, les conflits et la dégradation de l'écosystème.

Malheureusement, l'Algérie est confrontée à une situation de raréfaction de l'eau, également appelée "stress hydrique". Cette situation est due à une forte croissance démographique dans les grandes villes de la zone côtière, à une augmentation du niveau de vie, à une agriculture en expansion nécessitant de grandes quantités d'eau et à une activité industrielle en augmentation. De plus, les changements climatiques, qui entraînent de longues périodes de sécheresse, augmentent la pression due au déficit en ressources en eau.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), il y a un stress hydrique lorsque chaque personne dispose de moins de  $1700\text{ m}^3$  d'eau par an et une pénurie lorsqu'elle dispose de moins de  $1000\text{ m}^3$  d'eau par an. Malheureusement, plus de 1,4 milliard de personnes vivent actuellement avec moins de  $1000\text{ m}^3$  d'eau par an. En 2015, 600 millions de personnes n'avaient pas accès à de l'eau potable propre [2]. D'ici 2050, on estime que 2,5 milliards de personnes souffriront d'un manque d'eau en raison de l'évolution de la démographie et de l'augmentation de la consommation d'eau [3].

L'Algérie, comme beaucoup d'autres pays de la région MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord) en voie de développement, a lancé un programme national pour mettre en œuvre des stratégies visant à faire face à la pénurie d'eau, en recourant à des ressources non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer et la réutilisation des eaux usées épurées. La méthode la plus importante sur laquelle s'est basé le Ministère des Ressources en Eaux pour mettre fin à cette crise est le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Elles sont propres, durables et ont un faible impact environnemental. Les sources d'énergie renouvelables, telles que le solaire, l'éolien et la géothermie, deviennent de plus en plus abordables et fiables. De plus, elles peuvent réduire la pollution de l'air et de l'eau. Elles peuvent également contribuer à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, qui sont une cause majeure du changement climatique, et assurer la sécurité énergétique [4].

Le dessalement de l'eau saumâtre ou de l'eau de mer à l'aide de systèmes alimentés par des sources d'énergie renouvelables offre une solution prometteuse et durable pour résoudre la pénurie d'eau dans de nombreuses régions du monde. En effet, les systèmes de dessalement couplés à l'énergie solaire et éolienne contribuent au développement durable en prenant en compte l'environnement. Différentes technologies de dessalement fonctionnant à l'énergie solaire sont principalement basées sur la capacité du système, le type de source d'énergie et l'eau brute à purifier. Le dessalement utilisant les énergies renouvelables est principalement basé sur le processus d'osmose inverse, des procédés thermiques MSF et MED.

Le but de notre étude est de contribuer au développement d'une nouvelle technologie économique en créant un générateur d'électricité d'origine renouvelable pour alimenter un système de dessalement mobile par osmose inverse.

Le manuscrit est structuré autour de trois chapitres principaux et une annexe.

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur le dessalement de l'eau et les énergies renouvelables. Nous commencerons par présenter le dessalement des eaux salines, les différents procédés de dessalement, ainsi que le dessalement en Algérie. Ensuite, nous aborderons les généralités sur les sources d'énergie renouvelables et leur couplage avec le dessalement. Enfin, nous présenterons un état de l'art sur le dessalement alimenté par l'énergie renouvelable.
- Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation du système étudié. Nous commencerons par présenter l'installation considérée, puis nous procéderons à la présentation des différents composants du système, à savoir l'osmoseur, le système photovoltaïque (PV) et le système éolien. La modélisation de l'osmoseur sera présentée, ainsi que les méthodes de calcul du champ PV et de l'éolienne.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats numériques obtenus, notamment pour le dimensionnement du système d'osmose inverse, du champ PV et de l'éolienne. Nous présenterons également les résultats expérimentaux d'un système d'osmose inverse couplé à un générateur PV. Enfin, nous conclurons ce travail en proposant une conclusion générale et des perspectives pour de futures recherches.

# **Chapitre I**

## **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I.1 Introduction**

Dans ce premier chapitre, nous présenterons le dessalement des eaux salines et les procédés de dessalement et particulièrement le dessalement en Algérie. Ensuite nous aborderons des généralités sur les énergies renouvelables et leur couplage avec le dessalement. Enfin, nous présenterons un état de l'art sur le dessalement alimenté par les énergies renouvelables.

## **I.2 Dessalement**

### **I.2.1 Définition**

Le dessalement est un processus technique visant à produire de l'eau douce à partir d'eau salée ou saumâtre, en éliminant les sels et les minéraux dissous présents dans l'eau de mer ou dans d'autres sources d'eau salée [6].

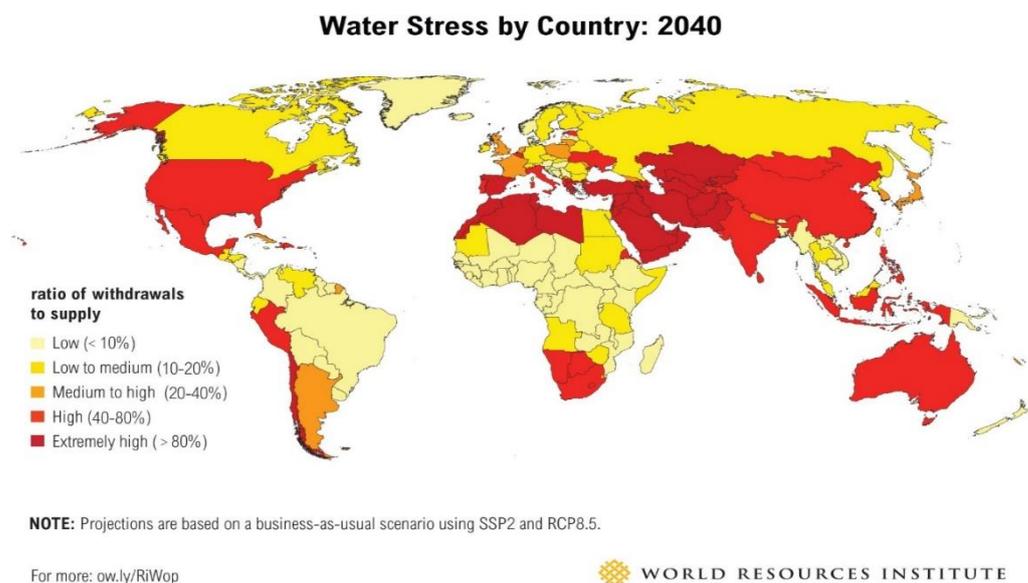
### **I.2.2 Histoire du dessalement**

L'idée de séparer le sel de l'eau remonte à l'Antiquité, où le sel était un produit précieux et l'eau de mer n'était pas considérée comme une source d'eau potable. Toutefois, avec la croissance démographique et l'augmentation de la demande en eau douce, la recherche de moyens pour produire de l'eau douce est devenue une priorité. Le besoin de produire de l'eau douce dans des endroits éloignés a conduit à la recherche de techniques pour dessaler l'eau de mer et de l'eau saumâtre, notamment pour les bateaux en mer.

En 1938, une importante usine de dessalement d'eau de mer a été construite en Arabie Saoudite [5]. La recherche sur le dessalement s'est poursuivie pendant la Seconde Guerre mondiale pour répondre aux besoins en eau douce des régions arides. Les États-Unis et d'autres pays ont continué à travailler sur cette technique même après la guerre. Les premiers appareils de distillation sont apparus dans la première moitié du XXe siècle, mais c'est à partir de 1975 que des moyens industriels ont été mis en œuvre pour dessaler l'eau de mer. Depuis lors, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est devenu une pratique courante dans de nombreux pays pour répondre à la demande croissante en eau douce [6].

### **I.2.3 Dessalement dans le monde**

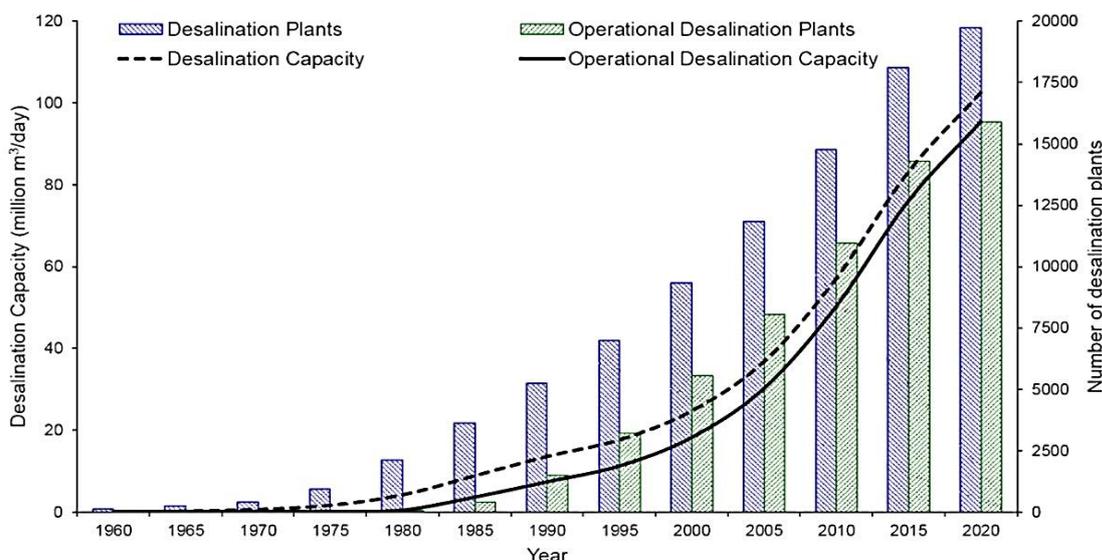
Le dessalement d'eau est de plus en plus considéré comme la solution de premier plan pour faire face au stress hydrique croissant, c'est-à-dire au déséquilibre entre la demande en eau et la quantité disponible. L'Organisation des Nations Unies (ONU) estiment qu'en 2025, les deux tiers de la population mondiale seront concernés par ces défis. Si les causes de la raréfaction de l'eau sont multiples (changement climatique, agriculture intensive et croissance démographique), elle impose aux États de repenser leurs politiques hydriques, centrales pour la préservation de leur stabilité, résilience et souveraineté.



**Figure I.1:** Stress hydrique dans le monde [1].

Selon le rapport de l’ONU sur la mise en valeur des ressources en eau dans le monde de 2020, la production totale d'eau dessalée dans le monde a augmenté rapidement au cours des dernières décennies, passant de moins d’un million de mètres cubes par jour en 1960 à environ 120 millions de mètres cubes par jour en 2020. Ce nombre devrait augmenter dans les années à venir en raison de la croissance de la population mondiale, de l'urbanisation et du changement climatique. Le rapport indique également que le nombre de stations de dessalement opérationnelles a dépassé les 20 000 stations dans le monde en 2020. Il est important de noter que la production d'eau dessalée peut varier considérablement selon les pays et les régions [4].

Les pays du Moyen-Orient, tels que l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis et le Koweït, sont les plus grands producteurs d'eau dessalée dans le monde, en raison de leurs conditions climatiques arides et de leur manque de ressources en eau douce.



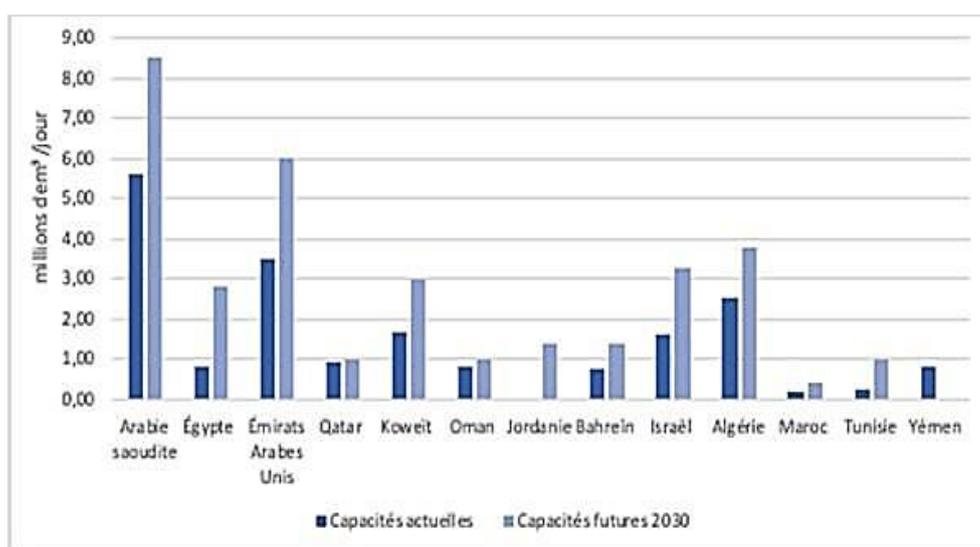
**Figure I.2:** Croissance mondiale du dessalement, 1960-2020 [4].

La majorité des pays du Golfe dépendent désormais en grande partie de l'eau dessalée pour la consommation de leurs habitants : aux Émirats arabes unis (EAU), 42 % de l'eau potable provient d'usines de dessalement représentant plus de 7 millions de mètres cubes par jour, 90 % pour le Koweït, 86 % pour Oman, 70 % pour l'Arabie Saoudite.

En 2022, plus de 21 000 stations de dessalement d'eau de mer sont opérationnelles dans le monde, soit presque deux fois plus qu'il y a dix ans, et le secteur connaît une croissance de l'ordre de + 6 % à + 12 % de capacité par an. En 2030, les capacités de dessalement des pays du Moyen-Orient devraient quasiment doubler, s'inscrivant dans le cadre de plans quinquennaux annoncés afin de préparer la transition de ces économies à "l'après pétrole".

Les capacités de dessalement de l'Arabie Saoudite passeront de 5,6 millions de  $m^3$  par jour en 2022 à 8,5 millions de  $m^3$  par jour en 2025, et devront couvrir plus de 90 % de la consommation en eau du pays. De même aux EAU, au Koweït, à Bahreïn ou en Israël, où la production d'eau dessalée va plus que doubler d'ici à 2030 [7].

Avec l'essor des solutions disponibles pour répondre à tous les besoins, ces technologies sont désormais demandées sur pratiquement tous les continents et le Moyen-Orient ne représente plus que 50 % des capacités installées dans le monde. En Afrique, des projets d'envergure ont été récemment annoncés en Algérie et au Maghreb, pays jusqu'alors dotés d'eau potable en quantité suffisante. D'autres comme le Ghana, le Sénégal et le Kenya alimentent de nombreuses villes grâce à de l'eau de mer dessalée. C'est aussi le cas de la ville du Caire. Dans la zone indopacifique, notamment en Chine et en Inde, les besoins en eau dessalée augmentent, tirés vers le haut par une industrie en croissance et une eau disponible qui diminue. Pour la seule année 2020, plus de 35 usines de dessalement ont été annoncées en Chine, six aux Philippines et six à Taïwan [7].



**Figure I.3 :** Évolution des capacités de dessalement d'eau de mer au région MENA, en millions de  $m^3$ /jour [7].

### I.2.4 Dessalement en Algérie

En 2012, la quantité totale d'eau prélevée était estimée à 8425 millions de  $m^3$ . Sur ce total, 4800 millions de  $m^3$  provenaient de sources d'eau de surface et 3000 millions de  $m^3$  étaient prélevés dans les nappes souterraines. Ces chiffres dépassent largement le volume annuel d'eau renouvelable de 615 millions de  $m^3$  d'eau dessalée et de 10 millions de  $m^3$  d'eaux usées traitées directement utilisées [9]. Au niveau national, les prélèvements d'eau ont été estimés pour trois secteurs principaux, à savoir l'agriculture (4990 millions de  $m^3$ ), les collectivités (415 millions de  $m^3$ ) et l'industrie (3020 millions de  $m^3$ ) [10]. Le gouvernement a investi massivement dans le dessalement d'eau de mer. Une liste de certaines des usines de dessalement installées pendant les années 2000 est présentée dans figure I-4 et figure I-5.

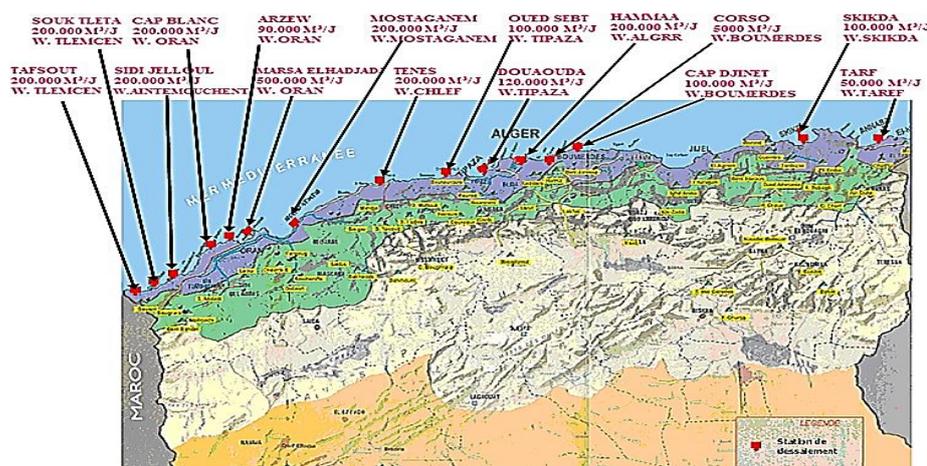
Et même, l'Algérie dispose de plusieurs stations de dessalement de l'eau saumâtre est présentée dans Figure I-6. Il y a plus de dix usines de dessalement d'eau de mer qui ont été mises en service avec une capacité totale de production d'eau douce de 2 310 000  $m^3$  / jour, y compris celle de Mactaa (500 000  $m^3$  / jour), qui est l'une des plus grandes au monde (voir Figure I-5) [11]. L'Algérie est le deuxième pays en Afrique et dans le monde arabe après le Soudan en termes de superficie, et le plus grand autour de la Méditerranée. En raison d'une sécheresse sévère continue, le gouvernement algérien a adopté un vaste programme de dessalement de l'eau de mer pour surmonter au déficit d'eau potable.

En 1964, trois petits blocs de dessalement d'une capacité de 8  $m^3$ /h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew. Au cours de la même année, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560  $m^3$ /jour. Le procédé utilisé est la distillation (Multi-étage flash).

- Des petites unités ont été installées principalement dans le sud en vue de fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières.
- Sur décision du conseil interministériel du 12 octobre 2003, l'Algérie opte pour le dessalement d'eau de mer. Un grand programme est lancé par l'Algerian Energy Company (AEC) qui est chargé de sa mise en œuvre.

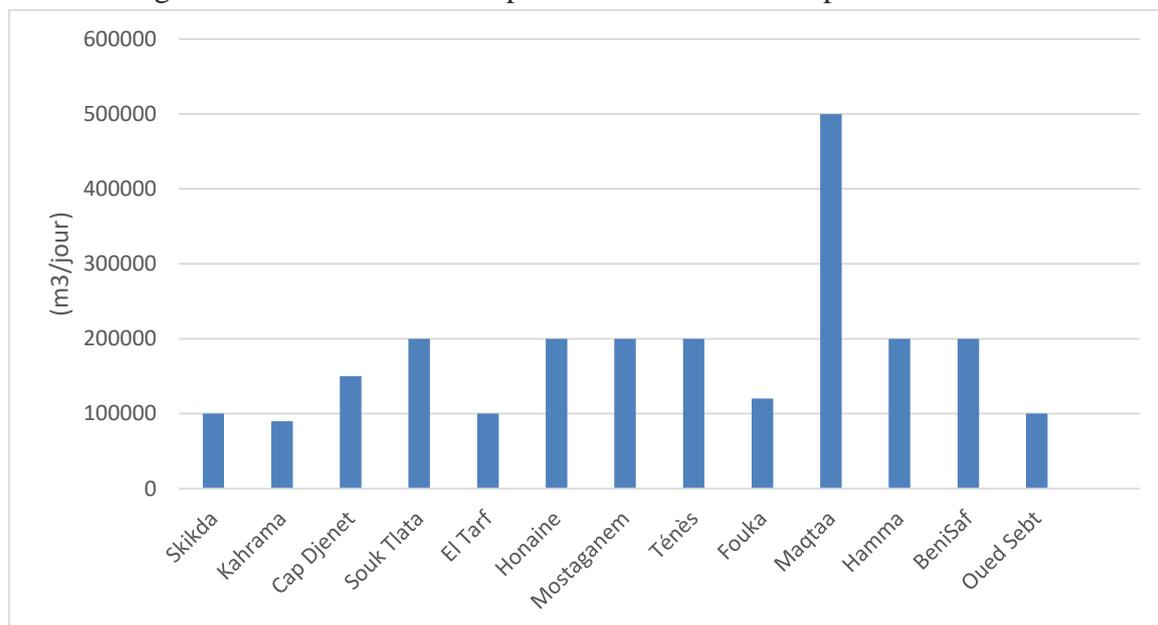
La capacité de dessalement en Algérie passe de 152 500  $m^3$ /jour en 2006 à 1,2 $m^3$ /jour en 2011. À la fin, 2012, la capacité de dessalement d'eau de mer était de 1,3 $m^3$ /jour et la capacité totale en 2014 atteint 2,1  $Mm^3$ /jour. La station de Hamma a été inaugurée en février 2008, avec une capacité de production de 200 000  $m^3$ /jour.

La réalisation de l'usine de dessalement d'eau de mer de Fouka opérationnelle depuis 2011, il s'agit de la troisième station établie dans la wilaya de Tipaza avec la station de Bou-Ismaïl qui fournit 5 000  $m^3$ /jour et la station d'Oued Sebt Gouraya qui fournit également 100 000  $m^3$ /jour [8].



**Figure I.4:** Localisation géographique de 13 stations de dessalement d'eau de mer en Algérie [12].

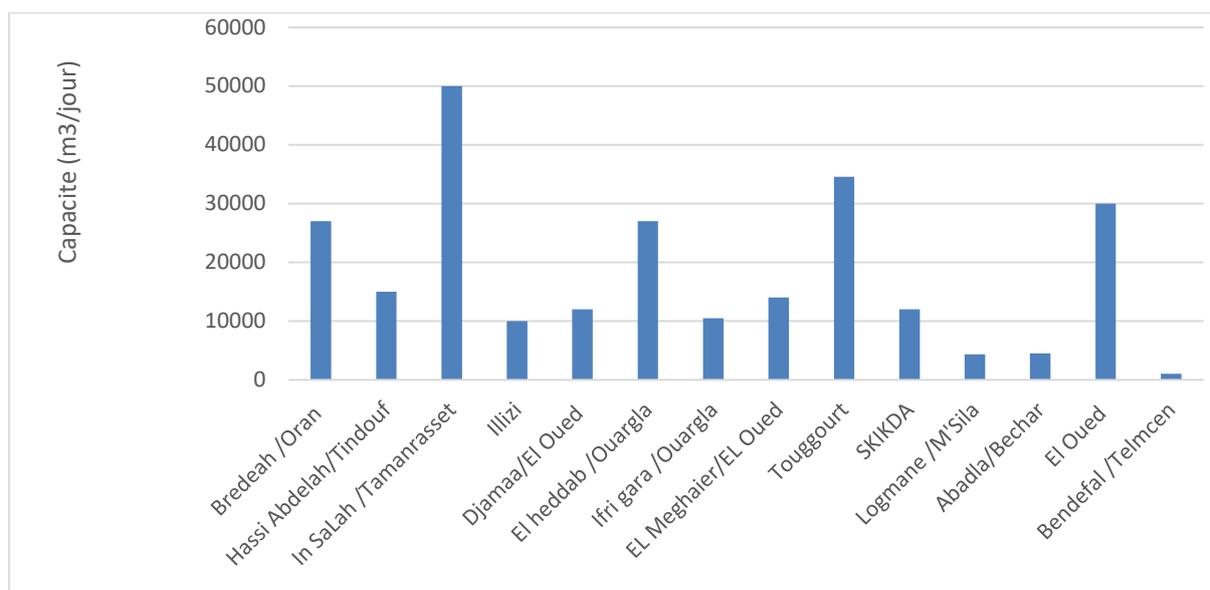
- El-Magta usine située près d'Oran, elle est opérationnelle depuis le premier semestre de 2014. C'est l'une des usines les plus grandes au monde, il utilise un procédé d'osmose inverse d'une capacité de 500 000 m<sup>3</sup>/jour pour la couverture à long terme des besoins en eau potable de 5 millions de personnes.



**Figure I.5:** Capacité des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie.

On cite ci-dessous quelques avantages de l'utilisation de dessalement en Algérie :

- L'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km;
- La mer est une source quasi non polluante et inépuisable.
- La majorité de la population (80%) ainsi que l'industrie qui consomme de grandes quantités d'eau sont situés près de la mer, ce qui réduit encore le coût de l'eau en évitant son transfert.



**Figure I-6:** Capacité des stations de dessalement de l'eau saumâtre en Algérie.

### I.3 Procédés de dessalement

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué : des procédés thermiques, notamment Distillation à Etages Multiples (MSF), Distillation à Multiples Effets (MED), Distillation Membranaire (MD), Distillation par compression de Vapeur (VCD), et des procédés à membrane, à savoir l'osmose inverse OI (RO) et l'électrodialyse (ED).

#### I.3.1 Les procédés thermiques

Les procédés thermiques sont utilisés pour séparer une solution d'eau salée en utilisant le changement de phase de l'eau, de l'état liquide à l'état gazeux. Cela peut être réalisé en augmentant la température ou en diminuant la pression. Une fois l'eau chauffée et évaporée, les sels se précipitent, puis l'eau évaporée est condensée et recueillie pour obtenir de l'eau douce.

##### I.3.1.1 Dessalement par distillation à multiples effets MED

Afin d'améliorer l'efficacité du procédé de distillation et de récupérer la chaleur d'apport pour une nouvelle distillation, une nouvelle méthode a été mise en place pour réduire la consommation spécifique de l'évaporateur à simple effet. Le processus de distillation commence par l'écoulement de l'eau de mer sur un serpentin de tubes chauffés ou sur des plaques dans la première cellule de distillation, qui est chauffée par une chaudière, permettant ainsi à l'eau de mer de se transformer en vapeur à une température de 70°C grâce à une pression inférieure à la pression atmosphérique, évitant ainsi l'entartrage des tuyaux.

L'eau de mer qui n'a pas été transformée en vapeur s'accumule au fond de la cellule et se concentre davantage en sels car ceux-ci ne sont pas vaporisables. Ensuite, l'eau de mer est pompée et envoyée dans la deuxième cellule où la vapeur se condense dans le serpentin,

libérant suffisamment d'énergie pour chauffer l'eau de mer qui ruisselle sur les tubes et se vaporise. Ce processus se répète dans la troisième cellule et peut être répété jusqu'à 6 ou 7 cellules de distillation en série. Enfin, le dernier serpentin est refroidi par l'eau de mer, et la vapeur condensée dans les serpentins donne de l'eau douce. Il faut généralement entre 2 et 4 litres d'eau de mer pour obtenir 1 litre d'eau douce (voir figure I-7).

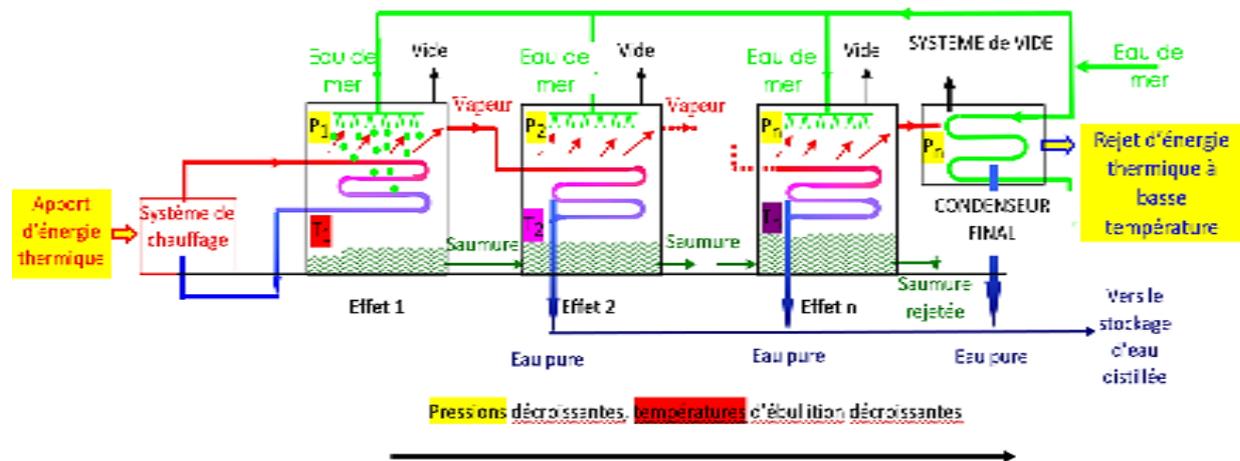


Figure I.7: Procédé de dessalement par distillation à multiples effets MED [13].

### I.3.1.2 Dessalement par distillation multi flash MSF

Le procédé de distillation multi-flash, également appelé MSF, repose sur la vaporisation instantanée de l'eau sous pression réduite. Lorsque l'eau chauffée atteint une température d'environ 120°C, elle est introduite dans une enceinte où la pression est réduite, ce qui entraîne une vaporisation instantanée par détente appelée flash. Ce phénomène est ensuite reproduit dans un deuxième étage où la pression est encore plus basse. Cette vaporisation est réalisée par détentes successives dans une série d'étages où la pression diminue progressivement. Les unités MSF industrielles peuvent comporter jusqu'à 40 étages successifs (voir figure I-8).

### I.3.1.3 Dessalement par compression de vapeur

Le dessalement par compression de vapeur implique la compression de la vapeur d'eau de mer pour la réchauffer avant de la réintroduire dans la même enceinte pour la condenser et faire évaporer une autre quantité d'eau de mer. Cette compression peut être obtenue soit par l'utilisation d'un éjecteur (thermoc compression) soit par un compresseur (compression mécanique de vapeur). La condensation de la vapeur provoque le réchauffement de l'eau salée qui se vaporise sous l'effet d'une diminution de pression. (voir la figure I-9).

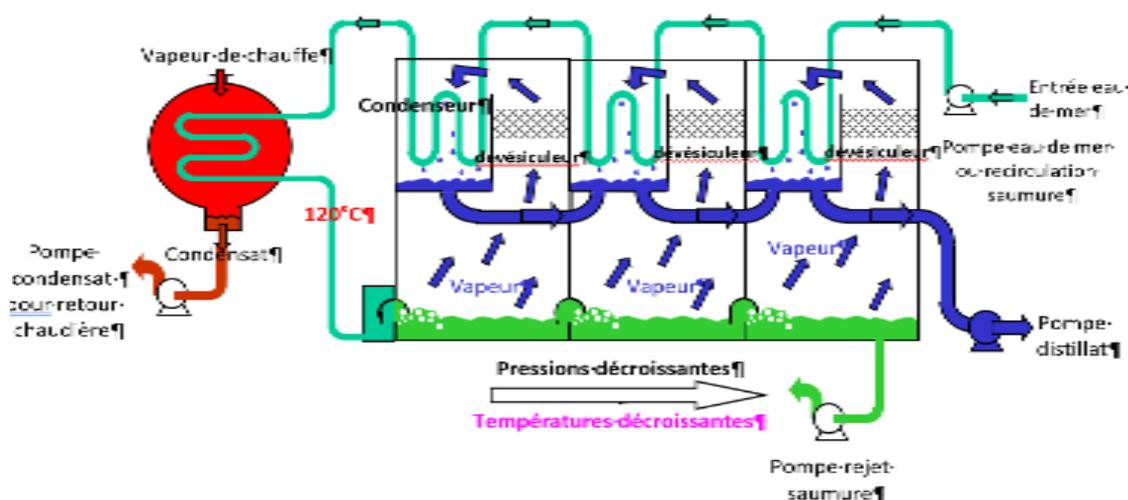


Figure I.8: Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF [13].

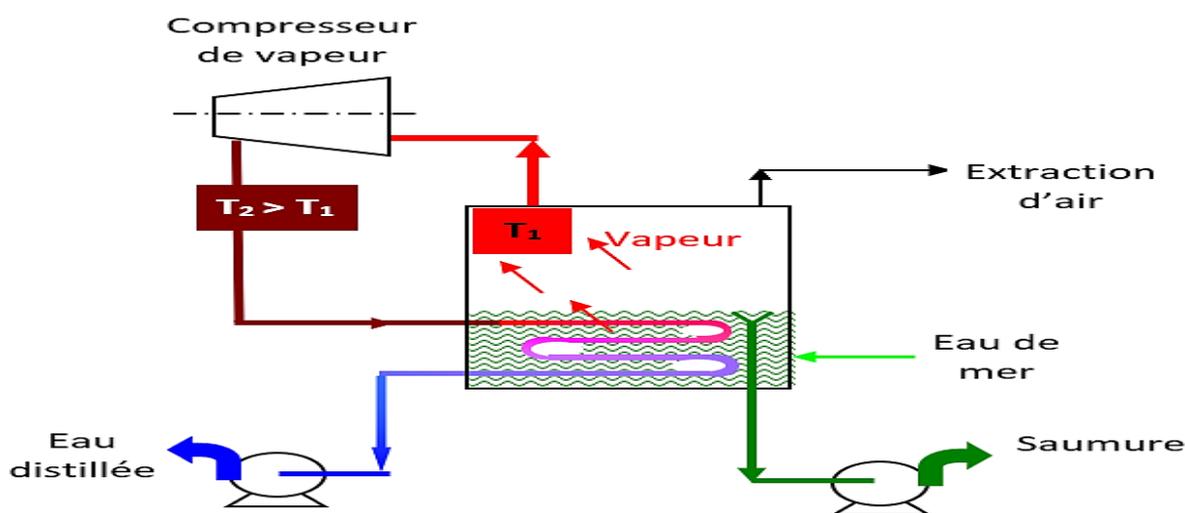


Figure I.9: Procédé de dessalement par compression de vapeur[13].

### I.3.2 Procédés membranaires

#### I.3.2.1 Osmose Inverse

L'osmose inverse est un processus qui permet de séparer l'eau des sels dissous en utilisant des membranes semi-perméables sous l'effet de la pression. Cette technique ne nécessite pas de changement de phase et fonctionne à température ambiante. Les membranes permettent le passage des molécules d'eau, mais pas celui des particules, des sels dissous et des molécules organiques de taille inférieure à 10<sup>-7</sup> mm.

L'osmose inverse ne requiert que de l'énergie électrique, principalement pour les pompes haute pression, et permet d'obtenir de l'eau avec une faible teneur en sels (environ 0,5 g.L<sup>-1</sup>).

Le principe de l'osmose inverse est basé sur le transfert de solvant (l'eau en l'occurrence) à travers une membrane semi-perméable sous l'effet d'un gradient de concentration. Si l'on applique une pression sur la solution concentrée, le flux d'eau diminue jusqu'à ce qu'il s'annule lorsque la pression osmotique est atteinte. En somme, l'osmose inverse permet de contrôler le flux d'eau à travers une membrane en appliquant une pression pour obtenir une eau avec une faible teneur en sels (voir figure I-10).

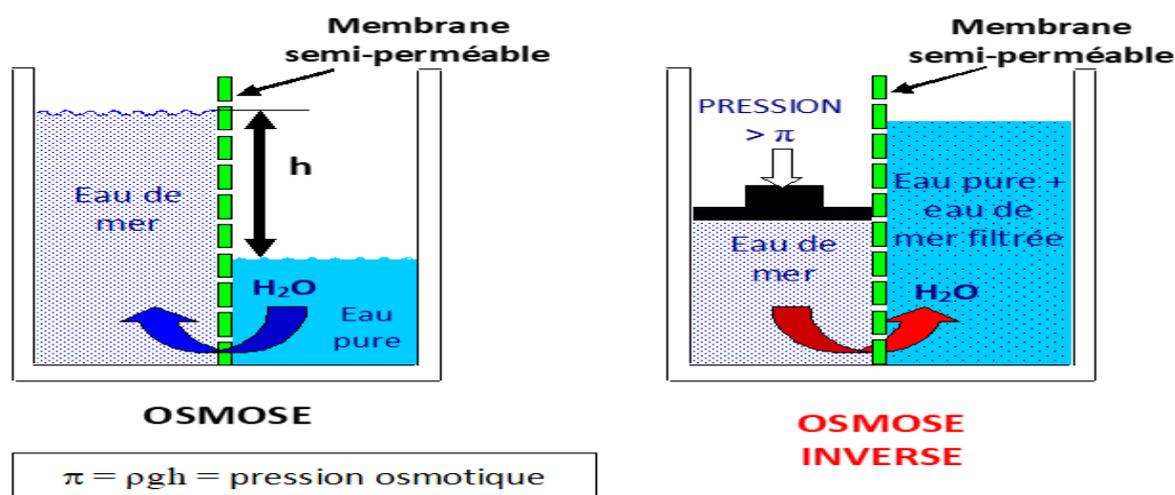


Figure I.10: Procédé de l'osmose inverse [13].

### I.3.2.2 Électrodialyse

La technique de séparation par membrane d'électrodialyse vise à effectuer une séparation électrique des molécules de chlorure de sodium NaCl présentes dans une solution concentrée en ions anions (Cl<sup>-</sup>) et en cations (Na<sup>+</sup>) à l'aide de membranes sélectives (à savoir cationiques ou anioniques). Le procédé est ensuite suivi d'une dialyse via des membranes appropriées qui permettent de séparer l'eau pure des ions produits. Les membranes cationiques sont fabriquées à partir de polystyrène sulfaté, tandis que les membranes anioniques sont produites à partir de polystyrène avec des ammoniums quaternaires (voir la figure I-11).

### I.3.2.3 Distillation membranaire MD

La distillation membranaire (MD) est une technologie innovante en cours de développement qui combine les processus de distillation et de séparation membranaire. Elle permet de récupérer de l'eau douce à partir d'eau salée ou de saumure. Le procédé de distillation membranaire consiste en un transport de vapeur à travers une membrane hydrophobe microporeuse en utilisant la chaleur pour provoquer des mécanismes de transfert de masse et de chaleur [5], Figure I-12 .

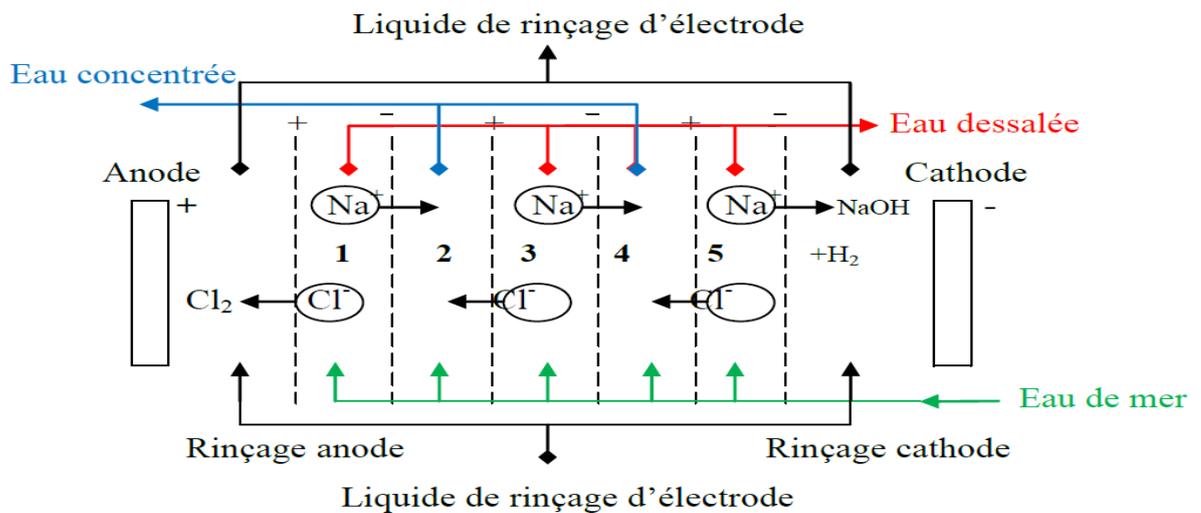


Figure I.11: Procédé de dessalement par électrodialyse [13].

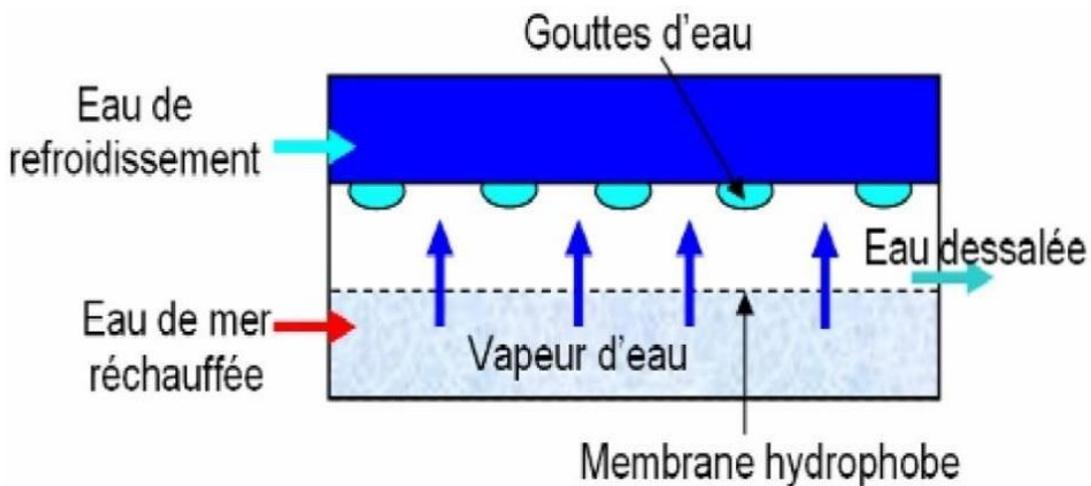
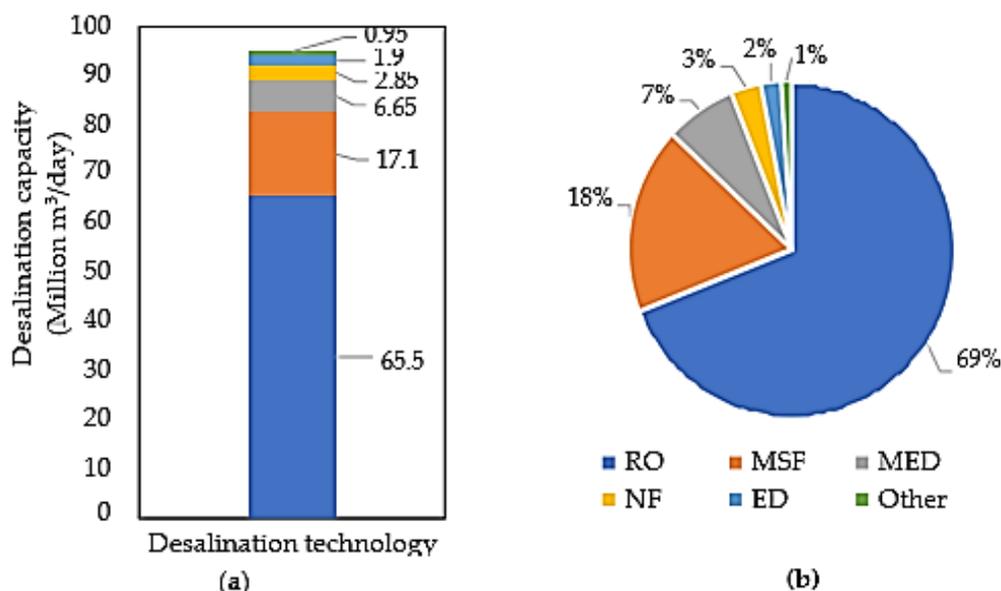


Figure I.12: Schéma de principe de la distillation membranaire MD [13].

### I.4 Comparaison entre les procédés de dessalement

La technologie d'osmose inverse (OI) est actuellement le procédé de dessalement le plus largement utilisé, représentant environ 69,0 % de la production totale (65 Million m<sup>3</sup>/jour). Son efficacité varie en fonction des conditions spécifiques, telles que le coût de l'énergie et la qualité de l'eau brute. Pour les eaux saumâtres, l'osmose inverse nécessite environ 1 à 1,5 kWh par mètre cube d'eau traitée, tandis que pour l'eau de mer, cette consommation énergétique est plus élevée, allant de 4 à 5 kWh par mètre cube d'eau traitée (Figure I-13). La viabilité de chaque technologie dépend donc de ces facteurs, ainsi que d'autres considérations telles que les coûts d'exploitation, les infrastructures disponibles et les besoins en eau de la région [14].



**Figure I-13:** Répartition des technologies de dessalement [14] :

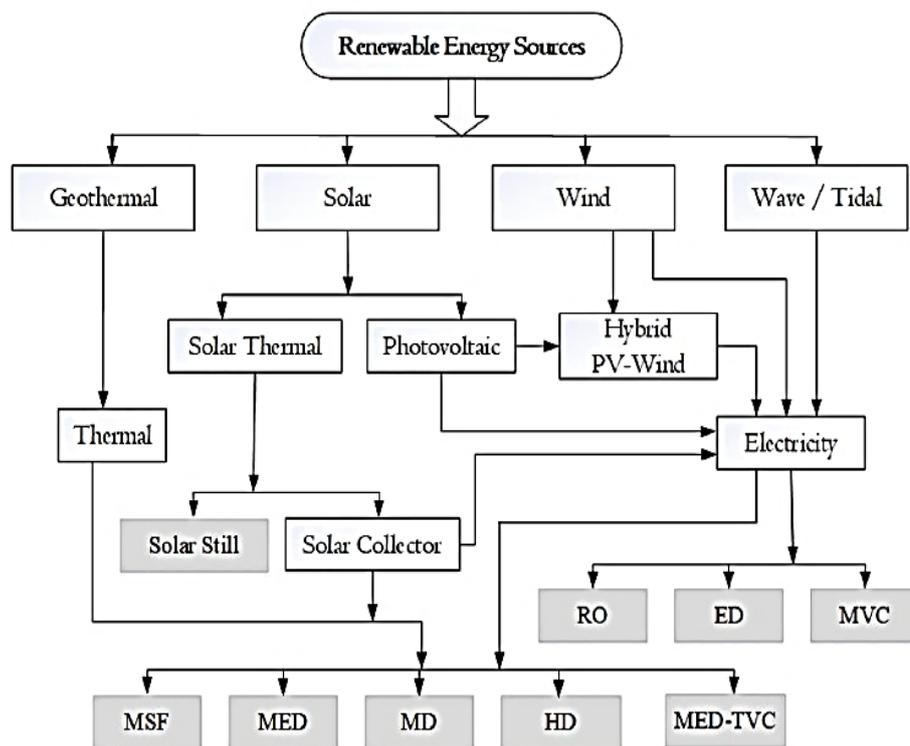
(a) capacité de dessalement (millions de m<sup>3</sup>/jour) et (b) capacité de dessalement (%) (2019).

**Tableau I-1:** Comparaison entre les procédés de dessalement en termes de consommation d'énergie[15].

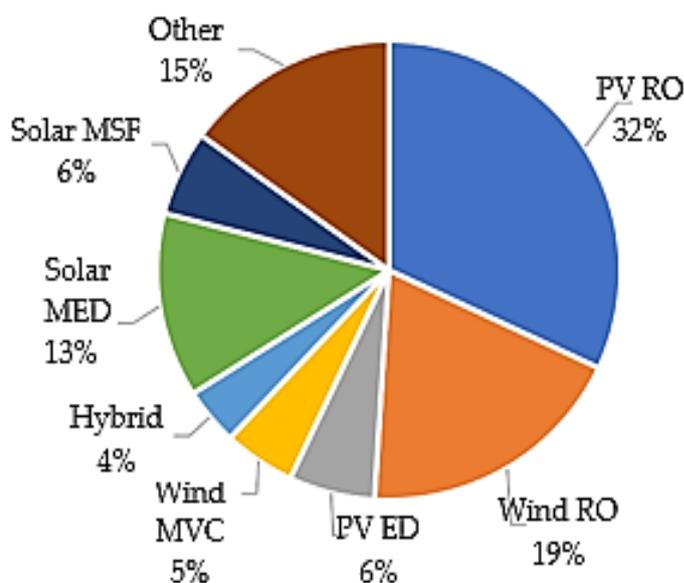
Les procédés	MSF	MED	TVC	OI	ED
Energie thermique (KJ/Kg)	250-300	150-220	220-240	-	-
Energie électrique (KWh/m <sup>3</sup> )	3.5-5	1.5-2.5	1.5-2	5-9	2.6-5.5
L'énergie électrique totale (KWh/m <sup>3</sup> )	15-25	8-20.1	21.5-22	5-9	2.6-5.5

### I.5 Dessalement & Energies renouvelables

Les techniques de dessalement peuvent être alimentées par différentes sources d'énergie renouvelable telles que la géothermie, l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, et même des sources hybrides telles que les systèmes combinant l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne.



**Figure I.14 :** Diagramme des technologies de dessalement basées sur les énergies renouvelables [16].



**Figure I.15 :** Technologies de dessalement basées sur les énergies renouvelables [16].

## I.6 Principaux Travaux sur le Dessalement par Energie Renouvelables

En 1977, **B.A. Akash et al. [17]** ont évalué l'application des technologies non conventionnelles au dessalement (l'hydroélectricité, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et le dessalement nucléaire) dans différents secteurs. Ils ont conclu que les technologies hydroélectriques et solaires sont les plus efficaces pour le dessalement de l'eau, en particulier pour les régions éloignées sans réseau électrique ou le raccordement est coûteux. En revanche, sous critères de durabilité environnementale, ont constaté que les technologies hydroélectriques et solaires peuvent être utilisées dans les secteurs domestique et industriel. D'autre part, les technologies éoliennes et nucléaires ont peu de chances d'être viables à court terme. En 1998, **D. Herold et al [18]** ont effectué une étude de faisabilité sur un système RO/PV ayant une capacité de production moyenne de 3,2 m<sup>3</sup>/j d'eau douce. Sa consommation électrique nominale est de 2,35 kW. Ils ont décrit en détail les caractéristiques techniques de l'installation aussi les contraintes de fonctionnement rencontrées et la consommation énergétique requise. Une brève analyse économique a été réalisée prouvant que les coûts de production de l'eau sont encore élevés (environ 16 \$/m<sup>3</sup>) mais peuvent être abaissés dans l'avenir.

En 2002, **M.Thomson et al [19]** ont réalisé un système d'OI généré par PV sans batterie utilisé pour le dessalement de l'eau de mer (3 m<sup>3</sup>/J ,2,4 kW). L'étude a confirmé que ce système est rentable en assurant une réduction du coût, une amélioration considérable de sa performance comparée aux systèmes RO-PV existants. Cela est dû à la configuration du système, la qualité des autres composants, la dimension appropriée des composants et la stratégie de contrôle adoptée.

En 2002, **A. Sadi et al [20]** ont mené des études expérimentales, sur une station de dessalement par osmose inverse, d'une capacité de 0,85 l/h, installée à Hassi Khebi (Sud-Est de l'Algérie) couplée à un générateur photovoltaïque. L'usine a été acquise dans le cadre de la collaboration entre le CDER (Algérie) et le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA, France). Ils ont présenté l'évolution de la puissance et de la pression en fonction du temps ; les résultats ont été encourageants pendant la période d'expérimentation, donnant un taux de conversion de 40,7%. Par la suite, le taux a chuté à 24% en raison de la négligence et du manque de techniciens qualifiés. Malheureusement, les membranes se sont colmatées, entraînant une perte de production.

En 2005, **S. Bouguecha et al [21]** ont évalué les performances de trois prototypes de dessalement à petite échelle tel que la distillation à multiples effets (MED), l'osmose inverse (RO) alimentée par les panneaux photovoltaïques, et la distillation membranaire (MD) utilisant une ressource géothermique dans le but d'optimiser les paramètres de fonctionnement en fonction de la disponibilité de l'énergie et d'améliorer la faisabilité économique. D'après les résultats expérimentaux, ils ont constaté que les systèmes de dessalement alimentés par PV sont techniquement viables. La faisabilité économique a été prouvée pour MED, mais RO/PV et MD-GW restent des solutions coûteuses. Le coût de l'eau produite est estimé à 0,05 \$ / L pour le MED, 0,08 \$ / L pour le RO-PV et de 0,13 \$ / L pour le MD-GW.

En 2009, **P. Gandhidasan et al [22]** ont mené des travaux expérimentaux basés les performances du système de dessalement d'eau de mer OI-PV pour produire 100 m<sup>3</sup>/jour

d'eau douce. Analyse numérique (ROSA) a été effectuée pour étudier l'influence de la pression d'alimentation sur la performance du système. L'inconvénient du système est la sensibilité des membranes à l'encrassement par la précipitation des sels peu solubles et l'endommagement causés par les composés oxydant présent dans l'eau d'alimentation.

**En 2010, M. Khayet et al [23]** ont mené une étude expérimentale et numérique pour optimiser un pilote d'OI généré par une source solaire PV et thermique pour le dessalement des eaux saumâtres. Débit de perméat et l'indice de performance OI sont plus importants comparés à ceux obtenus par le système OI fonctionnant par un system d'énergie conventionnel. Développement des modèles prédictifs du coefficient de rejet de sel, le débit de perméat et l'indice de performance spécifique OI prend en considération la consommation d'énergie et le facteur de conversion.

**En 2011, D. Abdeslame Dehmas et al [24]** ont présenté une analyse détaillée sur un système de dessalement par osmose inverse d'une capacité  $5000 m^3$  couplé à une ferme éolienne composée de cinq aérogénérateurs de type Bonus 2 MW. Une étude sur les aléas des investissements financiers et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ont été réalisées. Il a été constaté que l'énergie éolienne pourrait alimenter avec succès une usine de dessalement d'eau de mer SWRO dans certaines régions considérée une des plus venteuses d'Algérie ( à Ténès, Chlef ).

**En 2013, E.M.A.Mokheimer et al [25]** ont modélisé un système d'osmose inverse alimenté par énergie hybride solaire-éolienne pour optimiser le coût minimum par mètre cube d'eau produite. Ils ont constaté que le coût énergétique pour un fonctionnement de 12h/j est de 0,624 \$/kWh (40 PV (2kW) et 2 éoliennes (2 kW) avec 6 batteries de 253Ah). Par contre, pour un fonctionnement 24h/24, le coût énergétique est de 0,672 \$/kWh (66 PV (3.3kW) et 6 éoliennes (6 kW) avec 16 batteries de 253Ah). Par conséquent, le coût de mètre cube d'eau dessalée par le système hybride est compris entre 3,693\$/m<sup>3</sup> et 3,812 \$/m<sup>3</sup> en fonction du prix du système OI utilisé ce qui est inférieur à la fourchette de coûts d'eau dessalée rapportée dans la littérature.

**En 2015, Shawky et al [26]** ont testé sur la côte nord-ouest de l'Egypte un prototype de dessalement d'OI mobile couplé à un système PV sans stockage d'énergie pour une production d'eau potable de 5 m<sup>3</sup>/jour. Ils ont maximisé le rendement énergétique en utilisant un système de suivi intégré à un axe automatique avec réglage programmé de l'angle d'inclinaison. Aussi, un système de nettoyage autonome des modules PV a été adopté pour maximiser l'efficacité énergétique. Ce prototype PV-OI fonctionne au fil du soleil pendant les heures de pointe du soleil en produisant une quantité minimum d'eau douce. Les résultats montrent que les eaux d'alimentation souterraines salées de conductivité 10930 µs/cm dessalées jusqu'à 53,7 µs/cm d'eau de perméat dont la consommation d'énergie spécifique est de 1,7 kwh/m<sup>3</sup>.

**En 2016, Z. Tigrine et al [27]** ont mené une étude expérimentale, sur un système de dessalement par osmose inverse, d'une capacité de 84 L/h, installé à l'UDES (Bou-Ismaïl, Tipaza) couplé avec un générateur photovoltaïque. La consommation d'énergie spécifique moyenne du système considéré est de l'ordre de 3 kWh nécessitant 20 panneaux PV monocristallins de 150 Watt. Le système a démontré que le dessalement de l'eau saumâtre nécessite une valeur de pression inférieure à 30 bars.

**En 2016, A. Diaf et al [28]** ont étudié l'effet de température sur la performance de la distillation multi-étage. Les résultats ont montré que la température la plus élevée atteinte

avec le système de chauffage solaire a été de 77 °C. D'un point de vue économique et en considérant le scénario le plus défavorable, le coût de l'eau distillée produite avec l'équipement solaire a été estimé à 16 DA par litre contre 45 DA par litre pour un produit commercial de qualité similaire.

**En 2019, W.Khiari et al [29]** ont développé et validé une nouvelle stratégie de contrôle de puissance PFOC (Power Field Oriented Control) permettant de faire fonctionner correctement un banc de test de dessalement d'eau saumâtre par osmose inverse (BWRO) en utilisant des sources renouvelables hybrides isolées (PV/éolienne) sans batteries. Les performances expérimentales ont été testées dans différents modes de fonctionnement tout en respectant Safe Operating Window (SOW) pour le processus de dessalement.

**En 2020, Ahmed Hadji et al [30]** ont présenté une étude d'un système de distillation à effets multiples (MED) modifié pour le traitement de l'eau souterraine salée dans le désert Algérien. L'objectif principal de la modification est de minimiser l'empreinte hydrique et de préserver l'aquifère pour une utilisation durable. La modification consiste à remplacer le dernier condenseur d'eau par un condenseur hybride qui utilise à la fois de l'eau et de l'air pour condenser la vapeur. Les performances du système MED modifié ont été évaluées en termes de taux de récupération, de flexibilité avec différentes concentrations de sel, de besoins en énergie thermique et de robustesse. Les résultats montrent que l'utilisation d'un condenseur hybride permet d'obtenir une empreinte hydrique minimale, exprimée par un rapport eau de refroidissement jusqu'à 18 fois inférieur à celui d'un système de condenseur d'eau standard. Cette configuration est applicable pour une température de saumure supérieure à 75°C jusqu'à 100°C. Le système MED modifié permet également de réduire le rejet d'eau de refroidissement à zéro et de limiter le rejet de saumure à 4% à 10%, ce qui est satisfaisant pour une exploitation durable de l'aquifère dans le désert Algérien.

**En 2021, Mohamed Abdelgaied et al [31]** ont mené une modélisation des performances d'un nouveau système de dessalement hybride humidification-déshumidification-osmose inverse (HDH-OI) alimenté par des panneaux photovoltaïques. Le système est équipé d'une unité de récupération d'énergie thermique pour refroidir les panneaux et préchauffer simultanément l'eau de mer. La consommation d'énergie spécifique du système est entre 1,22 et 1,24 kWh/m<sup>3</sup>, avec une économie moyenne comprise entre 14,7 et 65% par rapport à la technique d'OI.

**En 2021, A. M. Soliman et al [32].** Dans ce travail une étude théorique sur des systèmes solaires photovoltaïques (PV) et éoliens à axe horizontal (HWT) ont été utilisés pour alimenter un processus de dessalement par osmose inverse (OI) afin de produire de l'eau douce de grande capacité. En outre, une étude a été menée sur un système hybride PV-HWT combiné à l'OI. Les systèmes proposés sont comparés techniquement et économiquement au cycle solaire organique de Rankine pour l'OI. Des méthodes d'optimisation technique et analytique ont été appliquées pour minimiser le coût unitaire du produit (USD/ m<sup>3</sup> ). Les résultats ont révélé que l'OI alimentée par l'énergie photovoltaïque est recommandée par rapport à l'exploitation de l'énergie éolienne.

Cependant, pour les grandes capacités, les exploitations thermiques et éoliennes dominent toutes deux.

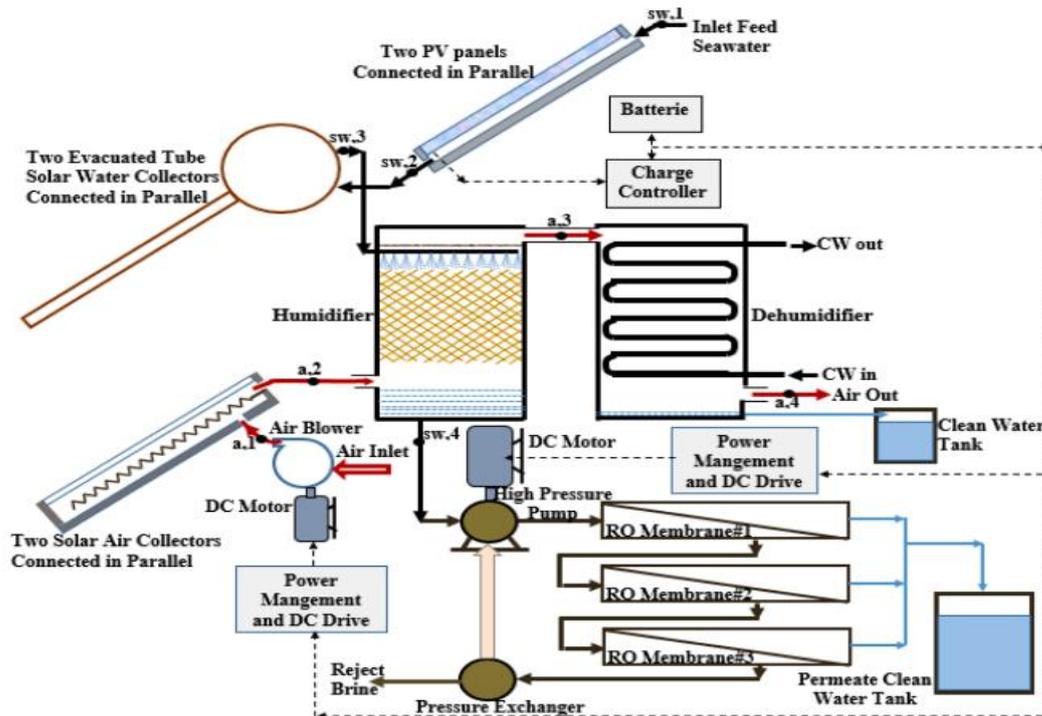


Figure I.16 : Schéma du système de dessalement hybride HDH-RO [31].

En 2022, Christos-Spyridon Karavas et al [33] ont développé un code de calcul innovant pour la conception optimale (économiquement et techniquement) de systèmes de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse pour la production durable d'eau destinée à l'irrigation des cultures. Ce système permet à l'unité d'OI de fonctionner à charge variable et détermine son point de fonctionnement optimal en utilisant des techniques d'intelligence computationnelle basées sur des cartes cognitives floues. Selon les résultats, la mise en œuvre du code de calcul pour la conception du système PV-OI présente le coût le plus bas par rapport au système conçu avec la méthodologie conventionnelle. En effet, le système de dessalement, fonctionnant uniquement à charge nominale, conçu par l'outil de calcul, présentait un NPC inférieur de près de 25 % par rapport à la méthode de conception conventionnelle, et le système fonctionnant à charge variable présentait un NPC inférieur de près de 39 % par rapport à la méthode de conception conventionnelle.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous proposons une perspective globale et approfondie de l'importance du dessalement de l'eau et de son intégration avec les énergies renouvelables. Les progrès technologiques et les opportunités offertes par l'utilisation des sources d'énergie renouvelables ont été mis en évidence. En mettant en avant les efforts de recherche et les projets concrets réalisés dans le domaine du dessalement en Algérie, c'est dans ce contexte que s'inscrit notre démarche en réalisant un système de dessalement

alimenté par énergies renouvelable pour répondre aux besoins en eau potable et en énergie dans une région aride et isolée. Cette étude approfondie fournit des informations essentielles pour sensibiliser et promouvoir l'intégration du dessalement de l'eau avec les énergies renouvelables, dans le but d'assurer un approvisionnement durable en eau pour les populations.

## Référence :

- [1] <https://reliefweb.int/map/world/water-stress-country>.
- [2] Pérez-González, A., Urriaga, A.M., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*, 46(2), 267-283. doi: 10.1016/j.watres.2011.11.062 .
- [3] <https://dessalement.wordpress.com>
- [4] Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., & Kang, S.M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, 1343-1356. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076
- [5] Mekki, M., benhafid. M.S. Dessalement de l'eau de mer et son impact sur l'environnement.
- [6] Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens: évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure
- [7] Eyl-Mazzega, M.-A., & Cassagnol, É. (2022). Géopolitique du dessalement d'eau de mer. *Études de l'Ifri*.
- [8] Tigrine, Z., Aburideh, H., Abbas, M., Hout, S., Merzouk, N.K., Zioui, D., & Khateb, M. (2018). Membrane Desalination Technology in Algeria: Reverse Osmosis for Coastal Areas. In *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 2: Applications* (pp. 197-218).
- [9] Frenken, K. . Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Retrieved from
- [10] Chabour, N., Mebrouk, N., Hassani, I., Upton, K., Dochartaigh, B., & Howard, I.B. (2018). *Africa Ground Water Atlas: Hydrogeology of Algeria*. British Geological Survey, Nottingham, UK.
- [11] Hached, A. (2015). Le Dessalement d'eau de mer: Un Apport Précieux à la Sécurité Hydrique Nationale. *Revue Algérienne de l'Énergie*, Algiers, Algeria.
- [12] Himri, Y., Rehman, S., Mostafaeipour, A., Himri, S., Mellit, A., Merzouk, M., & Merzouk, N.K. (2022). Overview of the Role of Energy Resources in Algeria's Energy Transition. *Energies*, 15(13), 4731. doi: 10.3390/en15134731 .
- [13] <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux>.
- [14] Anand, B., Shankar, R., Murugavelh, S., Rivera, W., Prasad, K.M., & Nagarajan, R. (2021). A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110787. doi: 10.1016/j.rser.2021.110787
- [15] Gude, V.G., Nirmalakhandan, N., & Deng, S. (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2641-2654. doi: 10.1016/j.rser.2010.06.012
- [16] Cherif, H., & Belhadj, J. (2018). Environmental Life Cycle Analysis of Water Desalination Processes. In V.G. Gude (Ed.), *Sustainable Desalination Handbook* (pp. 527559). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.

- [17] Pérez-González, A., Urtiaga, A.M., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*, 46(2), 267-283. doi: 10.1016/j.watres.2011.11.062
- [18] <http://www.kezakeau.fr/enseignants/une-r%C3%a9partition-naturellein%C3%a9gale>.
- [19] Seghairi, N. (1998). Possibilités de rétention des matières organiques par adsorption sur la bentonite. Thèse de Magister en Sciences Hydrauliques. Université de Biskra.
- [20] <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/le-dessalement-de-leau-de-mer-et-des-eaux-saumates-840#d0e125>.
- [21] *Technique de l'eau*, Mémento Ed. Degremont. (1978).
- [22] Gandhidasan, P., & Al-Mojel, S.A. (n.d.). Effect of feed pressure on the performance of the photovoltaic-powered reverse osmosis seawater desalination system.
- [23] Khayet, M., Essalhi, M., Armenta-Déu, C., Cojocar, C., & Hilal, N. (2016). Optimization of solar-powered reverse osmosis desalination pilot plant using response surface methodology. *Desalination*, 377, 123-127. doi: 10.1016/j.desal.2015.11.006
- [24] Dehmas, A.S.D., Kherba, N., Boukli Hacene, F., Kasbadji Merzouk, N., Merzouk, M., Mahmoudi, H., & Goosen, M.F.A. (2011). On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 956-963. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.014
- [25] Mokheimer, E.M.A., Sahin, A.Z., Al-Sharafi, A., & Ali, A.I. (2013). Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 75, 86-97.
- [26] Shawky, H.A., Adbdelah, A.A., Fateh, Moustafa, A., & Elfadel, A. (n.d.). Design of a small mobile PV-driven RO water desalination plant to be deployed at the northwest coast of Egypt.
- [27] Tigrine, Z., Kasbadji Merzouk, N., Aburideh, H., Abbas, M., Zioui, D., Belhout, D., & Hout, S. (n.d.). Pilot-scale reverse osmosis for brackish and seawater desalination coupled with renewable energy.
- [28] Diaf, A.C., Cherfa, A., Karadaniz, L., & Tigrine, Z. (2016). A technical-economical study of solar desalination. *Desalination*, 377, 123-127. doi: 10.1016/j.desal.2015.11.006
- [29] Khiari, W., Turki, M., & Belhadj, J. (2019). Power control strategy for PV/Wind reverse osmosis desalination without battery. *Control Engineering Practice*, 89, 169-179. doi: 10.1016/j.conengprac.2019.06.004
- [30] Hadji, A., Merzouk, N.K., Merzouk, M., Alexopoulos, S., & Tigrine, Z. (2021). Study of a modified multiple-effect distillation (MED) brackish water system for a minimal water footprint. *Desalination and Water Treatment*, 231, 17-29. doi: 10.5004/dwt.2021.27151
- [31] Abdelgaied, M., Kabeel, A.E., Kandeal, A.W., Abosheisha, H.F., Shalaby, S.M., Hamed, M.H., Yang, N., & Sharshir, S.W. (2021). Performance assessment of solar PV-driven hybrid HDH-RO desalination system integrated with energy recovery units and solar collectors: Theoretical approach. *Energy Conversion and Management*, 243, 114215. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114215
- [32] Soliman, A.M., Alharbi, A.G., & Sharaf Eldean, M.A. (2021). Techno-Economic Optimization of a Solar-Wind Hybrid System to Power a Large-Scale Reverse Osmosis Desalination Plant. *Sustainability*, 13, 11508. doi: 10.3390/su132011508
- [33] Karavas, C.-S., Dimitriou, E., Balafoutis, A.T., Manolacos, D., & Papadakis, G. (2022). Development of a computational tool for the design of seawater reverse osmosis desalination systems powered by photovoltaics for crop irrigation. *Green Energy and Sustainable Systems*, 1(1), 1-16. doi: 10.3390/green1010001.

## **Chapitre II**

### **MISE EN EQUATIONS DU SYSTEME**

## II.1 Introduction

Le présent chapitre porte sur la mise en équation du système étudié. En premier lieu, nous présenterons l'installation étudiée et puis nous procéderons à la présentation des systèmes à savoir : l'osmoseur, le système PV et l'éolien. La modélisation de l'osmoseur est présentée, ainsi que les méthodes de calcul et d'optimisation du champ PV et de l'éolienne.

## II.2 Description de l'installation

Nous étudions deux systèmes de dessalement par osmose inverse couplés à des sources d'énergie renouvelable. Le premier système utilise l'énergie solaire, où l'osmose inverse est alimentée par un générateur PV. Les panneaux solaires convertissent l'énergie solaire en électricité pour alimenter le processus de dessalement. Le deuxième système utilise l'énergie éolienne, où l'osmose inverse est couplée à une éolienne. L'énergie cinétique du vent est transformée en électricité pour alimenter la même installation. Ces systèmes démontrent l'utilisation pratique des énergies renouvelables pour produire de l'eau douce à partir d'eau salée.

### II.2.1 L'osmoseur

L'osmose inverse consiste à faire passer l'eau à travers des membranes semi-perméables, sous l'effet d'une pression différentielle, de la solution concentrée à la solution diluée. Dans le système membranaire, l'eau d'alimentation est divisée en un produit à faible teneur en sel, appelé perméat, et une solution à forte teneur en sel, appelée concentré, saumure ou flux de rejet. Le taux d'élimination est exprimé en pourcentage de la salinité totale. La réduction de salinité de l'eau saumâtre est supérieure à 92% contre plus de 98,5% pour l'eau de mer [1], figure II-1.

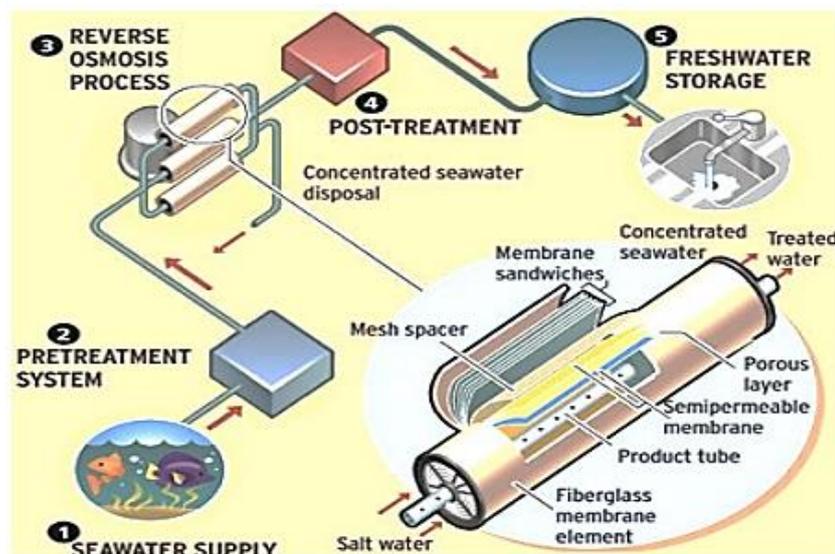


Figure II-1: Etapes du dessalement par OI [2].

Le processus d'osmose inverse comprend les étapes suivantes :

- Prélèvement ou la prise d'eau
- Système de prétraitement
- Système de pompage
- Unité de séparation membranaire (traitement membranaire)
- Post-traitement.

#### **A. Prélèvement d'eau de mer ou saumâtre**

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g/L (27,2 g/L de NaCl, 3,8 g/L de MgCl<sub>2</sub>, 1,7 g/L MgSO<sub>4</sub>, 1,26 g/L CaSO<sub>4</sub>, 0,86 g/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Dans le cas de mers fermées : mer Méditerranée : 36 à 39 g/L, mer Rouge : environ 40 g/L, mer Caspienne : 13 g/L, mer Morte : 270 g/L, Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g/L. Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4, l'eau de mer est un milieu légèrement basique [3].

L'eau saumâtre est une eau salée non potable dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Il s'agit parfois des eaux de surface, mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Sa composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO<sub>3</sub>, le CaSO<sub>4</sub>, le MgCO<sub>3</sub> et le NaCl [3].

#### **B. Prétraitement**

En raison de la sensibilité de la membrane d'osmose inverse au colmatage et où à l'encrassement, une eau d'alimentation de haute qualité est nécessaire pour garantir des performances stables à long terme. Le prétraitement physique ou chimique, y compris toutes les activités visant à ajuster la constitution et les valeurs pH de l'eau, est donc essentiel pour le fonctionnement de l'usine afin d'éviter le colmatage du filtre semi-perméable. Afin de prévenir le colmatage des membranes d'OI, plusieurs techniques de prétraitement existent : les prétraitements conventionnels et les prétraitements membranaires [4].

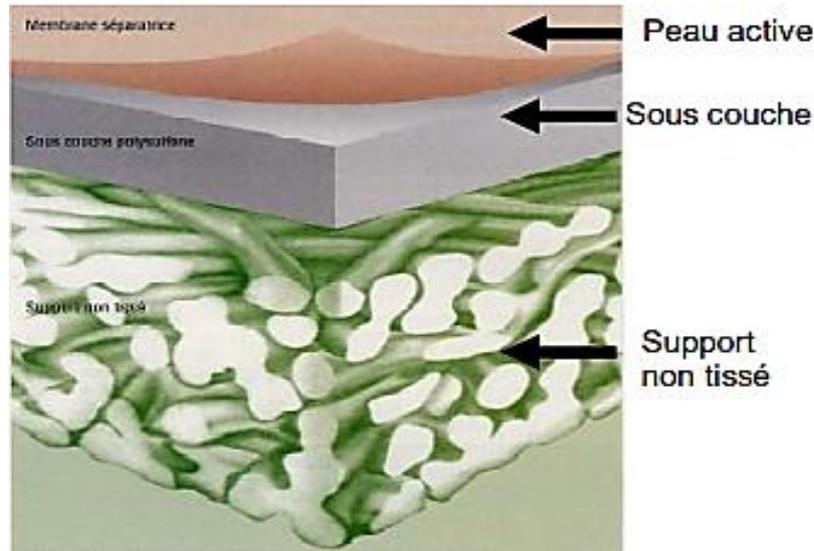
#### **C. Système de pompage**

Le système de pompage est nécessaire pour surmonter les différences de hauteur dans la chaîne de distribution et pour appliquer la pression osmotique requise pour alimenter les membranes [5].

#### **D. Unité de séparation membranaire (Traitement)**

Dans le cas de la filtration membranaire, la membrane est une structure poreuse avec des pores de l'ordre de 0,1 à 10 µm pour la microfiltration, 10 nm à 1 µm pour l'ultrafiltration, quelques nm pour la nanofiltration et une structure dense pour l'osmose inverse [6]. Les membranes utilisées sont donc asymétriques (plusieurs couches d'épaisseurs différentes) et composites (plusieurs matériaux différents).

Les membranes sont généralement constituées de 3 couches, comme le montre la figure II.2. Elles se caractérisent par leur stabilité chimique (pH, oxydants, chlore, etc.) [7], leur stabilité thermique (un facteur important pour les applications biologiques impliquant une stérilisation en autoclave), leur stabilité microbiologique et leur résistance mécanique, [8].



**Figure II.2:** Structure d'une membrane organique plane et asymétrique en polyamide [8].

Pour être utilisées, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Une enceinte résistante à la pression est toujours nécessaire. Il existe quatre types de modules :

- Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples. Elles sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides [9].
- Le module tubulaire figure II.3 qui contient plusieurs tubes en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes forment des canaux d'écoulement tangentiel [9].
- Les modules à fibres creuses qui contiennent plusieurs milliers de fibres d'un diamètre d'environ 1 mm. Les faisceaux ainsi obtenus sont collés aux extrémités afin d'assurer l'étanchéité entre le compartiment du perméat et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur ou à l'extérieur des fibres creuses, en fonction de la peau [9].
- Les modules spiralés qui sont des membranes plates enroulées autour d'un axe creux de collecte du perméat. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique dont les sections transversales donnent accès à l'entrée de l'alimentation et à la sortie du retentât [9] figure II.4.

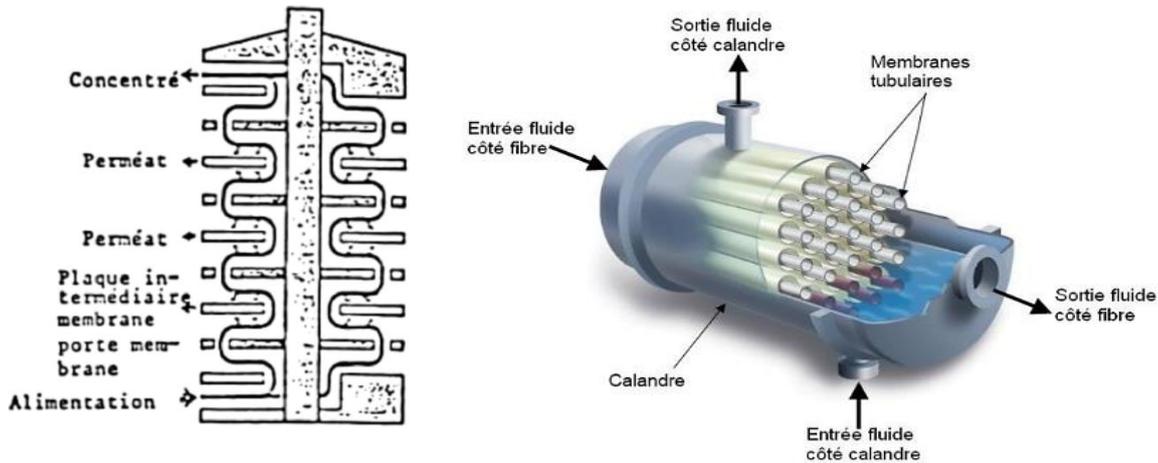


Figure II.3: Modules d'osmose inverse [9].

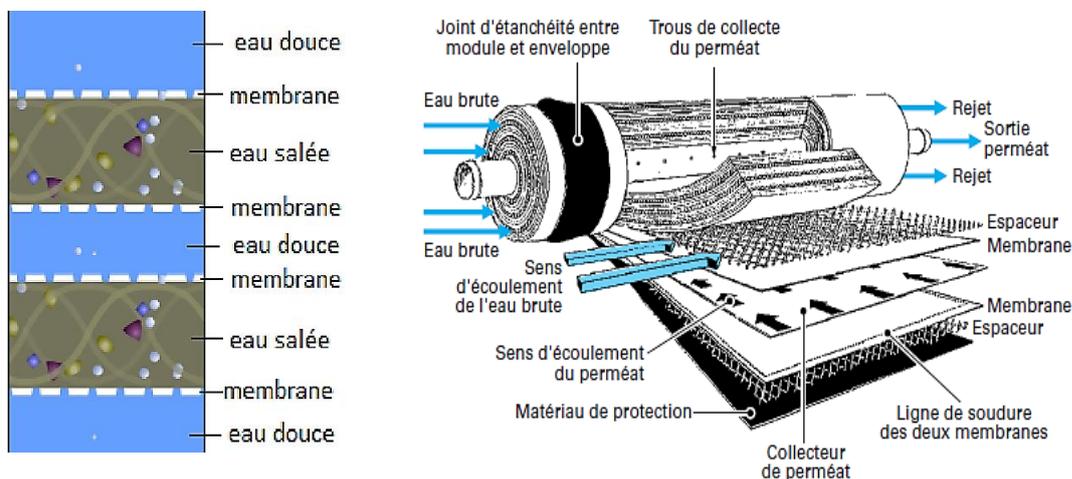


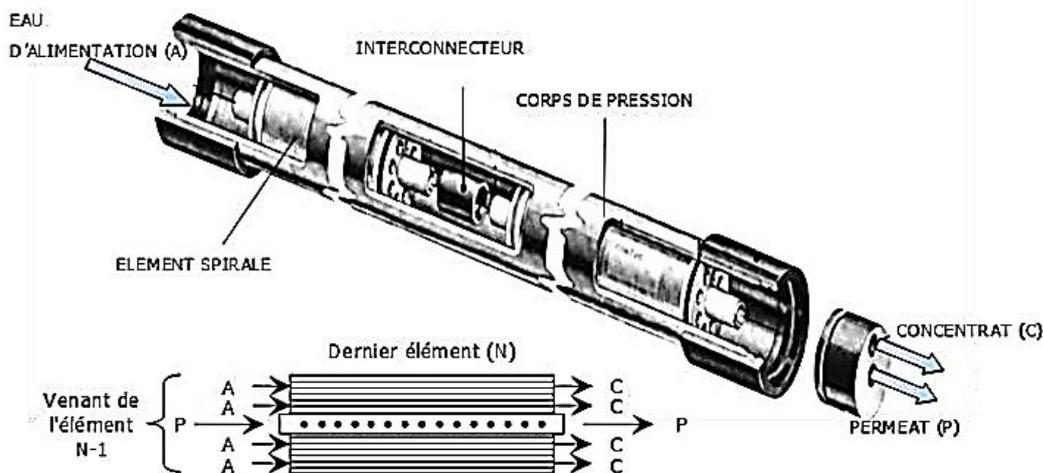
Figure II.4: Modules spirales [3].

### E. Tube de pression (Carter)

Les membranes sont installées dans des tubes de pression figure II.5. Etant que les éléments sont alimentés en série et que la production de perméat se fait en parallèle, le premier élément sera alimenté par de l'eau moins saline que le dernier, donc la pression osmotique va augmenter du premier au dernier élément, le différentiel entre pression d'alimentation et pression osmotique va donc diminuer, ce qui entraîne une baisse de production d'un élément à l'autre [10].

Etant donné que les éléments sont alimentés en série et que la production de perméat se fait en parallèle, le premier élément sera alimenté avec moins d'eau saline que le dernier, donc la pression osmotique augmentera du premier au dernier élément, le différentiel entre

la pression d'alimentation et la pression osmotique va donc diminuer, ce qui entraîne une baisse de production d'un élément à l'autre [10].



**Figure II.5:** Emplacement des éléments dans un corps de pression [10].

### F. Éléments influant sur la qualité des membranes

Il est très difficile de déterminer exactement la durée de vie des membranes d'osmose inverse. En effet, la durée de vie dépend de la nature de la membrane mais aussi des conditions d'utilisation, telles que la pression de fonctionnement ; la température de l'eau, le pH de l'eau et la qualité du prétraitement.

Les performances d'une membrane d'osmose inverse évoluent lentement au cours du temps et les membranes sont généralement remplacées lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil. Mais pour différentes raisons, l'exploitant (l'opérateur) peut très bien augmenter la durée de vie des membranes en faisant fonctionner l'installation au-delà de ce seuil [11].

Le colmatage qui est défini comme l'ensemble des phénomènes qui modifient les propriétés filtrantes d'une membrane, à l'exception du compactage et de la modification chimique se produit à l'interface membrane-solution, entraînant l'obstruction des pores et des variations de la perméabilité et de la sélectivité [12]. Les différents types de colmatage sont :

les dépôts minéraux qui correspondent au phénomène d'entartrage (Scaling), les dépôts organiques constitués principalement de matière en suspension, l'acide humique, le bioencrassement (Biofouling), dû à des micro-organismes (bactérie, micro-algue, champignon) et les dépôts colloïdaux qui correspondent à la silice, soufre, hydroxydes de fer, de manganèses d'aluminium [13].

### **II.2.2 . Description d'un Système photovoltaïque autonome couplé à l'osmose inverse**

Dans notre étude, nous avons choisi un système photovoltaïque autonome pour alimenter un système de dessalement de l'eau par osmose inverse (figure II.6). Le générateur solaire choisi pour l'étude, est composé de plusieurs composants essentiels, notamment les modules PV les batteries, le régulateur, l'onduleur et les câbles électriques, (figure II.6).

Les modules photovoltaïques ont une puissance allant de quelques watts crête à plusieurs dizaines de watts crête. Afin d'obtenir des puissances plus élevées, les modules doivent être combinés en série et en parallèle pour former un générateur photovoltaïque.

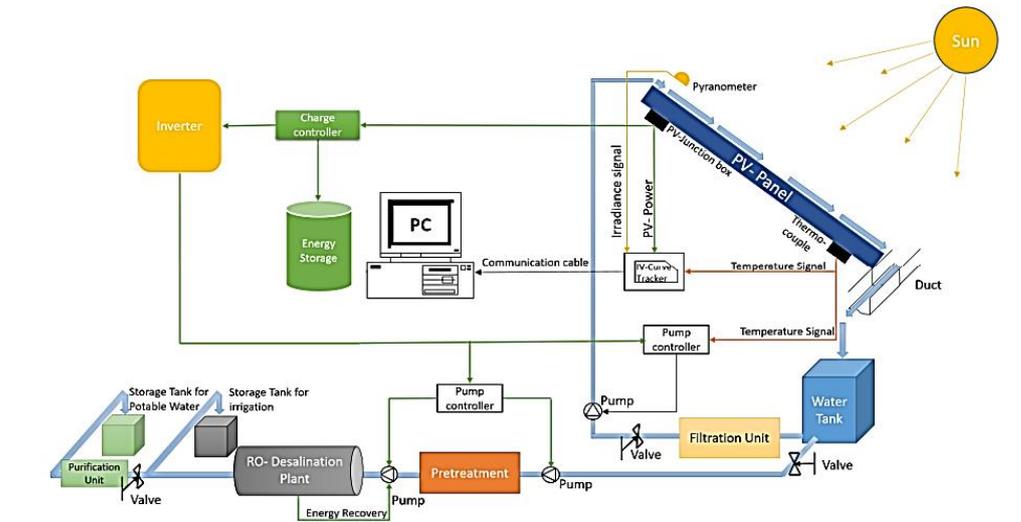
Le système solaire étant autonome, le stockage sert à fournir de l'électricité à l'installation lorsque le générateur PV ne produit pas suffisamment, par exemple la nuit ou par temps nuageux. La deuxième fonction est de fournir des puissances plus élevées que celles produites par le générateur PV. La capacité d'une batterie est mesurée en Ampères-heures, ce qui correspond au nombre d'ampères fournis par la batterie multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles le courant circule. Certains facteurs peuvent affecter la capacité d'une batterie, notamment les rapports de chargement et de déchargement, la température, la durée de vie [14], la profondeur de décharge et le régulateur. Ce dernier sert à contrôler l'intensité de courant qui passe par les accumulateurs, les protégeant contre les surcharges et les décharges profondes, afin de maximiser sa durée de vie. Le régulateur permet également d'effectuer un transfert optimal de l'énergie du champ photovoltaïque vers la charge [15].

Un onduleur dont le rôle de l'onduleur est de transformer l'énergie électrique continue délivrée par le générateur photovoltaïque en énergie électrique alternative est installé. En effet, il existe deux types d'appareils alimentés par le système : ceux qui fonctionnent en courant continu, comme les équipements de télécommunication et le pompage de l'eau, et ceux qui fonctionnent en courant alternatif, ce qui nécessite un onduleur [16].

### **II.2.3 . Description d'un système éolien couplé avec l'OI**

Le couplage de l'énergie éolienne avec l'osmose inverse offre une possibilité prometteuse d'alimenter les systèmes de désalinisation en utilisant une source d'énergie renouvelable. Cependant, une planification minutieuse et une évaluation approfondie des besoins énergétiques et des caractéristiques du vent sont nécessaires pour assurer l'efficacité et la fiabilité du système.

Cette étude a utilisé le logiciel Wasp pour analyser les ressources en énergie éolienne destinées à la désalinisation par osmose inverse de l'eau Saumâtre dans la région de Djamaa EL oued. L'objectif était d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de l'énergie éolienne pour la désalinisation.

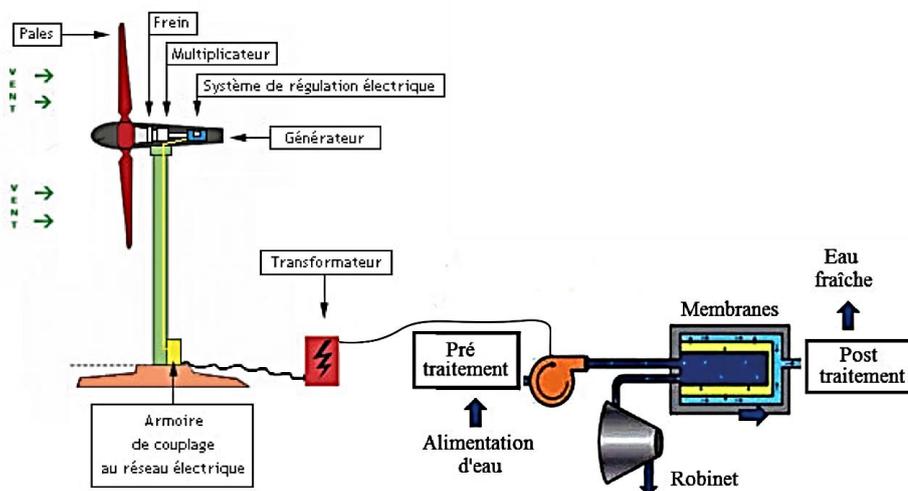


**Figure II.6:** Schéma de principe d'un système photovoltaïque couplé par osmose inverse [17].

L'objectif de cette étude est de proposer la production d'électricité à partir d'un parc éolien pour alimenter une usine de désalinisation par osmose inverse d'une capacité quotidienne de 4 m<sup>3</sup>/jour.

Un aérogénérateur, ou éolienne, est utilisé pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour réaliser cette conversion, l'éolienne utilise le principe de l'induction électromagnétique. Elle est composée d'un rotor mobile et d'un stator fixe, qui créent un champ magnétique et génèrent ainsi un courant électrique. L'éolienne est équipée d'une girouette pour orienter les pales en fonction de la direction du vent, et elle doit être solidement fixée au sol [18].

L'énergie électrique produite par l'éolienne peut être utilisée pour alimenter le système d'osmose inverse ( figure II.7).



**Figure II.7:** Système éolien couplé par l'osmoseur (OI).

## II.3 . Modélisation

### II.3.1 . Principaux paramètres de fonctionnement du procédé membranaire

Soit une membrane placée dans un tube dédié à la filtration par osmose inverse, où pénètre une eau d'alimentation avec un débit d' $Q_A$ . Une fois l'eau filtrée, une eau pure, appelée perméat, est obtenue avec un débit  $Q_P$  (figure II.8). L'eau qui ne traverse pas la membrane et qui contient les molécules retenues est appelée concentrât ou saumure. Son débit est  $Q_C$  [19]. La conservation des débits permet d'écrire :

$$Q_A = Q_P + Q_C \quad \text{II.1}$$

La fraction de débit du liquide qui traverse la membrane, est appelée taux de conversion de l'opération de séparation est estimé à partir de l'équation suivante.

$$Y(\%) = \frac{Q_P}{Q_A} \times 100 \quad \text{II.2}$$

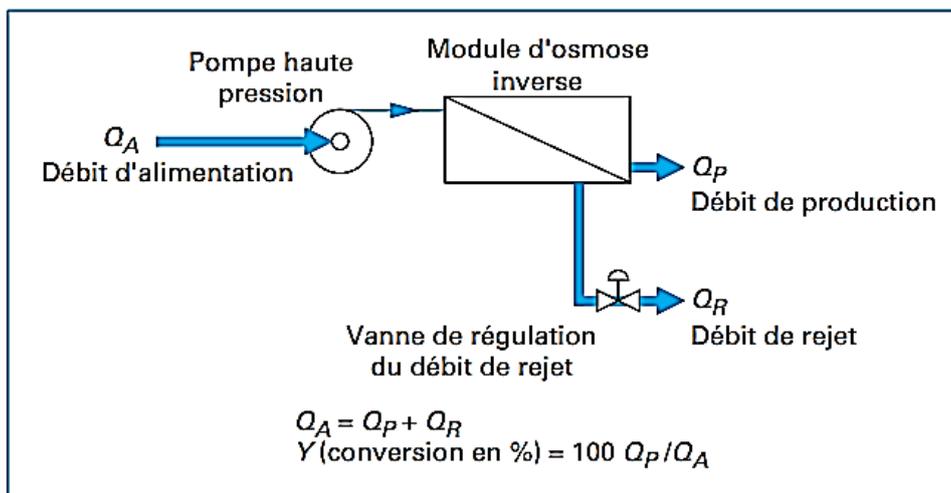


Figure II.8: Unité élémentaire d'osmose inverse [19].

#### A. Estimation de l'énergie requise pour le dessalement

L'énergie nécessaire  $E_C$  pour pressuriser l'eau d'alimentation dans le système d'osmose inverse est fonction de la puissance  $P$  et du temps de conversion tel que :

$$E_C = P \times t \quad \text{II.3}$$

Où la puissance est déterminée par :

$$P = \frac{Q_A \times \Delta P \times t}{\eta_p} \quad \text{II.4}$$

$\Delta P$  : Pression de pompage.

$\eta_p$  : Efficacité hydraulique de la pompe, environ 80-90 %.

La pression de fonctionnement  $\Delta P$  peut dépendre de la sélectivité souhaitée pour la membrane, et doit impérativement être supérieure à la pression osmotique  $\Delta\pi$ , ( $\Delta P > \Delta\pi$ )

En effet

$$\Delta P = \Delta\pi + P_{loss} \quad \text{II.5}$$

$P_{loss}$  : Sont les Pertes de charge due à l'écoulement de l'eau dans les tuyauteries amont des modules et le long de la membrane.

En réalité, la pression réelle appliquée à une membrane d'osmose inverse est la pression osmotique ( $\Delta\pi$ ). Cette pression est directement liée à la concentration du soluté (C). Selon la loi des gaz parfaits, la pression osmotique peut s'écrire comme suit :

$$\Delta\pi = \frac{n}{V_S} RT \quad \text{II.6}$$

Avec :

$n$  : Quantité molaire (mol).

$V_S$  : Volume du soluté ( $m^3$ ).

$T$ :Température de l'eau (K).

$R$  : Constante des gaz idéaux (J/mol.K).

Dans le cas d'une solution saline La pression osmotique peut être approximativement donnée en fonction du coefficient osmotique  $\alpha = 0.7 \text{ Bar/kg. m}^{-3}$  :

$$\Delta\pi = \alpha.C_m \quad \text{II.7}$$

D'où :

$$\Delta\pi = \alpha.(C_A - C_P) \quad \text{II.8}$$

$C_m$  : concentration en NaCl à la surface de la membrane

$C_A$  : Concentration de l'eau d'alimentation (g/L).

$C_P$ : Concentration de la même espèce dans le perméat (g/L).

La sélectivité d'une membrane définie par le taux de rejet (appelé aussi taux de rétention) de l'espèce (sel, macromolécule, particule) se détermine par :

$$T_R = 1 - \frac{C_P}{C_R} \quad \text{II.9}$$

Avec :

$C_R$ : Concentration de l'espèce à retenir dans le concentrât (g/L).

$C_P$ : Concentration de la même espèce dans le perméat (g/L).

Certaines membranes développées pour le dessalement de l'eau de mer ont un taux de rejet au chlorure de sodium de de 96 % à 99 %, [20].

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 transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane [21]. Le flux de solvants  $J_{\text{solvant}}$

( $\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) de solvant traversant la membrane est donné par la relation suivante :

$$J_{\text{solvant}} = \frac{Q_P}{S} \tag{II.10}$$

$Q_P$  : Débit volumique de solvant ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

$S$  : surface de la membrane ( $\text{m}^2$ ).

### II.4 . Dimensionnement du Champ Photovoltaïque

Le photovoltaïque est de plus en plus en compétition avec les sources d'énergie conventionnelles et peut répondre à différentes exigences pour assurer un développement durable. C'est pour cela que son couplage avec le dessalement semble être adéquat [22].

L'Algérie dispose de l'un des gisements solaires le plus élevé de la région du Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA) et se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde. Selon sa situation géographique,. Le tableau II.1 représente le potentiel solaire calculé dans différentes régions en Algérie [23].

Tableau II-1: Potentiel solaire en Algérie [24].

Région	Régions côtières	Les Highlands	Sahara
Surface (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ )	1700	1900	2650

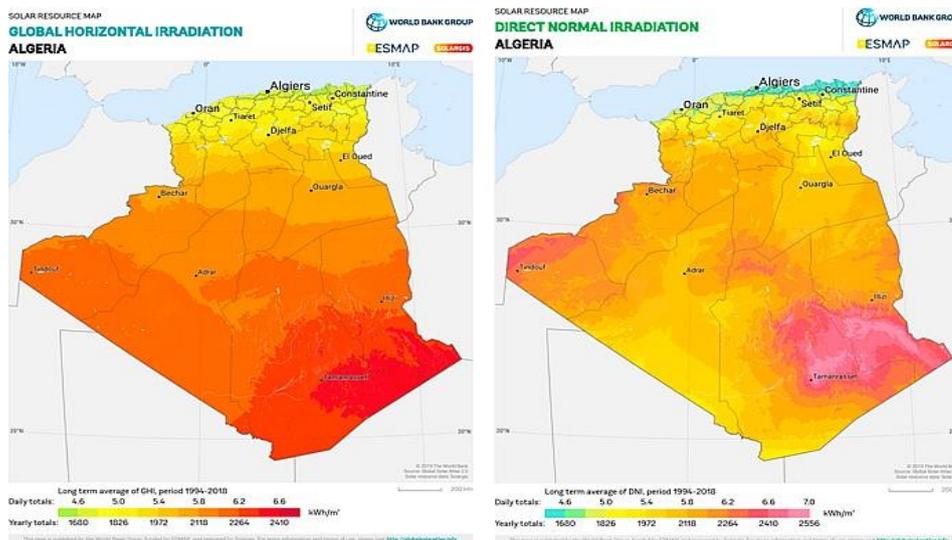


Figure II.9 : Carte de l'irradiation solaire en Algérie [25].

Pour dimensionner un système solaire photovoltaïque, il faut d'abord déterminer l'emplacement, calculer le rayonnement solaire, estimer la production d'énergie et dimensionner la chaîne PV autonome, composée des panneaux solaires, du parc de batteries, du régulateur, de l'onduleur et de la surface nécessaire de capteurs solaires. Pour ce faire, il est possible de suivre un certain nombre d'étapes de calcul, à savoir

1. L'estimation des besoins en électricité.
2. La détermination de la puissance totale requise.
3. La sélection des panneaux solaires en fonction de leur capacité et de leur rendement.
4. La définition de la capacité de stockage de la batterie nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques.
5. La sélection d'un régulateur de charge adéquat.
6. La sélection d'un onduleur approprié pour convertir l'énergie solaire en courant alternatif.

#### A. Estimation des besoins d'électricité

Le calcul de l'énergie consommée par jour,  $E_C$ , dépend de la consommation journalière de l'équipement, exprimée en kWh/jour. Pour calculer  $E_C$  on peut utiliser la formule suivante :

$$E_j = P_e \times t_1 \times N_{br} \quad \text{II.11}$$

$E_j$  : Consommation d'énergie journalière (kWh/j).

$P_e$  : la puissance de l'équipement (W).

$t_1$  : Duree utilisation h.

$N_{br}$  : Le nombre d'équipements .

#### B. Détermination de la puissance totale requise

Le module photovoltaïque est caractérisé par sa puissance crête  $P_c$  dans des conditions standardisées ( $S=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ). Il est exposé à un ensoleillement maximal qui produit une énergie (Wh) égale à la puissance crête pendant un certain temps. Dans les conditions réelles, cet ensoleillement maximal ne se produit que pendant quelques heures de la journée, appelées heures équivalentes  $N_e$ .

L'énergie solaire maximale est donc égale au produit du rayonnement maximal ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) par le nombre d'heures équivalentes. En connaissant le nombre d'heures équivalentes, il est possible de calculer la production électrique d'un panneau photovoltaïque pendant une journée en multipliant les heures équivalentes par la puissance crête  $P_c$  [22].

$$P_{C \text{ installee}} = \frac{E_j}{N_e \cdot C_{dp}} \quad \text{II.12}$$

$$N_e = \frac{E_M}{1000} \quad \text{II.13}$$

$E_j$  : Consommation d'énergie journalière (kWh/j)

$N_e$  : Nombre d'heures équivalentes (h/j).

$P_c$  : Puissance crête ( $w_c$ ).

$C_{dP}$  : Coefficient de perte.

$E_M$  : Eclaircissement moyenne dans la journée .

Généralement le coefficient  $C_{dP}$  est compris entre 0.7 et 0.9. Il regroupe les pertes de courant, les pertes de tension, les pertes ohmiques liées aux caractéristiques du câblage telles que la longueur et la section, et les pertes thermiques dues à l'échauffement des cellules PV, qui se traduit par une diminution du rendement électrique.

#### A. Détermination du nombre de panneaux

Le nombre de panneaux solaires nécessaire pour répondre à la charge est donnée par l'équation suivante :

$$N_{panneau} = \frac{P_c \text{ installee}}{P_c \text{ panneau}} \quad \text{II.14}$$

#### B. Dimensionnement des batteries de stockage

La capacité de la batterie est déterminée en tenant compte d'un certain nombre de jours d'autonomie à production nulle.

La capacité de la batterie nécessaire :

$$C = \frac{E_j * N}{P_d * V} \quad \text{II.15}$$

$E_j$  : Consommation d'énergie journalière (kWh/j)

$N$  : Nombre de jours d'autonomie souhaité

$V$  : Tension nominale de la batterie (Volt).

$P_d$  : Profondeur de décharge

Les nombre de jours varie en fonction de l'application et de la situation géographique. A cela on rajoute la Correction due à la profondeur de décharge ( $P_d$ ) qui représente la quantité d'énergie électrique qui peut être retirée d'une batterie avant que sa capacité ne soit considérée comme épuisée..

Pour calculer le nombre de batteries nécessaires en fonction de la capacité de la batterie, on doit également prendre en compte la capacité nominale de chaque batterie individuelle, tel que :

$$N_{bat} = \frac{\text{Capacité de la batterie nécessaire}}{\text{Capacité nominale de chaque batterie individuelle}} \quad \text{II.15}$$

### C. Dimensionnement d'onduleur

. Pour sélectionner un onduleur adapté, capable de convertir l'énergie électrique produite par les panneaux solaires en courant alternatif pour une utilisation dans les appareils électriques, il est nécessaire de déterminer la puissance requise pour le système solaire photovoltaïque. En effet, l'onduleur choisi doit avoir une puissance nominale supérieure à la puissance maximale que le système photovoltaïque est susceptible de produire [22].

$$P_{ond} = \frac{P_{C\ instalee} * C_{cp}}{\eta_{ond}} \quad \text{II.16}$$

En général, les onduleurs ont un rendement d'environ 90% à pleine charge, bien que ce chiffre puisse varier en fonction de la marque, du modèle et de la charge appliquée. Par conséquent, il est important de choisir un onduleur de qualité avec un rendement élevé pour maximiser l'efficacité globale du système photovoltaïque.

Le coefficient de correction de puissance de l'onduleur, souvent abrégé en "  $C_{cp}$  ", est une valeur utilisée pour déterminer la puissance maximale que l'onduleur est capable de gérer en fonction de la puissance nominale des panneaux solaires. En général, le  $C_{cp}$  est compris entre 1,1 et 1,3, selon le type d'onduleur et les conditions de fonctionnement. Dans ce cas précis, le  $C_{cp}$  est de 1,25, ce qui signifie que la puissance maximale du système photovoltaïque sera multipliée par ce coefficient pour obtenir la puissance maximale que l'onduleur peut supporter en toute sécurité. La tension de sortie de l'onduleur est choisie en fonction de la puissance de sortie maximale du système solaire photovoltaïque. Il est important de choisir une tension d'onduleur adaptée à la puissance de sortie maximale du système pour assurer un fonctionnement optimal et éviter tout problème de compatibilité ou de surcharge.

-Si  $P_{ond} \leq 500$  W, la tension de sortie de l'onduleur sera de 12 V.

-Si  $500 \leq P_{ond} \leq 2000$  W, la tension de sortie de l'onduleur sera de 24 V.

-Si  $P_{ond} > 2000$  W, la tension de sortie de l'onduleur sera de 48 V.

### D. Dimensionnement d'un régulateur

Le régulateur a essentiellement un rôle de protection contre la surcharge ou la décharge profonde de la batterie. Le régulateur est réglé à des tensions de coupure (Seuil haut et seuil bas) qui correspondent aux limites de charge et de décharge à ne pas dépasser. Le régulateur assure - la protection de la batterie contre les charges excessives et les décharges trop profondes.

Et l'optimisation du régime de charge de la batterie. Pour dimensionner un régulateur, on sépare les deux fonctions du régulateur : Charge et décharge [22].

Le dimensionnement de la régulation de charge est en fonction de la puissance du générateur, donc du courant produit par les modules (courant de charge). L'intensité du

courant d'entrée du régulateur  $I_e$  doit être supérieure à la valeur maximale produite par le générateur PV :

$$I_e = K \cdot I_m \quad \text{II.17}$$

$I_m$  : Intensité maximale de chaque module.

$K$ : Nombre de circuit de module monté en parallèle.

Le dimensionnement de la régulation de décharge est en fonction de la puissance totale des récepteurs, donc du courant consommé par ces récepteurs (courant de décharge ou courant d'utilisation). L'intensité de courant de sortie  $I_s$  doit être supérieure à la valeur maximale demandée par les récepteurs :

$$I_s = \frac{P_t}{U} \quad \text{II.18}$$

$P_t$  : Puissance totale des récepteurs (Watt) en fonctionnement maximal.

$U$  : Tension aux bornes du générateur (Volt).

### E. Dimensionnement des câbles électriques

Il est nécessaire de constituer un plan électrique global de l'installation avant de calculer toutes les sections des câbles. Il faut également avoir une idée assez précise de l'implantation physique des composants pour réduire les distances entre les composants du système PV [22]. Pour le choix des sections des câbles, on pourra se servir du calcul de la chute de tension dans un conducteur, donnée par la loi d'Ohm :

$$U_c = r \cdot I \quad \text{II.19}$$

$$R = \frac{\rho_s \cdot L}{S_c} \quad \text{II.20}$$

**Avec :**

$r$  : Résistance du conducteur .

$L$ : Longueur du conducteur .

$S_c$ : Section du conducteur. .

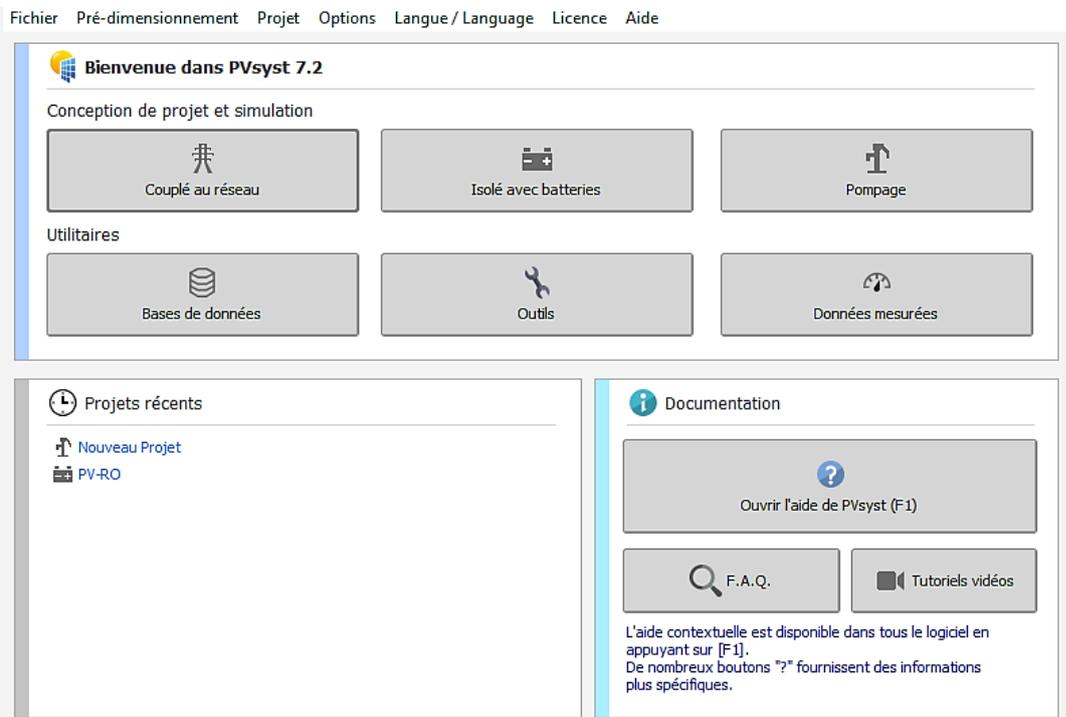
$\rho_s$ : Résistivité valant environ  $0,01724 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  pour le cuivre.

On considère que les pertes ne doivent pas excéder un faible pourcentage (1 à 3 %) de la tension.

### F. Présentation des logiciel PVSYSTT

Le dimensionnement d'un système PV peut être effectué à l'aide du logiciel PVSYSTT qui est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires qui permet d'obtenir des informations telles que la production d'énergie, l'irradiation solaire, le coût de l'installation, la surface nécessaire et la production annuelle d'énergie. Il comporte deux modes de fonctionnement : un mode simplifié pour les débutants et un mode avancé pour

une analyse approfondie. Dans les deux modes, vous devez indiquer l'emplacement géographique de l'installation et saisir les données spécifiques à votre système( figure II.10). [22].



**Figure II.10:** Plateforme du logiciel PVsyst (Interface graphique).

Les étapes de la conception d'un projet passent par l'orientation et inclinaison des modules PV, la définition des besoins de l'utilisateur et distribution des heures d'utilisation, la définition du système autonome (spécifications des modèles de batterie et ses types d'installation et le choix des panneaux photovoltaïque et le choix de régulateur)

## II.5 Modélisation des éoliennes

### A. Caractérisation de la vitesse du vent

La puissance éolienne moyenne exploitée par la surface des pales de l'éolienne exprimée de la manière suivante [26] :

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{2} \rho A V_{\text{moy}}^3 \quad \text{II.21}$$

$\rho$ : La masse volumique, paramètre généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne  $1.25 \text{ kg/m}^3$ .

$A$  : Surface balayée par les pales exprimée en mètres carrés ( $\text{m}^2$ ).

$V_{\text{moy}}$  : vitesse cubique moyenne du vent.

La vitesse cubique moyenne du vent. est obtenue en effectuant un traitement statistique des données brutes du vent et en calculant les fréquences pour une vitesse seuil donnée [27].

Les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont généralement utilisé des modèles associant la puissance et l'exponentielle, basés sur la forme des nuages de points obtenus. Les modèles couramment utilisés est la distribution de Weibull dont la densité de probabilité est formulée comme suit [28].

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad \text{II.21}$$

$f(V)$  : Les fréquences de la vitesse du vent pour une vitesse donnée.

$k$  : Facteur de forme qui caractérise la forme de la distribution de fréquence, sans dimension.

$C$  : Facteur d'échelle qui détermine la qualité du vent [m/s].

$v$  : Vitesse du vent [m/s].

Les paramètres "k" et "C" sont généralement appelés les paramètres de Weibull. La détermination de ces paramètres permet de connaître la distribution des vitesses du vent pour un site donné.

### B. Vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et variance

La vitesse moyenne et cubique moyenne représente le moment d'ordre 1 et d'ordre 3 respectivement de la fonction de répartition de Weibull [29].

Le tableau II-2 présente les expressions des vitesses moyennes, des vitesses cubiques moyennes selon le modèle utilisé.

**Tableau II-2:** Expressions des vitesses moyennes, des vitesses cubiques moyennes selon le modèle utilisé.

Distribution	$V_{\text{moy}}$	$V_{\text{moy}}^3$	Distribution
Arithmétique	$V_{\text{moy}} = \int_0^{\infty} V f(V) dV$	$V_{\text{moy}}^3 = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV$	Arithmétique
Weibull	$V_{\text{moy}} = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$V_{\text{moy}}^3 = C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	Weibull

II.22

Avec  $\Gamma(x)$  dits fonction Gamma définit comme suit : [30]

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad \text{II.23}$$

Et  $t = \frac{1}{k} + 1$  II.24

Différentes méthodes sont utilisées pour ajuster les données statistiques et déterminer les coefficients "k" et "C" de la distribution de Weibull. Parmi ces méthodes, l'une des plus couramment utilisées est la méthode suivante du maximum de vraisemblance appliquée à la fonction de distribution de Weibull.

### B. Extrapolation des paramètres de Wei bull

Les données de vent sont souvent mesurées à des hauteurs autres que la hauteur de mât d'un aérogénérateur (éolienne), c'est pourquoi plusieurs modèles d'extrapolation ont été développés pour passer de la hauteur mesurée à la hauteur souhaitée. Deux méthodes sont le plus souvent utilisées, la méthode celle de développés par Justus C.G. et A.S. Mikhail, et celle de Justus en 1978, [31,32]. Les modèles utilisés pour l'extrapolation sont donnés dans tableau II-3.

**Tableau II-3:** Modèles choisis pour l'étude à long terme [31,32].

<p><b>Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïel</b></p>	$\frac{k_2}{k_1} = \left[ \frac{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \right]$	$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^m \text{ Avec:}$ $m = \left[ \frac{0.37 - 0.0881 * \ln(C_1)}{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right]$
<p><b>Modèle-modifié d'extrapolation de Justus</b></p>	$\frac{k_2}{k_1} = \left[ \frac{1}{1 - 0.0881 * \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \right]$	$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^m \text{ Avec :}$ $m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} - 0.0881 * \ln\left(\frac{C_1}{6}\right)$ $z_g = \sqrt{z_1 * z_2}$ <p><b>II.25</b></p>

$z_0$ : C'est la rugosité en [m].

La rugosité de la surface d'un terrain est déterminée par la taille et la distribution des divers éléments rugueux qu'elle contient [33].

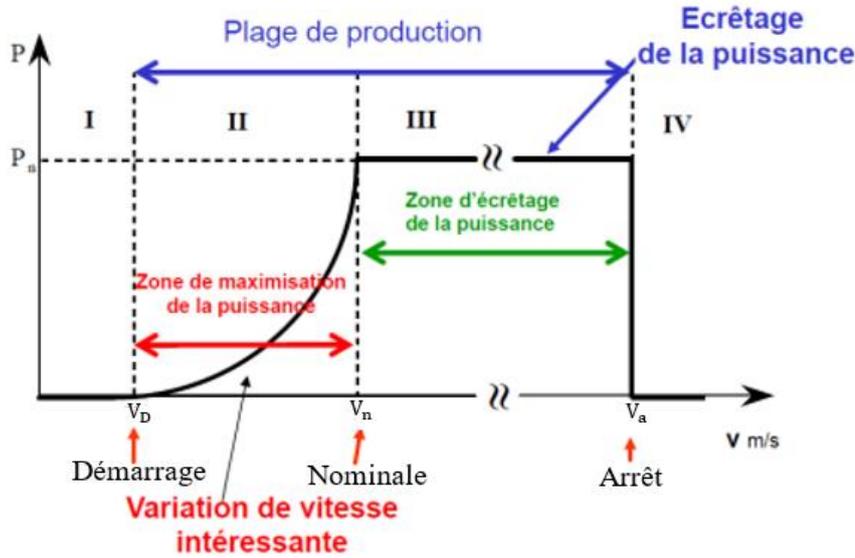
### D. Fonctionnement de l'éolienne

La courbe de puissance, généralement fournie par les fabricants, permet de diviser le fonctionnement de l'éolienne en quatre zones distinctes en fonction de la vitesse du vent, comme illustré dans la figure II.11.

**-Zone I ( $0 < V < V_D$ )** : Lorsque la vitesse du vent est trop faible, la turbine éolienne peut tourner, mais l'énergie disponible est insuffisante pour générer de l'électricité de manière efficace.

**-Zone II ( $V_D < V < V_n$ )** : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent.

**-Zone III ( $V_n < V < V_a$ ) :** La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine ( $P_n$ ). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.



**Figure II.11:** Courbe typique de puissance récupérée  $P(W)$  en fonction de la vitesse du vent  $V(m/s)$ [34].

Etant donné que la vitesse du vent est variable, chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage  $V_D$ , une vitesse nominale  $V_n$  et une vitesse d'arrêt  $V_a$  spécifiques. La puissance éolienne utile est donnée par [35] :

$$P_{u,moy} = \frac{1}{2} \rho A V_{u,moy}^3 \tag{II.26}$$

Ce dernier peut être décomposée selon les conditions de fonctionnement de l'éolienne :

$$P_{u,moy} = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_i \\ \frac{1}{2} \rho A V_{moy}^3 & \text{pour } V_i \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho A V_n^3 & \text{pour } V_n \leq V \leq V_a \\ 0 & \text{pour } V \geq V_a \end{cases} \tag{II.27}$$

La vitesse cubique utile moyenne peut être calculée en intégrant la vitesse cubique pondérée par la fonction de probabilité, en prenant en compte les limites imposées par la machine [35] :

$$V_{u,moy}^3 = \int_{V_i}^{V_n} f(V) V^3 dV + V_n^3 \int_{V_n}^{V_s} f(V) dV \tag{II.28}$$

Soit, après intégration et en utilisant la fonction gamma normalisée :

$$V_{u,moy}^3 = \left[ \Gamma_n \left( \left( \frac{V_n}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma_n \left( \left( \frac{V_i}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) \right] V_{moy}^3 + V_n^3 \left[ \exp \left( - \left( \frac{V_n}{C} \right)^k \right) - \exp \left( - \left( \frac{V_a}{C} \right)^k \right) \right] \tag{II.29}$$

Avec :  $\Gamma_n(x, a) = \frac{\Gamma(x, a)}{\Gamma(x)}$  II.30

Enfin la puissance éolienne moyenne réellement utilisable (final) s'écrit [35] :

$$P_{utile} = \eta P_{u,moy} \tag{II.31}$$

Où  $\eta$  : Rendement mécanique-électrique de la machine.

### E. Présentation du logiciel utilisé WASP

WASP est un PC-programme avec lequel on effectue le traitement statistique des données de vent et les extrapolations horizontale et verticale de ces données. Le programme contient un ensemble de modèles pour calculer les effets des obstacles, de la rugosité du sol et de la topographie sur l'écoulement du vent (figure II.12).

L'analyse consiste à traiter les données de vent (vitesse et direction) pour l'élaboration d'un potentiel éolien de référence dans toutes les directions. Ce dernier est ensuite transposé à l'ensemble de la zone d'étude en tenant compte de la topographie, des obstacles et des variations de rugosité.

Pour estimer le potentiel énergétique avec le WASP, un certain nombre de données sont nécessaires, telles que des données météorologiques (vitesses et directions du vent) et des données géographiques i.e. des cartes décrivant la topographie et des cartes de rugosité du sol, qui décrivent la nature du sol (terrains boisées, présence de villes ou de villages, zones de sable, plan d'eau, ...)[36].

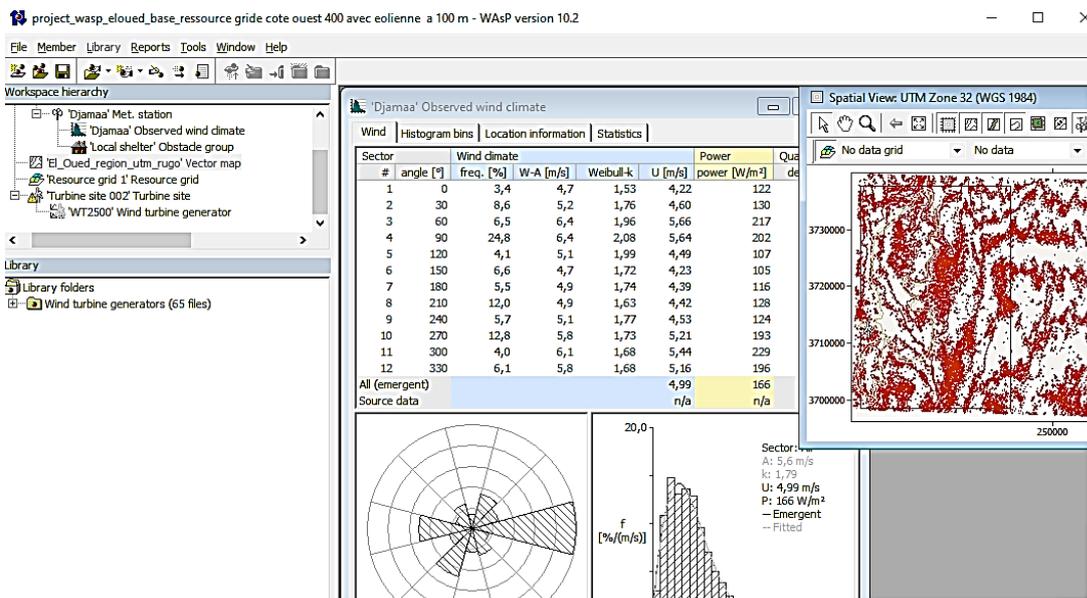


Figure II.12: WASP interface.

Le logiciel nous donne les résultats relatifs aux caractéristiques statistiques de la vitesse du vent, l'atlas des vents avec les différentes cartes éoliennes et l'estimation de la puissance fournie par un parc éolien.

## II.6 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la mise en équation du système étudié pour le dessalement alimenté par des énergies renouvelables. Il présente l'installation étudiée, les composants clés tels que l'osmoseur, le système PV et le système éolien. La modélisation de l'osmoseur est abordée, ainsi que les méthodes de calcul et d'optimisation du champ PV et de l'éolienne. De plus, l'utilisation de logiciels spécialisés tels que PVsyst et WAsp est mentionnée pour le dimensionnement et l'optimisation des systèmes PV et éolien. Ces développements permettent d'obtenir des résultats précis pour la conception et l'optimisation du système de dessalement par osmose inverse alimenté par des énergies renouvelables.

### Référence :

- [1] ALAIN Maurel (2001): « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres ». 1<sup>ème</sup> édition 11, rue Lavoisier, Paris. France.
- [2] M.HAOUACHE (2016). L'impact de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans la gestion des données . Mechanical-Electrical Services for water and Wastewater Treatment Plants, GmbH Düsseldorf-Duisburg, Germany, Department of chemistry.
- [3] Danis, P. Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, J 2700, Juin (2003).
- [5] M.Wilf, C.Bartels .Optimization of seawater RO systems design ,Desalination 173 (2005) 1–12.
- [6] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th>
- [7] Patrice Bacchin. Principes de base des Technologies à Membranes. 2<sup>ème</sup> Ecole d'Eté Franco Maghrébine S;ciences et Technologies à Membranes. Monastir, Tunisia. 2005. ffhal-00201760f.
- [8] [https://eduscol.education.fr/rnchimie/gen\\_chim/triboulet/rtf/osmose\\_inverse.pdf](https://eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/osmose_inverse.pdf).
- [9]Berland,Juery,(2002)rseau5004724/1006478ar/<https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/2011-v24-n3->.
- [10] A.E.H.GHEZALI, H.MERZOUK, Etude et Dimensionnement d'une Station de Dessalement D'Eau Par Osmose Inverse Alimentée par Des Panneaux Solaires, Ecole Nationale Polytechnique D'Oran Maurice AUDIN ,2020.
- [11] [https://fr.org/wiki/Flux\\_lumineux](https://fr.org/wiki/Flux_lumineux).
- [12] J.Mendret (2007): Mise au point de méthodes de caractérisation du colmatage de membranes: application à la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé. Thèse de doctorat, Institut National des Toulouse Sciences de France.Appliquées.

- [13] A.Maurel(2006).dessalment de l'eau de mer et des eau saumates.2eme edition 11,rue Lavoisier ,Paris.
- [14] I. Tsuda, K. Kurokawa, K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 – 508,1994.
- [15] : E. BUCHET, « Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Thèse de Doctorat, Faculté de Science et Technique de Saint-Jérôme, d'Aix Marseille, juillet 1988.
- [16] TRAHI Fatiha, « Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche lampas», Mémoire de magister en électronique ; 2011 ; page (11-12)/ (17-18).
- [17] M.Bdour , Z.Dalala , M.Al-Addous,A.Kharabsheh , H.Khzouz , Mapping RO-Water Desalination System Powered by Standalone PV System for the Optimum Pressure and Energy Saving, Sci. 2020, 10, 2161; doi:10.3390/app10062161.
- [18] Modifiée à partir, Janie Coulombe, ‘‘Évaluation de la modélisation et des prévisions de la vitesse du vent menant à l'estimation de la production d'énergie annuelle d'une turbine éolienne’’, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en statistique, avril 2015.
- [19] J.M.ROVEL. Dessalement de l'eau de mer, Environnement - Sécurité | Technologies de l'eau.7200048087 - ecole normale superieure de lyon // 140.77.2.118.
- [20] C.Tinakula. Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement (2009).
- [21] <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/22789/ch02.html#N1084E>.
- [22]<http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Programme-National/Programme-National-Energies-Nouvelles-Renouvelables.pdf>.
- [23]<https://www.algerie-focus.com/2014/12/le-gisement-solaire-de-lalgerie-est-parmi-les-trois-meilleurs-gisements-dans-le-monde/?cn-reloaded=1>.
- [24]<http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels&fbclid=IwAR1vtds> .
- [25]Youcef Himri ,Shafiqur Rehman , Ali Mostafaeipour , Saliha Himri , Adel Mellit , Mustapha Merzouk and Nachida Kasbadji Merzouk ,Overview of the Role of Energy Resources in Algeria's Energy Transition, Energies **2022**, 15, 4731. <https://doi.org/10.3390/en15134731>.
- [26] Cuntry G., « Eoliennes et Aérogénérateurs », EDISUD/Technologie douce, 1979.
- [27] Kasbadji Merzouk N, Daaou H, « Atlas Energétique Eolien de l'Algérie », SIPE'5, Béchar,2001.
- [28] Kasbadji Merzouk N., « Evaluation du gisement éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de Doctorat, Tlemcen, Algérie, 2006 ".
- [29] N. Kasbadji Merzouk et M. Merzouk, ‘‘Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable Application au pompage dans les Hauts Plateaux’’, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 155 – 163.

- [30] "Nobutaka Menji and Joost A. Businger, "Stability Dependence of Temperature, Humidity and Vertical Wind Velocity Variances in the Atmospheric Surface Layer", Journal of the Meteorological society of Japan, 1971."
- [31] Justus C.G. et A. Mikhail, « Height Variation of Wind speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976. ," ed.
- [32] Poje S. et B. Cividini, « Assessment of Wind Energy Potential in Croatia » Solar Energy vol.41 N°6 pp 543 554, 1988.," ed.
- [33] Hammouche, R. (1991). <Atlas Vent de l'Algérie>. Office National de la Météorologie.
- [34] H. H. M. B. MULTON, "<Énergie électrique: génération éolienne>," Journal article," p. 16, 2020.
- [35] Kasbadji Merzouk N., « Evaluation du gisement éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de Doctorat, Tlemcen, Algérie, 2006 ".
- [36] N. G. Mortensen, N. G. Mortensen, D. N. Heathfield, L. Myllerup, L. Landberg and O. Rathmann, Wind Atlas Analysis and Application Program: WASP 9 Help Facility. Risø National Laboratory, Roskilde, 2007.

## **Chapitre III**

# **Résultats et discussions**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir d'une étude de conception et de dimensionnement d'une installation d'osmose inverse autonome alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque, d'une capacité de production de 24 m<sup>3</sup>/J.

Différentes expérimentations ont été effectuées à l'aide d'un logiciel de calcul. Après avoir optimisé la configuration adéquate du système d'osmose inverse en termes de qualité de l'eau traitée et de consommation d'énergie, un générateur solaire photovoltaïque a été également dimensionné. De plus, une étude expérimentale des performances d'un autre système d'osmose inverse d'une capacité de 450 L/J a été menée pour différentes concentrations de sel d'eau à dessaler (eau d'alimentation). Les résultats de l'analyse du pH, de la conductivité, du TDS, ainsi que de la salinité que nous avons effectuées dans chaque essai seront présentés. Enfin, nous présentons en fin de chapitre le dimensionnement d'une éolienne pour répondre à la charge de l'installation remplaçant le champ PV.

### III.2 Etude et dimensionnement d'un système d'osmose inverse solaire.

#### III.2.1 Conception et dimensionnement d'un système d'OI par IMSDesign

Ce travail vise à concevoir, dimensionner et optimiser une installation de dessalement par osmose inverse alimentée par énergie renouvelable photovoltaïque pour répondre aux besoins en eau potable sur le site de Djamaa El-Oued en Algérie, où l'eau est saumâtre. Les simulations ont été réalisées à l'aide d'un logiciel IMSDesign pour déterminer le type de membrane adéquat et la meilleure configuration pour un débit de perméat attendu avec une qualité d'eau supérieure tout en respectant les normes. Une procédure d'optimisation a été suivie pour choisir le nombre minimum de membranaire et d'étages pour un débit d'alimentation donné. Les effets de la température de l'eau d'alimentation, de la salinité et de la pression de fonctionnement sur les performances du système membranaire et le rejet ont également été étudiés. La configuration finale a été choisie en fonction des intérêts du projet et de la qualité de l'eau produite.

##### III.2.1.1 Conditions de travail

Les conditions de travail sont des éléments essentiels à considérer pour assurer le bon fonctionnement de l'installation de dessalement. Dans notre étude, nous avons pris en compte les paramètres suivants : le débit d'eau de production est fixé à 24 m<sup>3</sup>/j (1m<sup>3</sup>/h), le mode de fonctionnement de l'installation est 4h/j avec stockage d'énergie, une température de fonctionnement de 25°C, une pression de fonctionnement entre 5 et 14 bars, un taux de conversion élevé et une qualité d'eau produite conforme aux normes en vigueur. Il est crucial de respecter ces conditions pour assurer une production optimale et fiable. Cela permettra de répondre aux besoins en eau potable de la région d'El-Oued et contribuera à améliorer des conditions de vie des populations locales.

##### III.2.1.2 L'analyse de l'eau

Avant le dimensionnement du système de dessalement par OI, il est nécessaire de connaître la qualité de l'eau brute à dessaler. Les résultats des analyses de l'eau saumâtre prélevée de la nappe souterraine d'El-Oued sont illustrés dans le tableau.III.1, [1]. On constate

que la qualité de ces eaux est généralement salée, légèrement saumâtre et médiocre en raison de la nature chimique des couches géologiques traversées.

**Tableau III-1:** Analyse physico-chimique de l'eau saumâtre, [1].

Paramètres	Résultats
<b>pH</b>	7.09
<b>Conductivité (<math>\mu\text{s}/\text{cm}</math>)</b>	8480
<b>TAC (<math>\text{mg}/\text{l}(\text{CaCO}_3)</math>)</b>	132
<b>Dureté Total (<math>^\circ\text{F}</math>)</b>	140
<b>TDS (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	4445
<b>Sodium Na (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	969.57
<b>Potassium K (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	47.21
<b>Calcium Ca (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	317.79
<b>Magnésium Mg (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	127.3
<b>Chlorure CL (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	1503.21
<b>Nitrate <math>\text{NO}_3</math> (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	15.82
<b>Sulfate <math>\text{SO}_4</math> (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	1157.74
<b>Fer Fe (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	0.01
<b>Phosphore <math>\text{PO}_4</math> (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	0.014
<b>Bicarbonate <math>\text{HCO}_3</math> (<math>\text{mg}/\text{L}</math>)</b>	167.14

On constate que les principales espèces chimiques présentes dans l'eau saumâtre sont le sodium, le chlorure, le sulfate, le magnésium et le calcium, avec des concentrations très élevées pour le sodium et le chlorure. En effet, les concentrations élevées de sel peuvent endommager les membranes d'osmose inverse, ce qui peut entraîner une réduction de l'efficacité du traitement, tandis que des concentrations élevées en calcium et de magnésium peuvent conduire à la formation de dépôts de tartre.

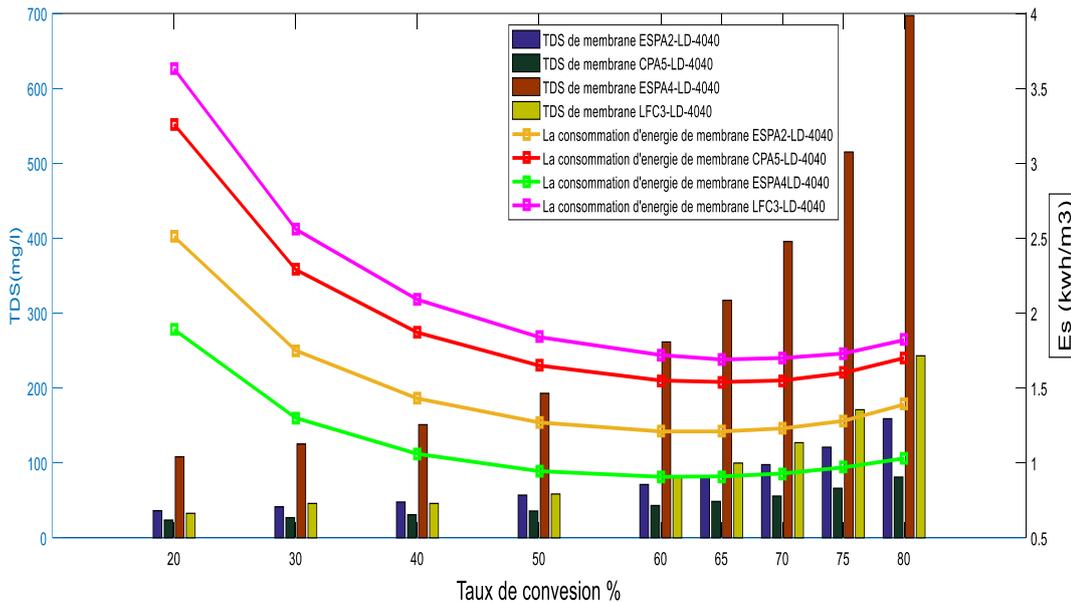
### III.2.1.3 Choix et optimisation de la membrane

Le code de calcul IMSDesign a été utilisé pour tester différentes membranes et comparer leurs performances. Ce logiciel permet de simuler le comportement de différentes membranes en fonction des caractéristiques de l'eau saumâtre à traiter et de déterminer celle qui offre la meilleure efficacité en termes de réduction du TDS, la dureté de l'eau et la consommation d'énergie. En outre, il est possible d'optimiser la conception du système en sélectionnant la membrane la plus appropriée pour répondre aux besoins spécifiques du projet.

Différentes configurations sont étudiées en utilisant des modules membranaires à savoir ESPA2-LD-4040, ESPA4-LD-4040, LFC3-LD4040, CPA5-LD4040. Leurs paramètres caractéristiques sont représentés dans le tableau III.2. Le choix de la membrane pour un système d'osmose inverse doit être basé sur plusieurs critères, notamment la teneur totale en matières dissoutes (TDS) de chaque membrane, la consommation d'énergie spécifique, le taux de conversion, la pression d'opération, la température et le pH de l'eau à traiter. Le TDS est importante car elle indique la quantité de sels et de minéraux présents dans l'eau et détermine

la capacité de la membrane à réduire ces minéraux. La consommation d'énergie spécifique est également un critère important pour évaluer l'efficacité énergétique du système. Enfin, le taux de conversion indique la proportion d'eau traitée qui est convertie en eau pure, ce qui est un indicateur de l'efficacité de la membrane.

La figure III-1, regroupe les résultats de simulation obtenus à savoir le taux de la conversion, la consommation d'énergie spécifique et la teneur totale en matières dissoutes TDS pour chaque membrane utilisée indépendamment.



**Figure III.1:** Variation du TDS et de la consommation d'énergie en fonction du taux de conversion pour différentes membranes.

Nous remarquons que la consommation d'énergie spécifique varie entre 0.9 et 3.63 kWh/m<sup>3</sup> pour les quatre membranes, pour un taux de conversion Y% compris entre 20% et 60%. On constate aussi qu'à partir d'un taux de conversion de 60%, la consommation d'énergie se stabilise ce qui nous permet de choisir la membrane adéquate à partir de ce ratio.

Nous remarquons que :

- La membrane de type ESPA4-LD-4040 consomme une faible énergie (0.907 kWh/m<sup>3</sup>), mais le TDS est élevé (261.49 mg/L), elle n'est donc pas valable.
- La membrane de type LFC3-LD-4040 a donné un TDS moyen (81.2 mg/L), mais elle consomme plus d'énergie que les autres membranes (1.72 kWh/m<sup>3</sup>), elle n'est donc pas adaptée.
- Les membranes de type ESPA2-LD-4040 et CPA5-LD-4040 produisent une eau à faible TDS (71.2 mg/L et 43.16 mg/L respectivement), mais la membrane CPA5-LD-4040 consomme plus d'énergie que la membrane ESPA2-LD-4040 (1.55 kWh/m<sup>3</sup> > 1.21 kWh/m<sup>3</sup>).

En fait, nous constatons que la membrane ESPA2-LD-4040 présente la plus faible valeur de TDS (71.2 mg/L) et une consommation d'énergie moyenne de 1.21 kWh/m<sup>3</sup> par rapport aux autres membranes. Le choix s'est porté alors sur la membrane ESPA2-LD-4040 du fabricant Hydranautics, qui produisait une bonne qualité d'eau, pour la suite de notre étude.

Les caractéristiques de la membrane sont données dans le tableau III.2.

**Tableau III-2:** Limites maximales de fonctionnement de la membrane testée.

<b>Specified Performance*</b>	
Permeate Flow:	2,000 gpd (7.57 m <sup>3</sup> /d)
Salt Rejection:	99.6% (99.4% minimum)
Test Conditions:	1500 ppm NaCl solution 150 psig (1.03 MPa) Applied Pressure 77 °F (25 °C) Operating Temperature 15% Permeate Recovery 6.5 - 7.0 pH Range
<b>Product Use and Restrictions^</b>	
Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.14 MPa)
Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 ppm
Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
pH Range, Continuous (Cleaning):	2-10.6 (1-12)
Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
Maximum Feed Flow:	16 gpm (3.6 m <sup>3</sup> /h)
Minimum Brine Flow:	3 gpm (0.7 m <sup>3</sup> /h)
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi (0.10 MPa)
<b>General Product Description**</b>	
Configuration:	Low Fouling Spiral Wound
Membrane Polymer:	Composite Polyamide
Membrane Active Area**:	80 ft <sup>2</sup> (7.43 m <sup>2</sup> )
Feed Spacer:	34 mil (0.86 mm)

#### III.2.1.4 Choix et optimisation de la configuration du system d'OI

**Tableau III-3:** Les différentes configurations proposées pour system OI.

Spécification du système	Débit d'eau d'alimentation (m <sup>3</sup> /h)	Type de configurations	Tube de pression/étage	Élément de membrane/étage
Scénarios 1	2.67	1 étage	1	4
Scénarios 2	2.67	2 étages	1	2
Scénarios 3	2.67	4 étages	1	1
Scénarios 4	4.17	2 étages	1	3 pour 1 <sup>er</sup> étage et 1 pour le 2 <sup>eme</sup> étage
Scénarios 5	5.42	1 étage	4	4
Scénarios 6	4.67	Double passe	1 tube par passe	2

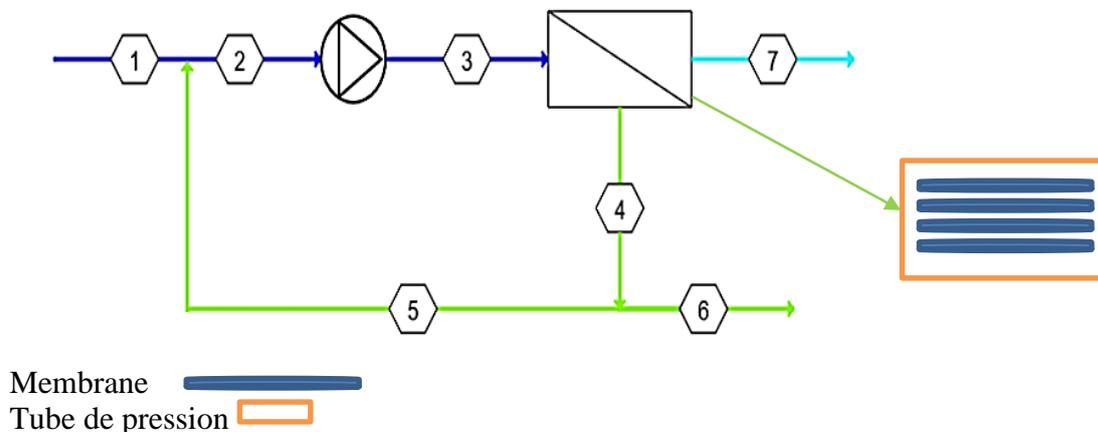
Pour élaborer un schéma du procédé d'osmose inverse, nous avons établi plusieurs "scénarios", en utilisant la membrane choisie "ESPA02-4040" d'une surface active de 8,4 m<sup>2</sup> pour le dessalement de l'eau saumâtre, et nous avons effectué les tests les six configurations qui en découlent. Ces scénarios ont été établis conformément aux caractéristiques de la membrane choisie et de l'eau saumâtre de la région de EL OUED Djamaa. Les différentes configurations proposées sont répertoriées dans le tableau III-3, en indiquant le nombre d'étages, le nombre de membranes et les tubes de pression par étage. L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances de chaque configuration et de déterminer la configuration optimale pour notre cas.

Dans ce qui suit, on présente les différents résultats de notre simulation à caractère quantitatif en termes de débit, de pression, d'énergie, de pH, de TDS et de conductivité, liées à l'optimisation du système membranaire pour différentes configurations.

### III.2.1.5 Présentation des différents scénarios

#### Scénarios 1

La configuration utilisée dans ce scénario est un système à module unique, composé d'un seul tube de pression. Ce module comprend quatre (04) éléments membranaires qui sont connectés en série, figure III.2. Le concentrât produit par le premier élément devient l'alimentation du deuxième élément, et ainsi de suite. Les tubes de pression de tous les éléments sont connectés au port de perméat du module.



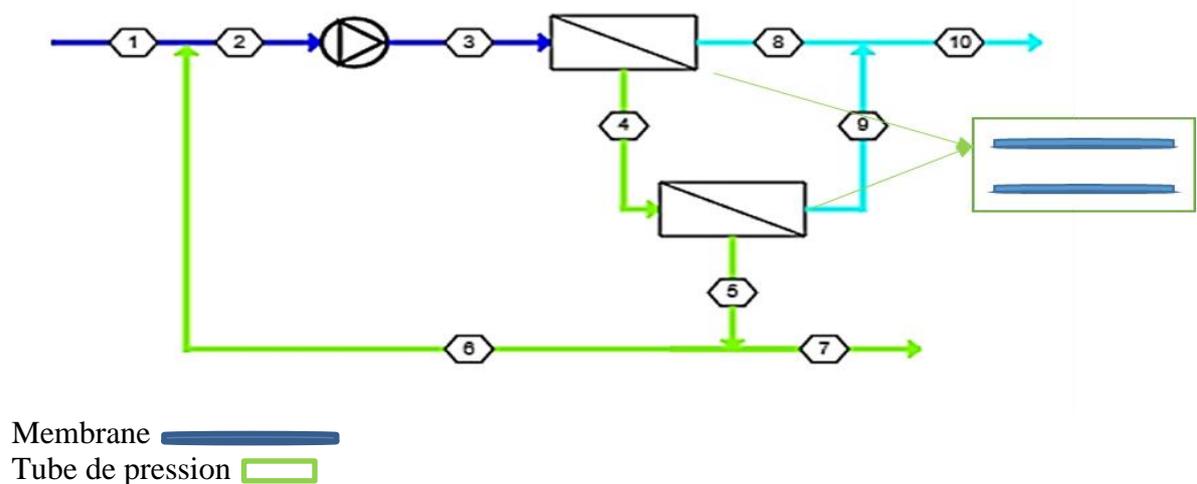
**Figure III.2:** Présentation de la configuration « scénario 01 ».

Les systèmes à module unique sont choisis lorsque seul un petit nombre d'éléments membranaires est nécessaire pour atteindre le débit de perméat requis. Cette configuration est adaptée lorsque les besoins de traitement sont relativement faibles et ne nécessitent pas un grand nombre d'éléments ou une configuration complexe.

Après la simulation du dimensionnement de membrane à l'aide du logiciel IMSDesign, les points obtenus mesurent le débit, la TDS et le pH dans le flux. Ces points fournissent des informations sur les caractéristiques de performance de la membrane, telles que le débit d'eau traitée, la qualité de l'eau en termes de TDS et le niveau de pH.

**Scénarios 2**

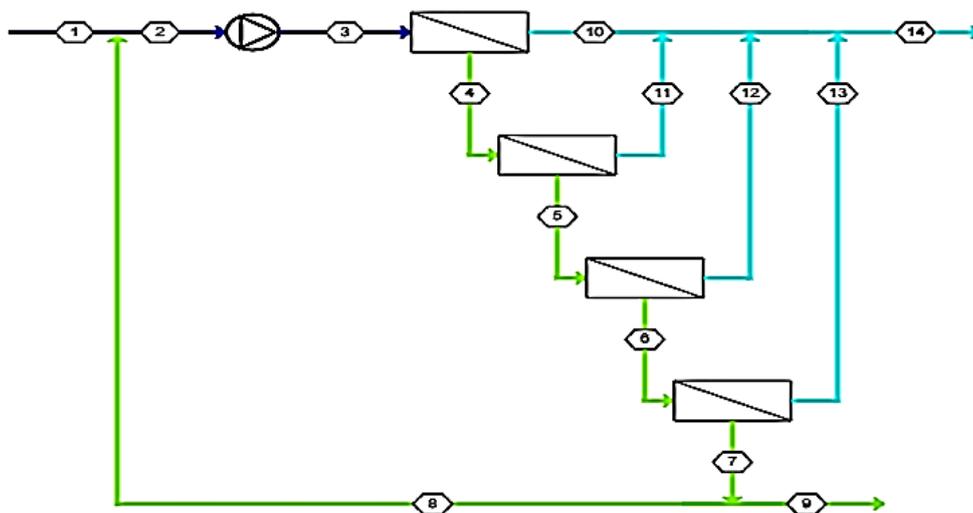
Pour le deuxième scénario, la configuration utilisée est un système à deux étages avec un tube de pression dans chaque étage. Chaque étage comprend deux (02) éléments membranaires qui sont connectés en série. Le concentrât produit par le premier étage devient l'alimentation du deuxième étage. En effet, cette configuration à deux étages avec un tube de pression dans chaque étage permet d'amplifier davantage le processus d'osmose inverse en utilisant plusieurs éléments membranaires en série. Cela permet d'améliorer la séparation des solutés et d'obtenir une plus grande récupération de perméat.



**Figure III.3:** Présentation de la configuration à deux étages « scénario 02 ».

**Scénarios 3**

La configuration « scénario3 » utilisée est un système à quatre étages avec un tube de pression dans chaque étage. Chaque étage comprend un élément membranaire qui est connecté en série.

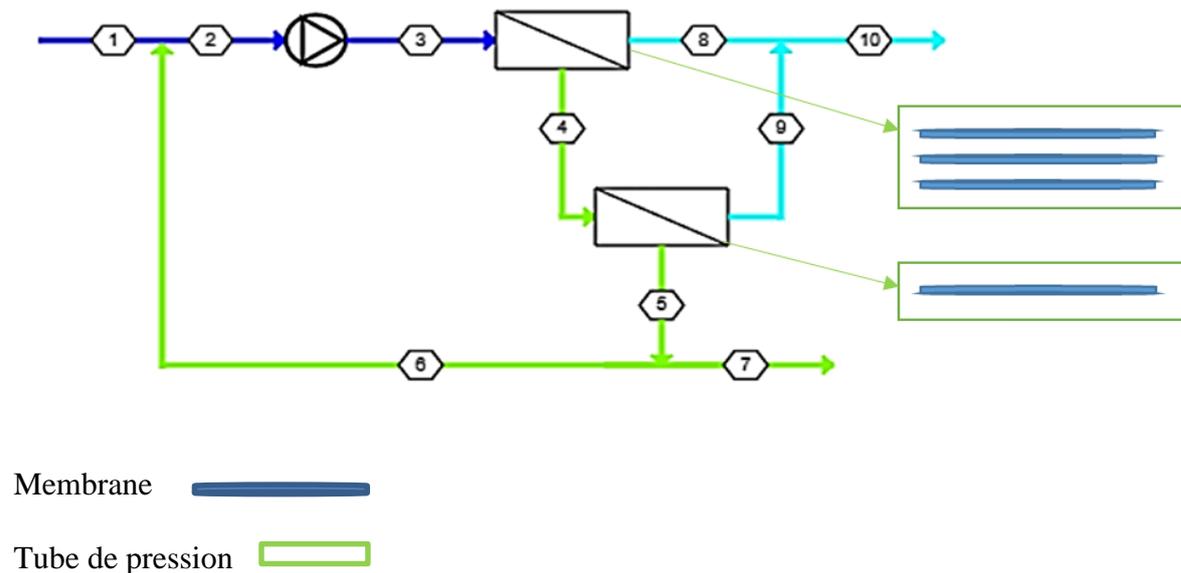


**Figure III.4:** Configuration « scénario 03 » avec quatre étages.

Le concentrât produit par le premier étage devient l'alimentation du deuxième étage, et ainsi de suite pour les étages suivants. Cette configuration à quatre étages avec un tube de pression dans chaque étage permet d'amplifier le processus d'osmose inverse en utilisant plusieurs étages de membranes en série.

#### Scénarios 4

Dans ce scénario, la configuration utilisée est un système à deux étages avec un tube de pression dans chaque étage. Le premier étage comprend trois (3) éléments membranaires connectés en série, tandis que le deuxième étage comprend un seul élément membranaire. Le concentrât produit par le premier étage devient l'alimentation du deuxième étage. En fait, le premier étage, avec ses trois (03) éléments en série, effectue une première séparation des solutés, et le concentrât résultant est ensuite traité par le deuxième étage pour une séparation plus poussée.

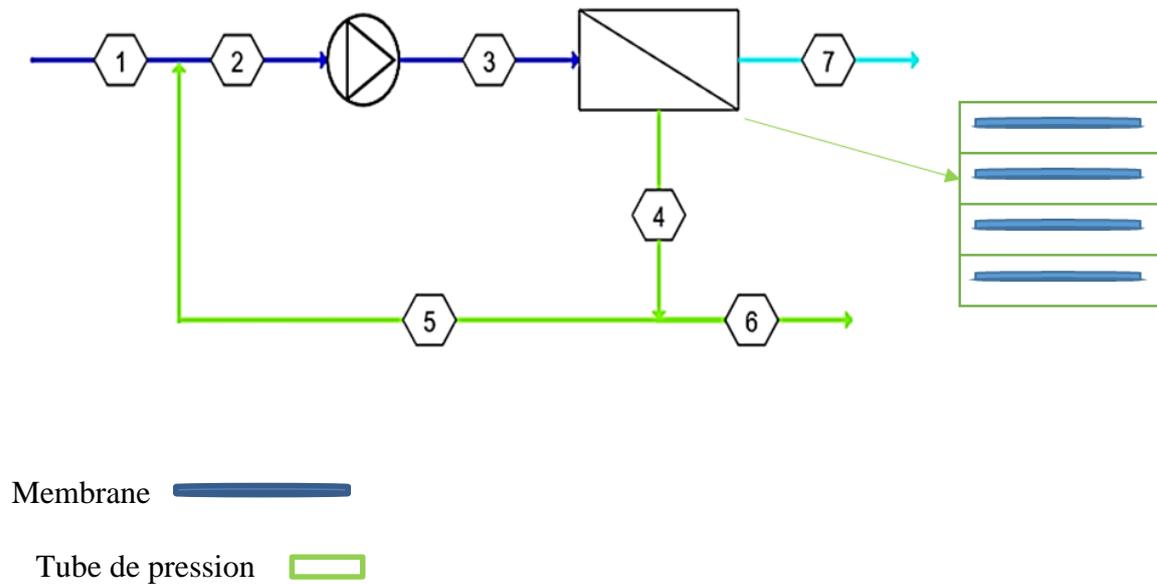


**Figure III.5:** Présentation schématique d'un système deux étages « scénario 04 ».

#### Scénarios 5

Dans ce cas, la configuration utilisée est un système à un seul étage avec un seul tube de pression qui diffère du premier scénario mentionné ci-dessus. Ce module comprend quatre (04) éléments membranaires qui sont connectés en série.

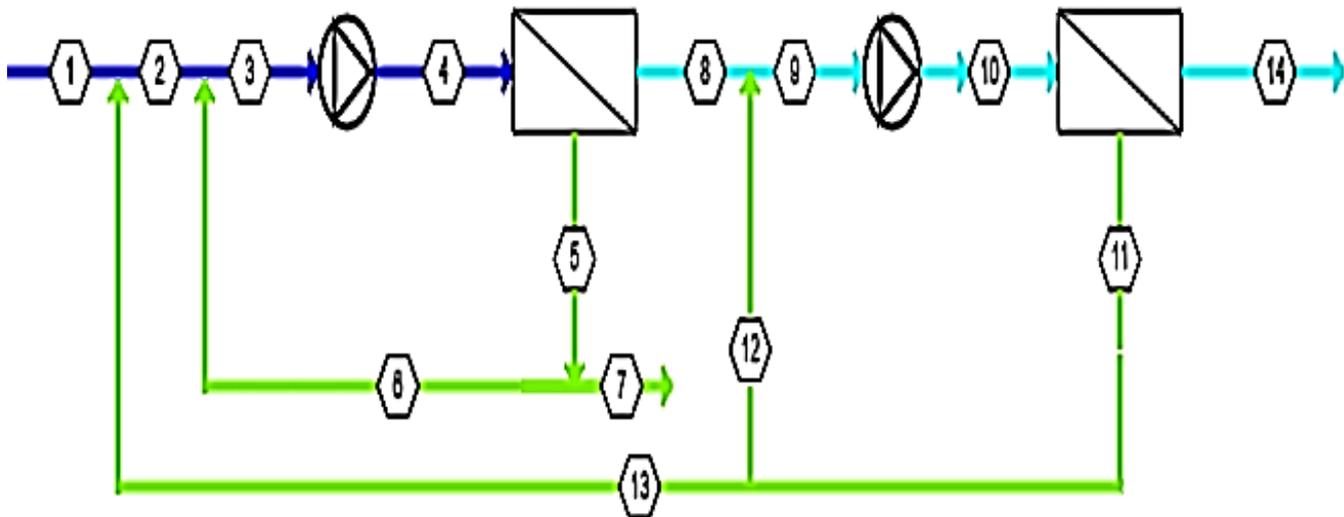
Le concentrât produit par le premier élément membranaire devient l'alimentation du deuxième élément membranaire, et ainsi de suite jusqu'au quatrième élément. Chaque élément membranaire contribue à la réduction de la concentration des solutés dans le flux de concentrât, conduisant à une plus grande récupération de perméat.



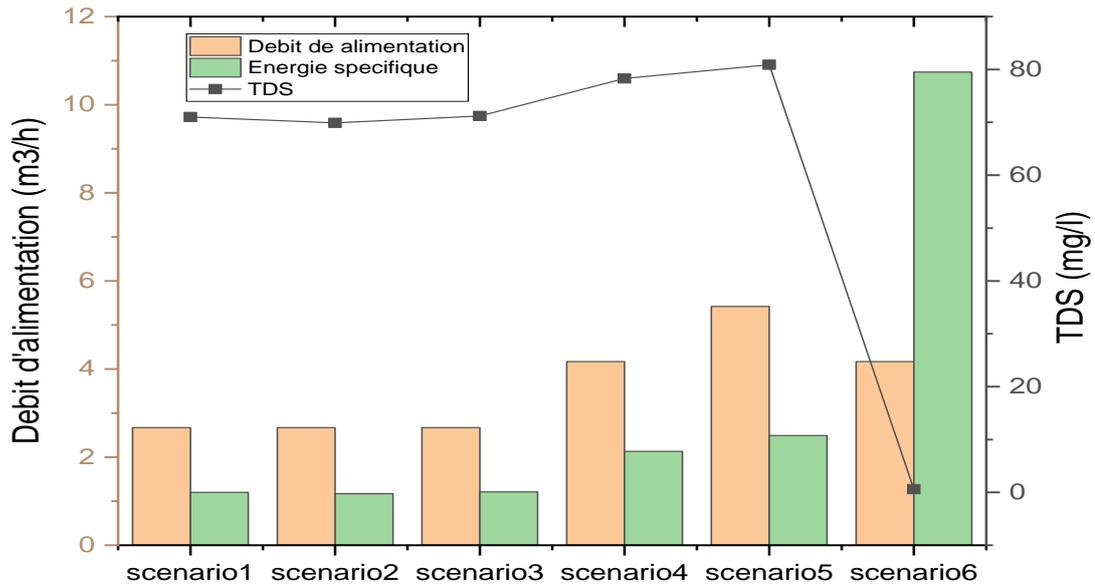
**Figure III-6:** Présentation schématique d'un système « configuration 05 ».

**Scénarios 6**

Dans ce scénario, la configuration utilisée est un système à double passe avec un tube de pression dans chaque passe. Chaque passe comprend deux (02) éléments membranaires qui sont connectés en parallèle. Le perméat produit par la première passe devient l'alimentation de la deuxième passe. Cette configuration va permettre d'améliorer la qualité de l'eau traitée en effectuant un traitement supplémentaire. Le flux de perméat produit lors de la première passe est soumis à une seconde passe de traitement pour éliminer davantage de solutés et obtenir une eau de qualité meilleure.

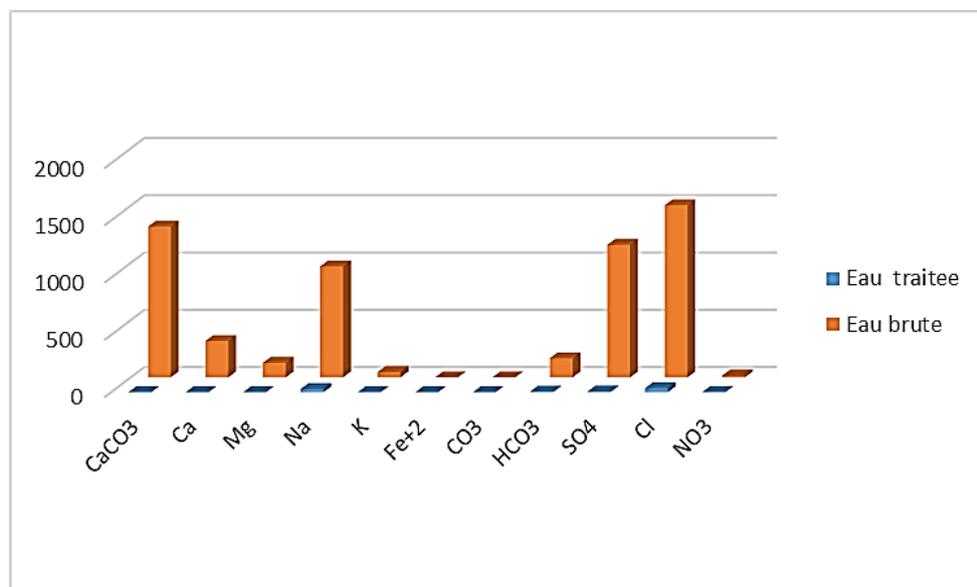


**Figure III.7:** Présentation schématique d'un système à double passe « scenario 06 »



**Figure III.8:** Variation de la TDS d'eau produite, l'énergie spécifique et débit d'alimentation pour les différents scénarios, ESPA02-4040.

La figure III.8 présente une comparaison des résultats obtenus concernant la TDS, le débit d'alimentation et la consommation d'énergie spécifique pour les différentes configurations étudiées. On constate que la consommation d'énergie pour les trois premiers scénarios est faible et plus spécialement pour le scénario3. La figure III.9 montre l'analyse chimique avant et après le traitement de l'eau.



**Figure III.9:** Résultats de l'analyse chimique de l'eau avant et après le traitement par la membrane 'ESPA2-4040 « scenario3 ».

La comparaison des analyses de concentrations des composés chimiques de l'eau brute et celle traitée par osmose inverse montre des réductions significatives pour la plupart des composants. Les concentrations de CaCO3, Ca, Mg, Na, K, Fe+2, CO3, HCO3, SO4, Cl et NO3

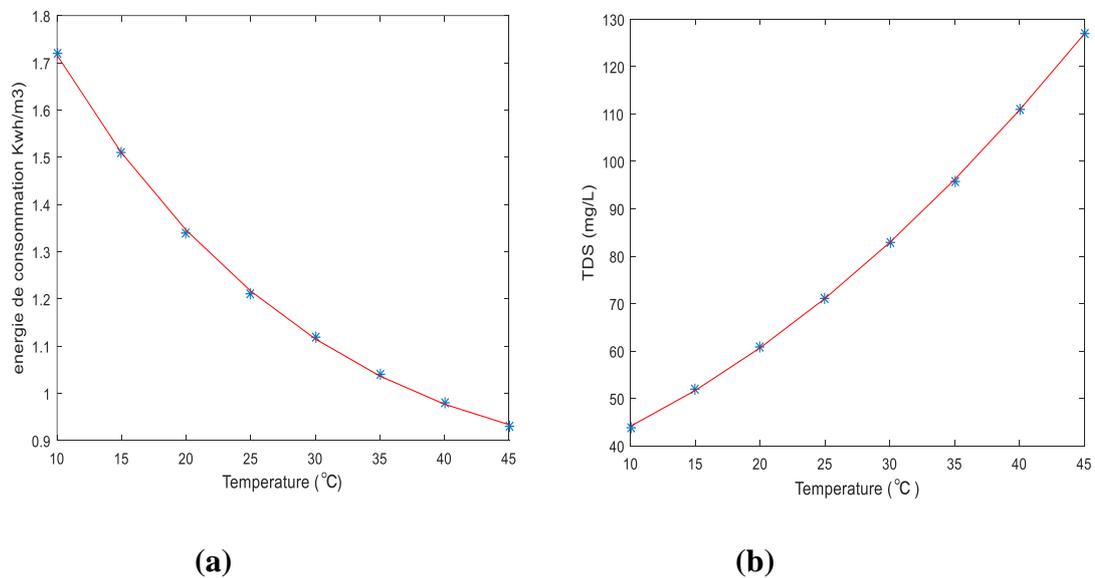
diminuent considérablement dans l'eau traitée par rapport à l'eau brute, ce qui démontre l'efficacité du système de filtration par osmose inverse dans l'élimination de ces composés indésirables. Le scénario 3 s'est avéré être la meilleure configuration du système pour obtenir une eau traitée de haute qualité, avec des concentrations réduites de ces éléments (organiques et inorganiques). Cependant, pour notre étude, nous avons choisi le système en configuration 3 en raison de la disponibilité du tube de pression sur le marché national, constitué d'une seule membrane de quatre pouces 4040, et qui répond parfaitement à nos besoins spécifiques.

### III.2.1.6 Effet de la température sur la performance de la membrane

La figure III-10 illustre les résultats numériques obtenus en configuration 3 qui représentent l'énergie consommée et les TDS pour différentes valeurs de températures de l'eau d'alimentation en utilisant la membrane « ESPA02-4040 ».

La courbe montre une augmentation progressive du TDS avec l'augmentation de la température. On note que lorsque la température passe de 10°C à 45°C, le TDS augmente de 43,9 mg/l à 127 mg/L. Pour ajuster le modèle de régression de l'effet de l'augmentation du TDS sur l'augmentation de la température, une approche possible consiste à utiliser une équation polynomiale d'ordre 2 ( $TDS = 0.0284T^2 - 0.8058T + 33.2351$ ).

En général, une augmentation de la température peut augmenter la perméabilité de la membrane, ce qui signifie une plus grande capacité de la membrane à laisser passer les solutés dissous. Cela peut entraîner une augmentation du TDS de l'eau traitée « perméat ».



**Figure III.10:** Variation de l'énergie consommée (a) et la TDS(b) en fonction de la température .d'eau d'alimentation en utilisant la membrane « ESPA02-4040 ».

Par ailleurs, la température peut provoquer la formation de dépôts ou de fouillage sur la surface de la membrane. Des températures élevées peuvent aussi favoriser la croissance de micro-organismes tels que les bactéries et les algues, ainsi que d'autres substances qui peuvent

obstruer les pores de la membrane. Cela peut entraîner une diminution de l'efficacité de la membrane et une augmentation du TDS dans le perméat.

L'analyse du graphique montre clairement que l'augmentation de la température de 10 °C à 45 °C entraîne une diminution exponentielle de la consommation d'énergie dans le système d'osmose inverse. Pour faire la courbe d'ajustement de l'effet de l'augmentation de la consommation d'énergie sur l'augmentation de la température, une approche possible consiste à utiliser une équation exponentielle d'ordre 2 ( $E_c = \exp(0.0003T^2 - 0.0326T + 0.296)$ ).

Cette observation peut être expliquée par le fait que les molécules d'eau acquièrent une plus grande énergie cinétique à des températures plus élevées, ce qui facilite leur passage à travers les pores de la membrane. En conséquence, la résistance à l'écoulement de l'eau diminue, ce qui réduit la quantité d'énergie nécessaire pour le processus d'osmose inverse. Ainsi, il est évident que la température joue un rôle significatif dans l'efficacité énergétique du système d'osmose inverse, avec une consommation d'énergie plus faible observée à des températures plus élevées.

### III.2.2 Dimensionnement d'une installation solaire PV en site isolé

Le dimensionnement du système PV a été réalisé selon deux méthodes. La première analytiquement et la seconde à l'aide du logiciel PVsyst.

#### A. Dimensionnement analytique

##### A.1 Estimation des besoins en électricité

Avant de dimensionner un système photovoltaïque avec stockage, nous avons estimé nos besoins en électricité comme le montre le tableau III-4 suivant.

**Tableau III-4:** besoins du system .

Pompe	Puissance nominale (kW)	Heures d'utilisation journalière	Consommation d'énergie journalière (kWh/j)
PHP	1.5	4	6

En considérant ces facteurs, la puissance totale requise selon l'équation II.12 s'élève à 2000W<sub>C</sub>.

En prenant en compte les données de PVGIS, le nombre d'heures équivalentes pour le site de Djamaa est estimé à 4 heures. Cela signifie qu'en moyenne, l'ensoleillement maximal, correspondant à une puissance de 1000 W/m<sup>2</sup>, est disponible pendant environ 4 heures par jour dans cette région.

Donc : selon l'équation II.16  $P_{ond} = \frac{2000 \cdot 1.25}{0.9} = 2666.66 \text{ w}$  .

Dans ce cas :  $P_{ond} = 2666.66 \text{ W} > 2000 \text{ W}$ , il serait logique de choisir un onduleur ayant une tension de sortie de 48V.

Pour notre système PV étudié, nous avons choisi un onduleur ayant une capacité de puissance de 3000 W et une tension de sortie de 48 V. La tension du système sera donc également de 48 V, puisqu'elle est déterminée par la tension de l'onduleur.

### A.2 Détermination du nombre de panneaux PV

Pour l'étude, nous avons choisi un panneau photovoltaïque polycristallin dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$P_c = 250 \text{ W}_c, V = 30.9 \text{ V}, I_{cc} = 8.75 \text{ A}, V_{oc} = 36.6 \text{ V}.$$

En utilisant l'équation II.14 on détermine le nombre de panneaux analytiquement qui serait 8. Comme le système fonctionne avec une tension de 48 volts, le choix s'est porté sur deux chaînes en série, ou chaque chaîne contenant 4 panneaux en parallèle.

### A.3 Dimensionnement des batteries de stockage

Le dimensionnement de batteries fera pour les conditions suivantes :  $c = 250 \text{ Ah}$  et  $V = 24 \text{ V}$ . ( $P_d = 80\%$  et  $N = 3 \text{ jour}$ ), ce qui permet de déterminer à partir de l'équation II.15 :

$$C = \frac{6000 * 3}{24 * 0.8} = 937.5 \text{ Ah}.$$

Le nombre de batterie serait égal à la capacité nécessaire que divise la capacité unitaire de la batterie choisie à savoir 4 batteries. Elles seront positionnées en (02) chaînes en série, chaque chaîne contenant deux (02) batteries en parallèle.

### A.4 Dimensionnement du régulateur

Pour dimensionner le régulateur, on doit calculer l'intensité du courant d'entrée du régulateur  $I_e$  en fonction du nombre de modules PV, avec  $I_{mpp} = 8.1 \text{ A}$ , tel que donnée au chapitre 2, équation II.17.

Le calcul a permis d'obtenir un courant de l'ordre de 32 A, d'où le choix d'un régulateur de charge MPPT dont les caractéristiques sont de  $I_e = 45 \text{ A}$ ,  $V = 48 \text{ V}$ .

### A.5 Dimensionnement des câbles électriques

Dans les conditions standards, la chute de tension dans les câbles électriques, est estimée à 1%, sachant que  $I_e = I_{ccs} = 32 \text{ A}$ ,  $V_{ocs} = V_{oc} * 2 = 36.6 * 2 = 73.2 \text{ V}$ , la chute s'élève donc à  $U_c = 0.732 \text{ V}$ , d'où la détermination de la résistance

$$R = \frac{U_c}{I_{ccs}} = \frac{0.732}{32} = 0.022875 \Omega$$

$I_{ccs}$  : courant maximale de SPV.

$V_{ocs}$  :: tension maximale de SPV.

La section est déterminée à partir de la longueur des câbles selon l'équation II.20 donnée au chapitre 2 est :

Pour une longueur du câble entre le panneau et le régulateur de 10m, la section est de 7.53 mm<sup>2</sup>, alors que la section des câbles de longueur de 2 m entre Batterie-régulateur et panneaux-régulateur, la section est estimée à 1.5 mm<sup>2</sup>. Le choix retenu est S = 2 mm<sup>2</sup>, selon la disponibilité sur le marché national.

## B. Dimensionnement à l'aide du logiciel PVSYST

### B.1 Résultats du dimensionnement d'un générateur PV par simulation numérique (Psyst )

Le système a été étudié pour le site de Djamaa El Oued, situé à une latitude de 33°31' 53" et une longitude de 5 °59 ' 28 "

L'inclinaison des panneaux solaires a été fixée à 33.53° pour maximiser l'efficacité de la production d'énergie. Le système conçu fonctionne 4 h/jour avec stockage d'énergie. Les résultats de simulation obtenus pour le système photovoltaïque étudié sur le site de Djamaa El Oued sont présentés sous forme des graphes, tableaux et un rapport final.

**Tableau III-5:** Résultats de la simulation.

Besoin d'utilisateur	Nombre	Type
Module PV	08 : 2 chaînes en série, chaque chaîne contenant 4 panneaux en parallèle.	Poly 250W <sub>c</sub> , 55 V, 33A
Batterie	2 en parallèle	V= 26 V Capacité= 257 Ah
Régulateur	01	MPPT convertisseur 53.2A / 50.1 V

### B.2 Diagramme journalier d'entrée/sortie

Le diagramme journalier d'entrée/sortie illustre la relation entre l'énergie produite par le système et l'irradiation solaire incidente. Idéalement, l'énergie absorbée devrait augmenter proportionnellement au rayonnement solaire. Dans la réalité, cependant, cette relation peut présenter un certain degré de variabilité aléatoire. Lorsque l'irradiation augmente, on s'attend généralement à une augmentation de l'énergie absorbée par le système, mais cette augmentation peut être influencée par des facteurs aléatoires tels que l'ombrage partiel, la variation des conditions météorologiques, ou d'autres sources de perturbations.

En examinant le diagramme d'entrée/sortie, on peut identifier des schémas ou des tendances qui indiquent les jours où le système est moins efficace que prévu. Cela peut aider à diagnostiquer des problèmes potentiels, tels que des obstructions partielles des panneaux solaires ou des perturbations dans le système de stockage d'énergie

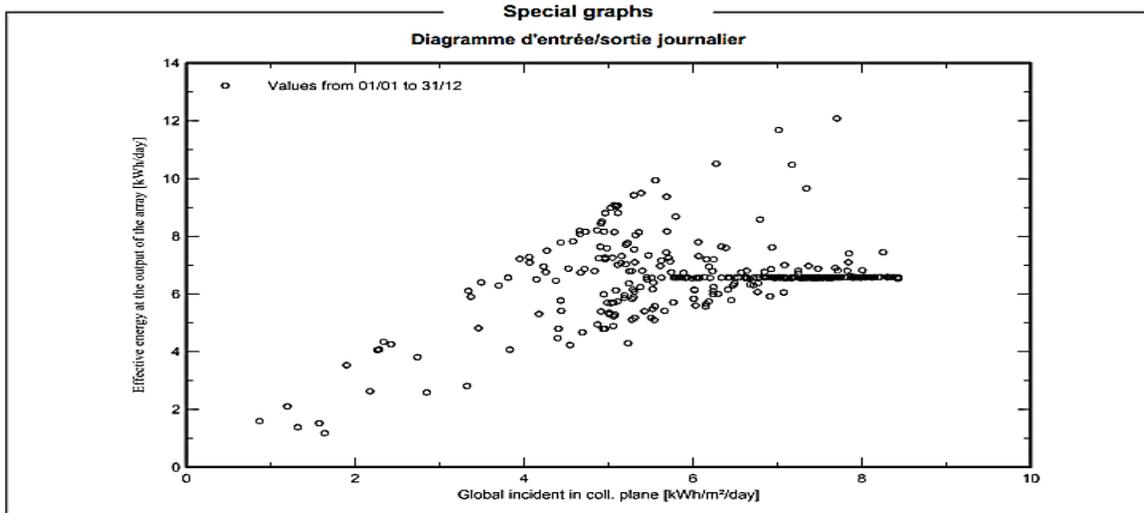


Figure III.11: Diagramme d'entrée/sortie journalier de notre système.

### B.3 Bilan énergétique

Les résultats du tableau montrent une relation proportionnelle entre l'énergie produite par le champ photovoltaïque et les besoins énergétiques de l'utilisateur tout au long de l'année. Cette relation peut être quantifiée par la fraction d'utilisation (SF) définie par le rapport  $\frac{E_{util}}{E_{besoins}}$ . Le rapport entre l'énergie produite par le champ photovoltaïque et les besoins énergétiques de l'utilisateur, tel que représenté par la fraction d'utilisation, fournit une indication de l'efficacité et de la satisfaction des besoins énergétiques du système photovoltaïque.

Tableau III-6: Bilan énergétique de la simulation PVsyst..

**Balances and main results**

	GlobHor kWh/m²	GlobEff kWh/m²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	111.1	153.5	270.8	68.8	0.000	186.7	186.7	1.000
February	126.1	158.7	274.8	97.1	0.000	168.7	168.7	1.000
March	169.0	190.3	326.7	132.0	0.000	186.7	186.7	1.000
April	204.0	213.3	349.9	160.8	0.000	180.7	180.7	1.000
May	232.8	226.9	368.5	173.5	0.000	186.7	186.7	1.000
June	239.0	225.6	357.5	168.6	0.000	180.7	180.7	1.000
July	246.1	235.2	368.7	173.2	0.000	186.7	186.7	1.000
August	220.2	223.1	348.6	153.3	0.000	186.7	186.7	1.000
September	178.2	195.6	314.7	126.3	0.000	180.7	180.7	1.000
October	144.9	173.9	288.5	95.9	0.000	186.7	186.7	1.000
November	98.0	125.9	215.8	40.0	0.000	180.7	180.7	1.000
December	98.1	138.3	246.4	51.9	0.000	186.7	186.7	1.000
Year	2067.4	2260.3	3731.0	1441.3	0.000	2198.8	2198.8	1.000

**Legends**

GlobHor	Global horizontal irradiation	E_User	Energy supplied to the user
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings	E_Load	Energy need of the user (Load)
E_Avail	Available Solar Energy	SolFrac	Solar fraction (EUsed / ELoad)
EUnused	Unused energy (battery full)		
E_Miss	Missing energy		

Le diagramme résume les pertes de la production du système PV à savoir : les pertes ohmiques du câblage, effet d'incidence, pertes dues à la température du champ, pertes dues à la qualité des modules..etc. En effet, l'énergie produite par le champ PV (énergie sortie du champ) estimée à 4547 KWh est réduite à 2199 KWh à la sortie (figure III.12).

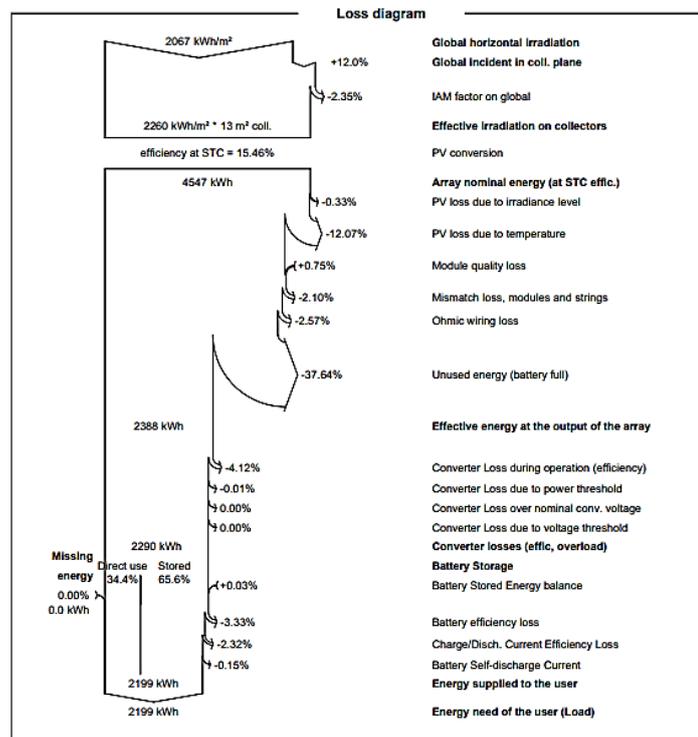


Figure III.12: Diagramme des pertes sur l'année entière. .

### III.2.3 Dimensionnement de l'éolien

#### A. Données sur le vent et description du site

Djamaa El Oued est située au sud de la wilaya d'El Oued (nord du Sahara) en Algérie. Les coordonnées de latitude et de longitude du site de collecte des données sont d'environ 33°31' 53"de latitude et 5 °59 ' 28 "de longitude est, respectivement. Le site se trouve à une altitude de 28 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Les données de vent utilisées dans notre étude ont été obtenues à partir de l'aéroport Geumar situé au nord d'El Oued à une hauteur de 62m. La latitude et la longitude du lieu de collecte des données sont respectivement 33°31' 53"N et 5 °59 ' 28 "E(figure III-13).

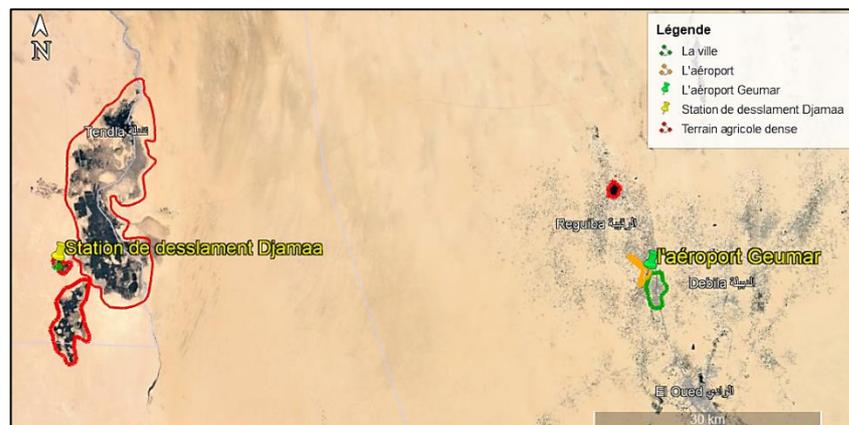
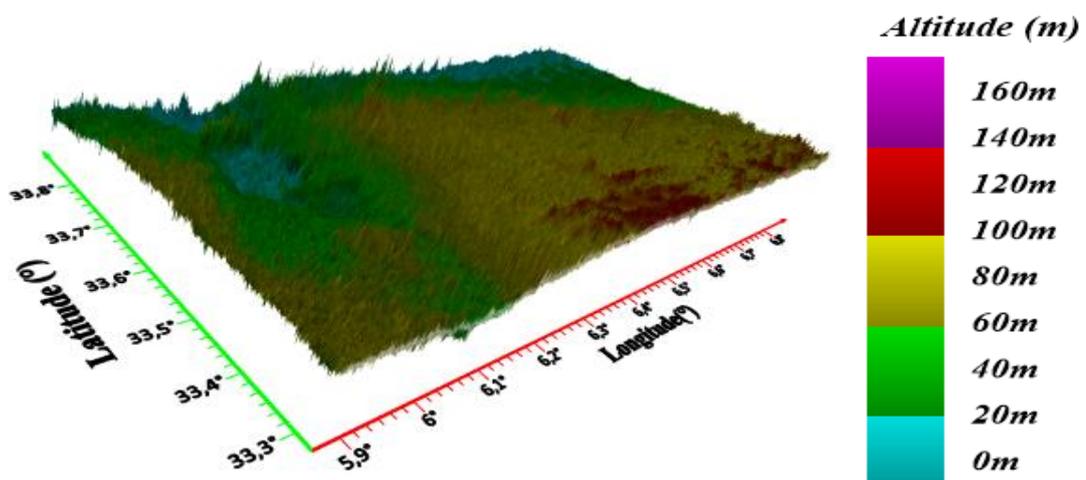


Figure III.13: Sélection des zones pour l'identification de la rugosité de chaque partie du terrain sur Google Earth.

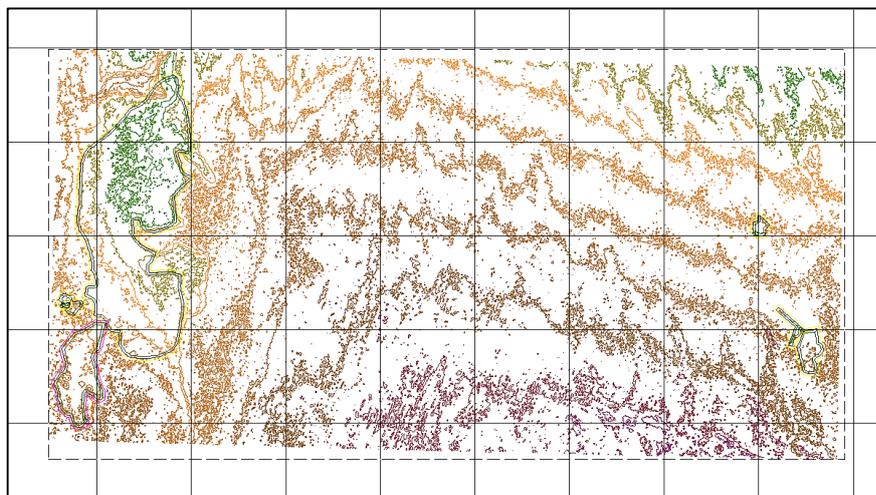
La vitesse et la direction du vent ont été relevées à intervalles réguliers de 3 heures. Afin d'assurer sa fiabilité, l'étude actuelle est le résultat de 10 années de mesures à intervalles réguliers de 3 heures, de 1981 à 1990.

La figure III-14 présente une carte topographique de la région d'Oued Djamaa, qui est basée sur un modèle numérique de terrain (MNT). Ce modèle enregistre les élévations (les altitudes) en mètres par rapport au niveau moyen de la mer. En traitant ces données, une carte est générée avec des courbes représentant l'altitude du terrain en différents points.

La rugosité du sol (Figure III-15), déterminée par la présence d'éléments inertes tels que la végétation, les zones urbaines, les rochers et les irrégularités topographiques, influence considérablement la vitesse et la direction du vent près de la surface terrestre. Chaque élément du terrain est caractérisé par une classe de rugosité ( $Z_0$ ) qui dépend de sa hauteur et de sa densité. Cette rugosité du sol est prise en compte dans les modèles de vent pour estimer de manière réaliste la vitesse et la direction du vent à différentes altitudes. Comprendre la rugosité du sol est essentiel pour la modélisation précise des conditions locales du vent dans une région donnée.



**Figure III.14:** Topographie du site.



**Figure III.15:** Longueurs de rugosité et topographie de la région étudiée.

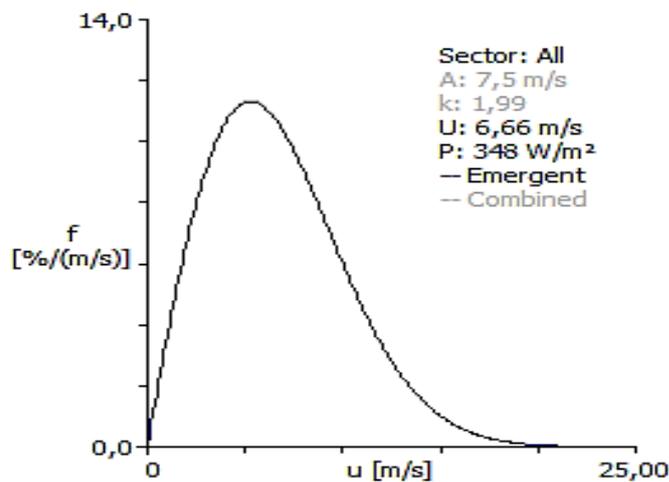
### B. L'éolienne utilisée

Pour le calcul de l'énergie produite par une éolienne il faut connaître ces caractéristiques. Les caractéristiques de l'éolienne choisie sont affichées dans le tableau. L'aérogénérateur « Permanent Magnet 3KW » a été choisi pour l'étude.

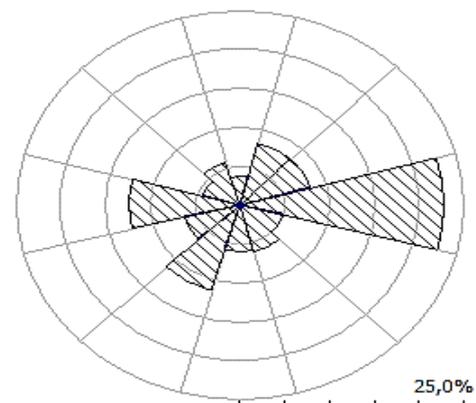
**Tableau III-7:** Fiche technique de la Permanent Magnet 3KW[2] .

Diamètre de rotor	3.8 m
Surface balayée	11.34 m <sup>2</sup>
Nombre de pale	3
La hauteur de moyeu	27 m
Longueur de pale	1.9 m
Vitesse de rotation nominale	250 rpm
Puissance nominale	3 kW
Vitesse de démarrage	2 m/s
Vitesse de coupure	60 m/s
Vitesse nominale	11 m/s

Après la simulation sous Wasp, les résultats du traitement des données ont donné les résultats suivants :



**Figure III.16 :** Distribution annuelle des fréquences.



**Figure III.17 :** Rose de vent

L'analyse des paramètres de Weibull de la région d'étude et le parc eolienn utilisee montre que le paramètre de forme k et le paramètre d'échelle A sont égale à 1,99 et 7.55 m/s, respectivement, avec une densité de puissance de 348 W/m<sup>2</sup> comme indiqué dans la figure III-16.

Ces résultats indiquent des conditions favorables à la production d'énergie éolienne dans la région d'étude. Les vitesses de vent relativement élevées, la vitesse moyenne élevée et la densité de puissance importante renforcent le potentiel d'utilisation de l'énergie éolienne. Cela justifie l'installation d'un parc éolien pour exploiter cette ressource renouvelable et contribuer à la transition vers une production d'énergie plus durable.

Les résultats indiquent que la direction dominante du vent à Djamaa El Oued est Est (figure III-17). Cela signifie que les vents soufflent principalement de l'Est vers les autres directions. Ces informations sont importantes pour des projets éoliens, car ils permettent d'orienter les éoliennes de manière optimale afin de maximiser la capture de l'énergie éolienne. Cependant, d'autres facteurs tels que la vitesse du vent et la topographie locale doivent également être pris en compte pour évaluer pleinement le potentiel éolien de la région.

Utilisant des résultats de la station, la climatologie régionale est produite en fonction de l'altitude et de la longueur de rugosité (voir tableau III-8).

**Tableau III-8:** Résumé du climatologie éolien régional

Hauteur	Paramètre	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m	1,50 m
10 m	Weibull A [m/s]	7,15	5,14	4,47	3,51	2,35
	Weibull k	1,98	1,76	1,76	1,76	1,78
	Vitesse moyenne U [m/s]	6,33	4,58	3,98	3,13	2,09
	densité de la puissance E [W/m <sup>2</sup> ]	300	130	85	41	12
25 m	Weibull A [m/s]	7,83	6,16	5,53	4,63	3,57
	Weibull k	2,04	1,88	1,87	1,87	1,87
	Vitesse moyenne U [m/s]	6,94	5,47	4,91	4,11	3,17
	densité de la puissance E [W/m <sup>2</sup> ]	382	204	148	88	40
50 m	Weibull A [m/s]	8,41	7,13	6,48	5,61	4,58
	Weibull k	2,10	2,09	2,05	2,02	2,00
	Vitesse moyenne U [m/s]	7,45	6,31	5,74	4,97	4,06
	densité de la puissance E [W/m <sup>2</sup> ]	462	282	217	142	78
100 m	Weibull A [m/s]	9,10	8,39	7,69	6,77	5,74
	Weibull k	2,04	2,24	2,25	2,27	2,24
	Vitesse moyenne U [m/s]	8,06	7,43	6,81	6,00	5,08
	densité de la puissance E [W/m <sup>2</sup> ]	600	433	332	224	138
200 m	Weibull A [m/s]	9,95	10,13	9,28	8,23	7,11
	Weibull k	1,97	2,17	2,18	2,20	2,23
	Vitesse moyenne U [m/s]	8,82	8,97	8,22	7,29	6,30
	densité de la puissance E [W/m <sup>2</sup> ]	814	783	599	414	264

Les données présentées dans le tableau III-9 indiquent que l'éolienne est mieux positionnée en termes de facteurs de forme et d'échelle, de vitesse moyenne du vent et de densité de puissance disponible. L'indice de robustesse (RIX) confirme cette meilleure position. Il est estimé que le parc éolien sélectionné a un potentiel de production d'électricité brute et nette de

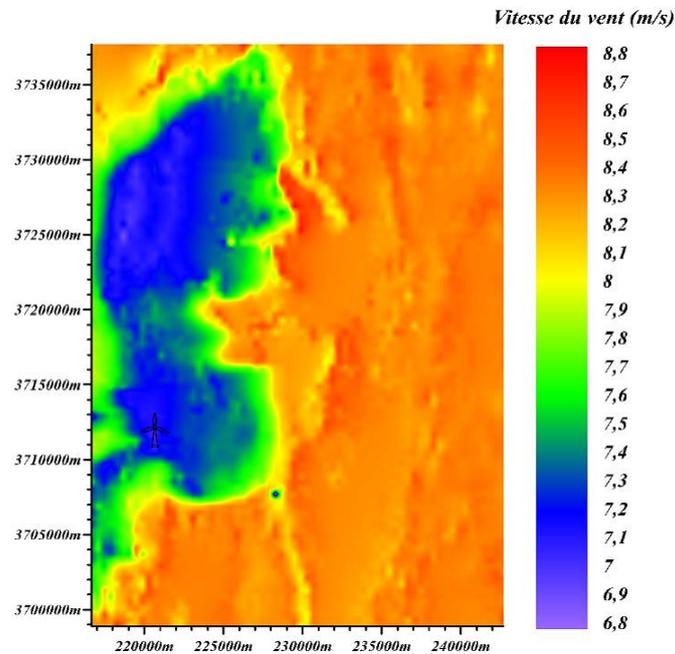
9.495 MWh pour une année, des études plus approfondies sont nécessaires pour évaluer pleinement le potentiel énergétique du site.

**Tableau III-9:** Estimation des principaux paramètres.

Parc éolienne	NET AEP MWh	A (m/s)	K	V (m/s)	P (w/m <sup>2</sup> )	RIX (%)
Permanent Magnet 3KW	9.495	7.55	1.99	6.66	348	0

La figure III.18 illustre la distribution annuelle de la vitesse du vent à la hauteur de 27 m pour la région Djamaa El Oued .La carte révèle une vitesse maximale du vent de 8,8 m/s dans la région, tandis que dans notre installation de turbine, la vitesse du vent est mesurée à 7,7 m/s. Cette vitesse est considérée comme suffisante pour une production d'énergie éolienne efficace. Malgré une légère différence par rapport à la vitesse maximale régionale, notre installation peut encore exploiter le potentiel énergétique du vent de Mani appropriée.

Par conséquent on peut considérer la région comme favorable à l'installation de fermes éoliennes de grande puissance.



**Figure III.18:** Carte des vitesses de vent annuelle à 27 m au-dessus du sol.

### III.3 Montage du système d'osmose inverse

Après avoir effectué la conception, le dimensionnement et l'optimisation d'un système d'osmose inverse d'une capacité de production de 24m<sup>3</sup>/J, nous avons acquis les différents composants nécessaires pour sa réalisation au niveau de l'équipe de dessalement DDESM, UDES (FigureIII.19).



**Figure III.19:** Présentation l'ensemble du matériel acquis et réalisé nécessaire pour la mise en place d'un système d'osmose inverse.

Nous signalons que certains achats ont pris beaucoup de temps vu le manque de quelques produits comme la vanne en inox, le pressostat, le tube de pression et autres accessoires. Nous avons commencé par le dimensionnement d'une structure en Inox « SKID » qui peut porter quatre membranes de 4040. La structure a été réalisée au niveau de l'atelier Mécanique de l'UDES. Toutes les étapes de réalisation ont été suivies afin de mener à bien notre système (Figure III.20).

Plusieurs modifications ont été apportées sur la structure pour minimiser au maximum la quantité de l'Inox utilisée et de faciliter le montage d'autres équipements et accessoires. Au niveau de l'atelier mécanique, des supports en plastiques ont été fabriqués à l'aide de l'impression 3D pour poser des membranes en dessous afin d'éviter les frottements.



**Figure III.20** : Présentation du système d'osmose inverse réalisé.

## III.4 Tests expérimentaux et analyse des résultats

### III.4.1 Dispositif expérimental

Le système de purification de l'eau est constitué de deux membranes spirales d'osmose inverse de marque Toray LP 21-4040 qui assurent le dessalement des eaux saumâtres dans une gamme de salinité de 1 à 10g/L. La partie arrière contient deux pompes (haute et basse pression), les deux membranes, le filtre à cartouche et toute la tuyauterie comme le montre la figure III.21. La partie de face (avant) comprend les manomètres, les débitmètres, la vanne de pression, le pressostat, et le panneau automatique qui joue le rôle d'un contrôleur du pilote. Une prise intelligente a été utilisée pour mesurer la puissance électrique provenant d'une source renouvelable PV, (voir annexe).



**Figure III.21:** Système d'osmose inverse installé sur la plateforme de l'UDES .

#### III.4.2 Conditions des tests Expérimentaux

Les tests effectués ont pour objectif évaluation des performances du système membranaire d'osmose inverse d'une capacité de production 450L/h connectée à un champ PV, dans des conditions climatiques réelles du site de Bou-Ismaïl en utilisant différentes concentrations de sel dans l'eau d'alimentation, figure III.22. Les débits et les pressions du perméat et de l'eau concentrée (concentrât) sont lus directement à partir des débitmètres et des manomètres, comme le montre la figure III.21. De plus, nous utilisons un multi-paramètre pour mesurer le TDS, le pH et la conductivité de l'eau, (figure 5(anexe)).

L'eau de puits de l'UDES caractérisée par une salinité de 1,2 g/L a été utilisée pour préparer des eaux synthétiques avec différentes salinités proches des eaux saumâtres du sud de l'Algérie. Dans des conditions de température ambiante, nous avons analysé les paramètres physico-chimiques des eaux clés afin d'évaluer les performances du système, à savoir, les TDS, le pH, et la conductivité. Le TDS représente la concentration totale des solides dissous dans l'eau, le pH indique l'acidité ou la basicité de l'eau, et la conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Nous avons également mesuré les débits de perméat et de concentrat, qui représentent respectivement la quantité d'eau purifiée produite et la quantité d'eau rejetée lors du processus d'osmose inverse.

Enfin, la puissance requise pour faire fonctionner la pompe a été enregistrée. Elle représente l'énergie nécessaire pour maintenir la pression nécessaire dans le système. L'ensemble des résultats obtenus fournissent des informations précieuses sur l'efficacité du système pour le traitement de différentes sources d'eau en fonction de la qualité d'eau brute.

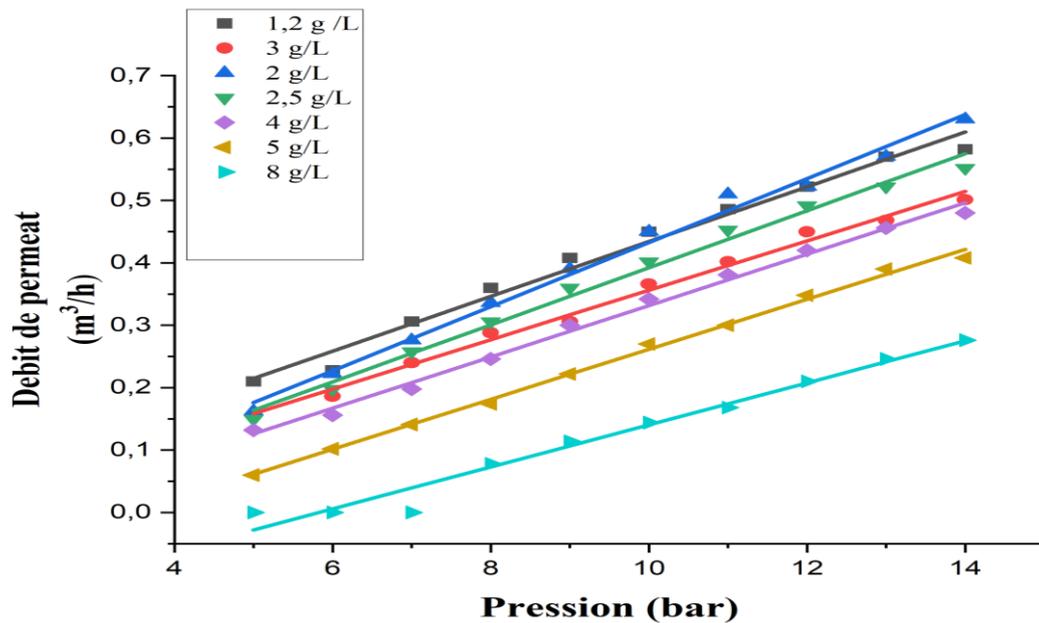
**III.4.3 Performance du système d’osmose inverse**

Les résultats de l'analyse physico-chimique des eaux saumâtres examinées sont regroupés dans le tableau III-10.

**Tableau III-10:** Résultats de l'analyse physico-chimique des eaux saumâtres.

TESTS	TDS(g/L)	pH	Conductivité (ms/cm)
01	1.2	8.25	2.44
02	2	7	4.7
03	2.5	7.84	4.96
04	3	7.58	5.95
05	4	7.65	7.33
06	5	7.55	9.18
07	8	7.59	13.69

**A. Analyse du débit en fonction de la salinité et de la pression**

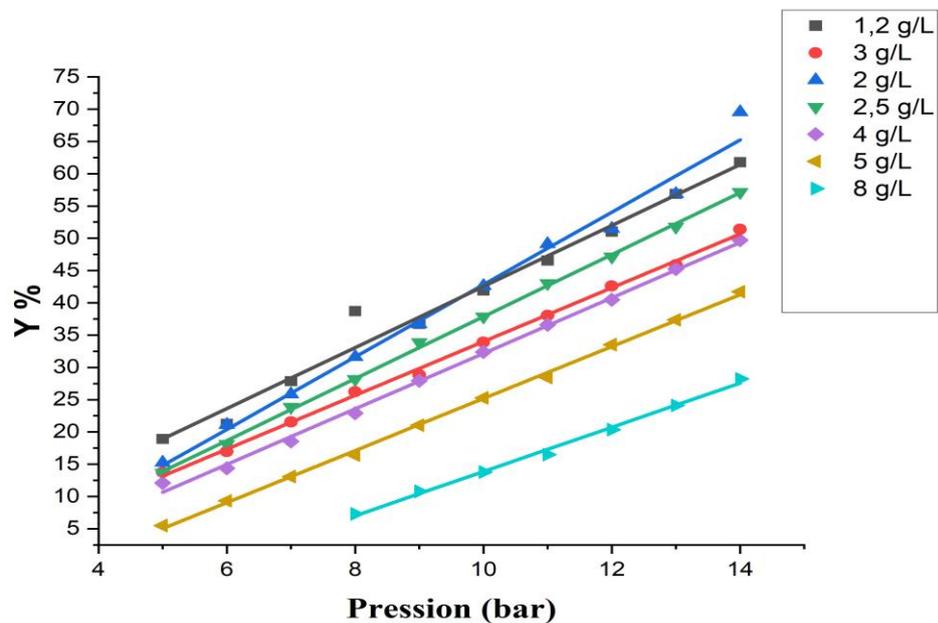


**Figure III.22:** Variation du débit de perméat en fonction de la pression pour les différentes salinités étudiées.

En figure figure III.22 est représentée la variation du débit de perméat en fonction de la pression pour les différentes salinités étudiées. Les courbes montrent que le comportement de la filtration ou la déminéralisation des eaux saumâtres suivent la même allure. Pour les

faibles et fortes salinités, nous constatons que lorsque la pression d'entrée augmente le débit du perméat augmente relativement. Nous notons, la pression minimale critique pour avoir du perméat (seuil de filtration membranaire) pour de faibles salinités est de 5 bars, par contre pour une forte salinité (8 g/L) elle est de 8 bars, figure III.22.

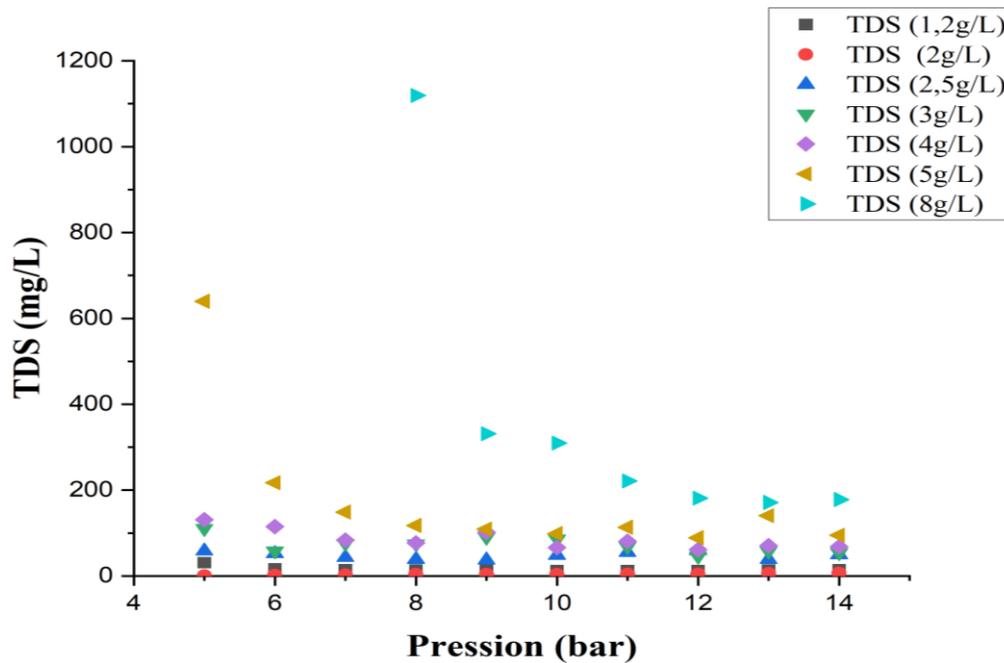
La figure III.23 représente la variation du taux de conversion associé à chaque salinité en fonction de la pression. Il est noté que ce taux de conversion est plus élevé pour les eaux à faible concentration en sel. Il varie entre 28 % et 61 % pour une eau saline de 8g/L et 1.2g/L respectivement. À cet effet, l'osmoseur atteint un taux de conversion optimal 61% avec une eau saumâtre de 1.2 g/L. Nous constatons que la performance de la membrane LP21-4040 est optimale pour le dessalement de l'eau saumâtre avec une salinité inférieure à 4g/L dont le taux de conversion est supérieur  $Y\% > 40\%$ .



**Figure III.23:** Variation du taux de conversion du module membranaire pour différentes salinités en fonction de la pression.

La figure III.24 ci-dessous illustre l'évolution des taux des sels dissous TDS de l'eau traitée en fonction de la pression appliquée pour des valeurs de salinités variant entre 1.2 et 8g/L. Les matières solides dissoutes totales comprennent des sels inorganiques (principalement du calcium, du magnésium, du potassium, du sodium, des bicarbonates, des chlorures et des sulfates) et de petites quantités de matière organique qui se dissolvent dans l'eau.

On remarque que pour des eaux synthétisées entre 1,2 à 5 g/L, la TDS est optimale pour une pression de 10bars. Par ailleurs, pour une eau synthétisée à 8g/L et à partir de 11 bars les TDS sont constants. En fait, nous constatons que le dessalement membranaire de l'eau d'alimentation de faible salinité (1200 mg/L) résulte des valeurs de salinité inférieures à 17 mg/L en fonction des pressions conformément à la qualité d'une eau osmosée. On remarque que lorsque la concentration en sel des eaux augmente, l'efficacité de la membrane diminue. À cet effet, nous constatons que la pression optimale de notre système peut atteindre les 14 bars, avec une qualité d'eau et un taux de conversion élevé.



**Figure III. 24:** Variation des TDS du perméat pour différentes eau d'alimentation en fonction de la pression.

Nous avons effectué des expérimentations pour évaluer les débits de perméat et de concentrat en fonction de la pression pour différentes salinités de l'eau saumâtre, comme indiqué dans la figure III.25.

### Faibles salinité

Pour des salinités plus faibles, on a observé une augmentation linéaire significative du débit de perméat avec l'augmentation de la pression d'entrée (figure III.25). En revanche, le débit de concentrât a diminué de manière rapide et linéaire. En effet, il existe une intersection entre le débit de perméat et le débit de concentrât, l'intersection se produit lorsque les débits de perméat et de concentrat atteignent un équilibre, c'est-à-dire que le débit de perméat est maximal et le débit de concentrat est également significatif. Ces résultats mettent en évidence que la membrane fonctionne selon un mécanisme de transfert par diffusion, où le débit de perméat est directement proportionnel à la pression appliquée, tandis que le débit de concentrât est inversement proportionnel à la pression.

Nous avons également constaté que, pour les salinités plus faibles, une pression minimale critique d'environ 5 bars est nécessaire pour obtenir une production initiale de perméat, même si le débit de perméat est initialement faible. Ces observations soulignent l'importance de la pression dans le processus d'osmose inverse pour l'eau saumâtre à faible salinité, où une pression adéquate est requise pour obtenir des débits de perméat optimaux.

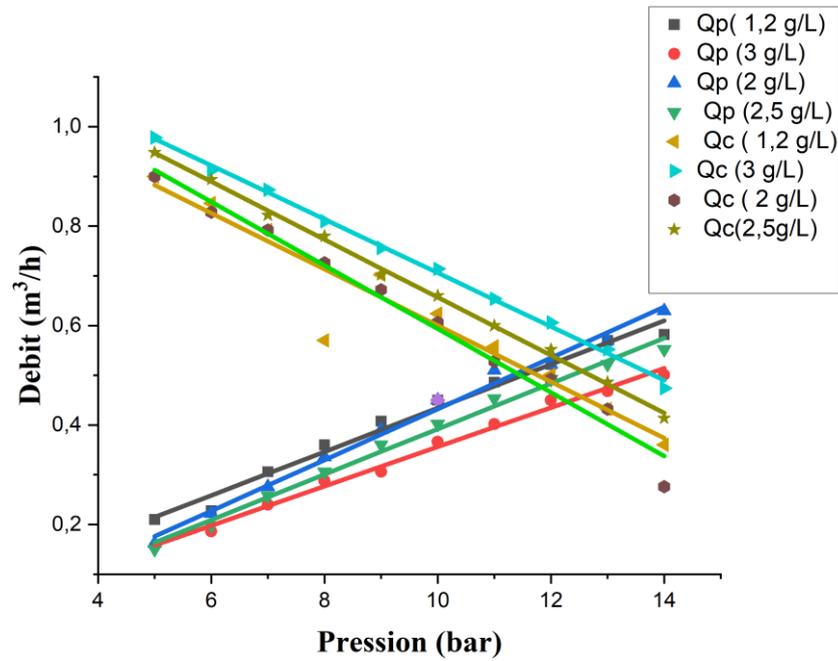


Figure III.25: Variation des débits en fonction de la pression pour les faibles salinités.

**Fortes salinités des eaux saumâtres**

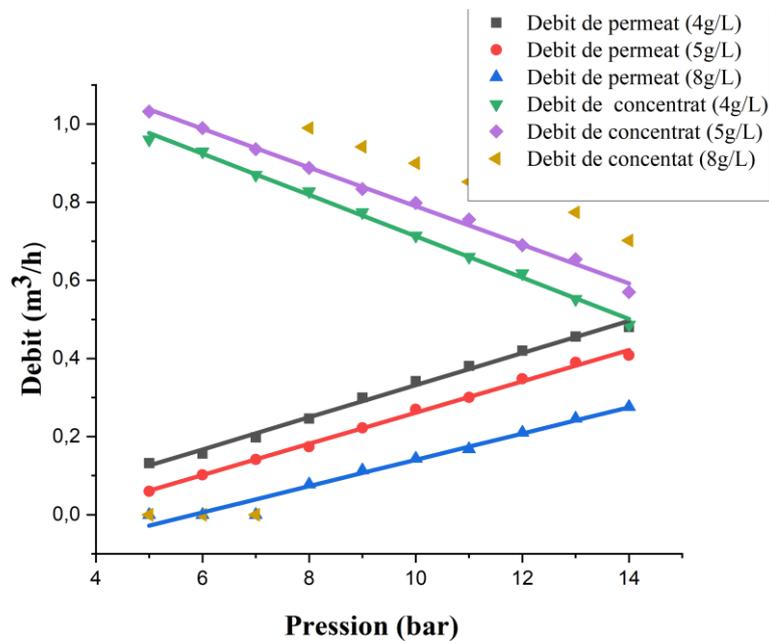


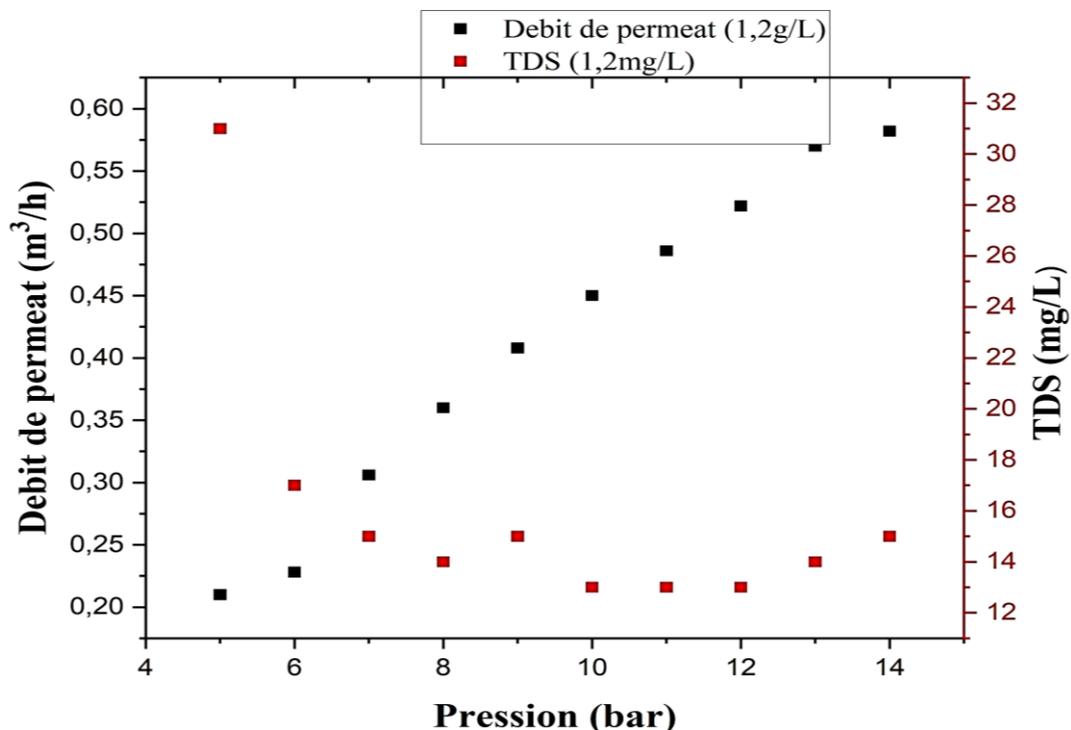
Figure III.26: Variation des débits en fonction de la pression pour les fortes salinités.

On remarque que les débits de perméat sont plus faibles pour les salinités élevées de l'eau saumâtre (figure III.26), en raison de l'impact de la salinité sur la performance de la membrane (perméabilité). De manière significative, à une salinité de 8 g/L, la production de perméat a commencé à une pression de 8 bars. Cela suggère qu'une pression plus élevée était nécessaire pour surmonter les effets de la salinité et obtenir des débits de perméat importants.

Il est important de noter qu'en présence d'une salinité élevée, il peut ne pas y avoir d'intersection entre le débit de perméat et le débit de concentrat dans le processus de dessalement par osmose inverse.

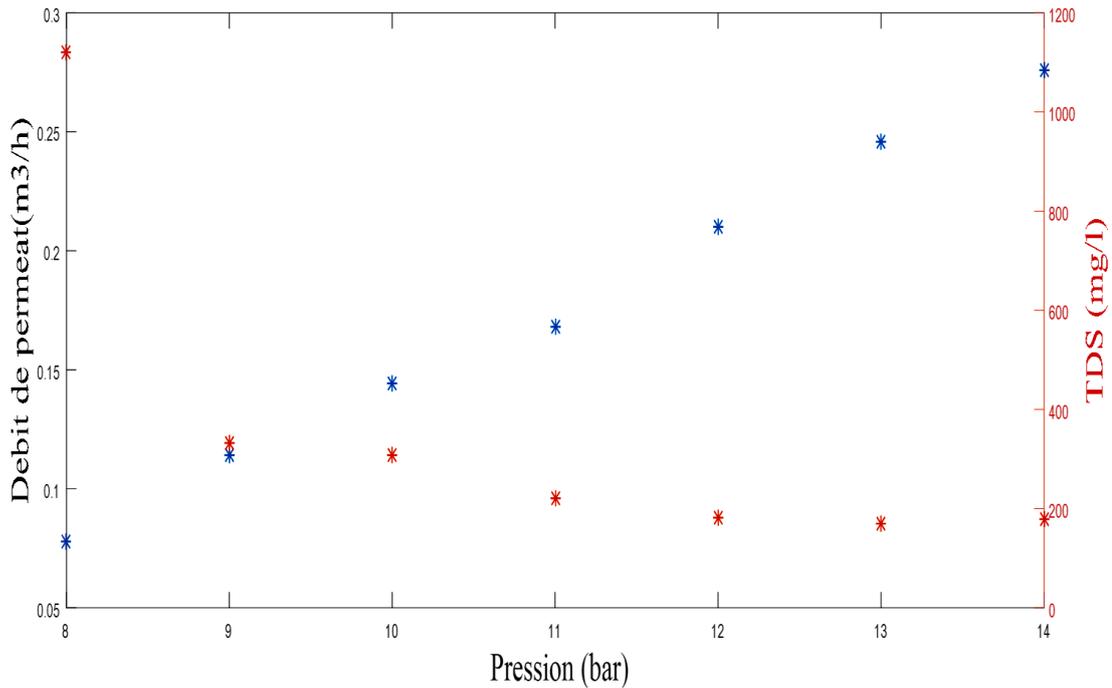
Dans les cas de salinité élevée, la différence de concentration entre l'eau salée et l'eau douce est plus importante, ce qui rend plus difficile le passage de l'eau à travers la membrane. Par conséquent, la production d'eau douce peut être limitée, tandis que le débit de rejet salé peut augmenter de manière significative.

Les figures III.27 et III.28 présentent les variations du débit de perméat et de la TDS en fonction de la pression d'entrée pour des deux salinités extrêmes de 1.2 g/L et 8 g/L respectivement. Pour une pression d'entrée de 5 bars, on a obtenu une TDS de 17 mg/L, accompagnée d'un débit de perméat de 0.6 m<sup>3</sup>/h (figures III.28). Cela indique que, pour cette salinité de 1.2 g/L, le taux de rejets des membranes est supérieur à 98%.



**Figure III.27:** Variation du débit du perméat pour une salinité de (1.2g/L) et TDS en fonction de la pression.

En revanche, pour une salinité plus élevée de 8 g/L, on constate que la pression minimale critique requise pour dessaler l'eau était de 8 bars. À cette pression, la valeur de TDS était de 1100 mg/L, tandis que le débit de perméat était de 0.27 m<sup>3</sup>/h, figures III.28. Cette différence de performance s'explique par la plus grande concentration de solides dissous dans l'eau de salinité élevée, ce qui rend le processus de dessalement plus difficile et demande une pression plus élevée. Ces résultats démontrent l'influence significative de la salinité sur les performances du procédé d'osmose inverse, où des salinités plus élevées nécessitent des pressions plus élevées pour obtenir des taux de conversion élevés (rendement).

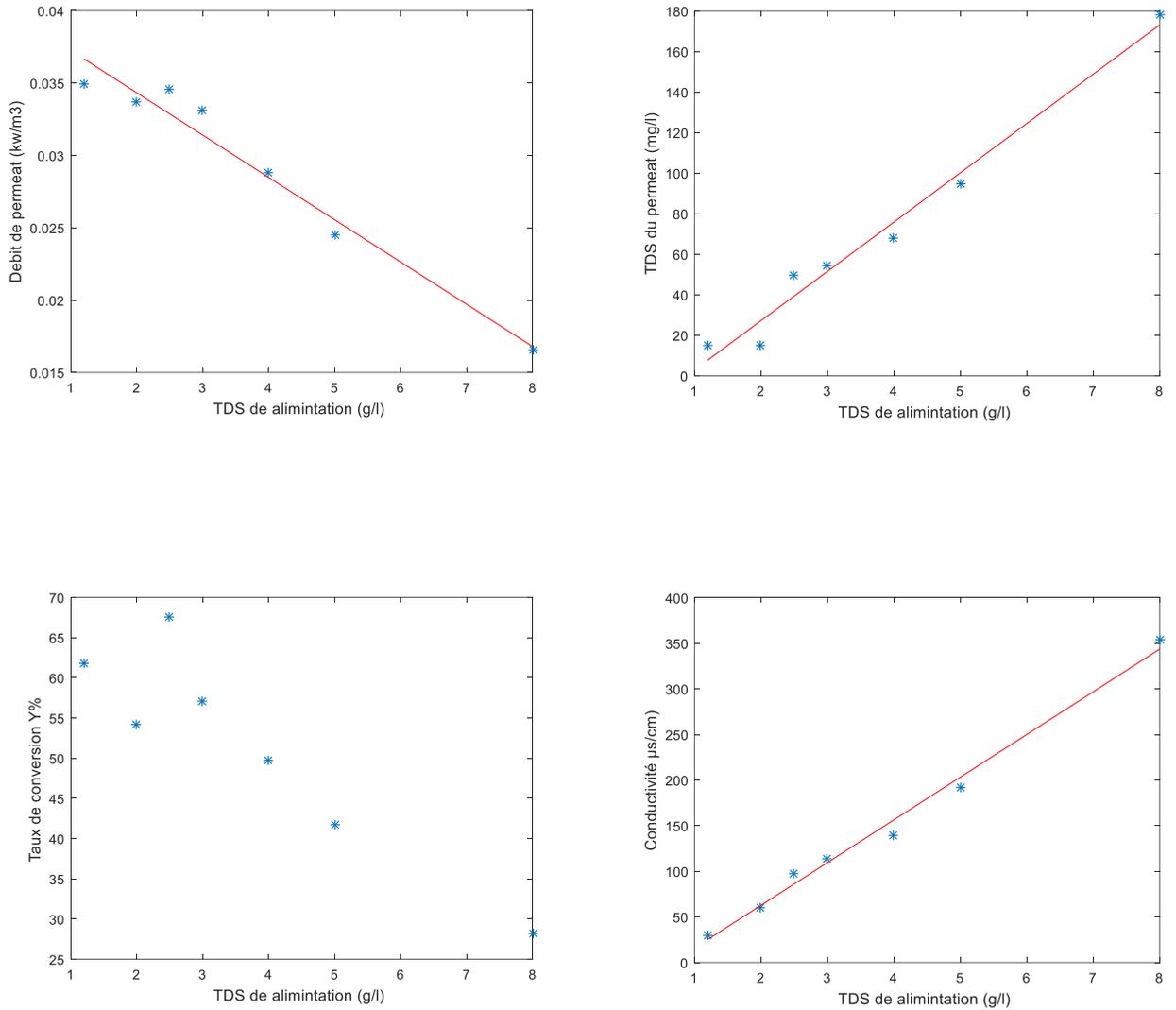


**Figure III.28 :** Variation du débit du perméat pour une salinité de (8g/L) et TDS en fonction de la pression.

### B. L'effet de salinité

L'effet de la salinité a été étudié en mesurant le débit du perméat pour différentes concentrations de sel à une pression fixe de 14 bars (pression optimale). Les résultats obtenus sont donnés dans la figure III.29. On observe que lorsque la concentration en sel de l'eau d'alimentation augmente, le débit du perméat diminue proportionnellement, ce qui entraîne une diminution du taux de conversion. Parallèlement, les valeurs de conductivité et de TDS augmentent avec l'augmentation de la concentration en sel de l'eau d'alimentation. Ceci indique une augmentation de la pression osmotique dans l'eau d'alimentation, ce qui nécessite une plus grande pression à l'entrée du système pour maintenir un débit de perméat optimal. En d'autres termes, une augmentation de la salinité de l'eau d'alimentation entraîne une augmentation de la pression osmotique, ce qui nécessite une pression plus élevée pour forcer l'eau à travers la membrane et produire du perméat. Cela entraîne une réduction du débit du perméat, ce qui peut avoir un impact sur le rendement global du procédé.

De plus, l'augmentation de la concentration en sel se traduit par une augmentation des valeurs de conductivité et de TDS, indiquant une augmentation des TDS dans l'eau. Cela peut être problématique dans certaines applications où une faible concentration en solutés est souhaitée. Il est donc important de prendre en compte l'effet de la salinité de l'eau d'alimentation lors de la conception et de l'exploitation des systèmes d'osmose inverse, afin de choisir les paramètres appropriés de pression et de débit pour maintenir des performances optimales du procédé.



**Figure III.29 :** Variation des débits de perméat, du taux de conversion, du TDS et de connectivité en fonction de différentes salinités d'alimentation.

### C. Analyse des eaux avant et après traitement à membrane

Les résultats des analyses montrent que le traitement de l'eau a été efficace pour réduire la dureté, la concentration de calcium, l'alcalinité totale et le chlore dans l'eau (Figure III.30). Cela indique que le processus de traitement a été capable d'éliminer les impuretés et les minéraux indésirables, produisant ainsi une eau de perméat de meilleure qualité avec des niveaux réduits de ces paramètres. Ces résultats confirment l'efficacité du traitement d'eau dans la purification et l'amélioration de la qualité de l'eau. Les résultats sont conformes aux normes de l'OMS tableau 2 (anexe).

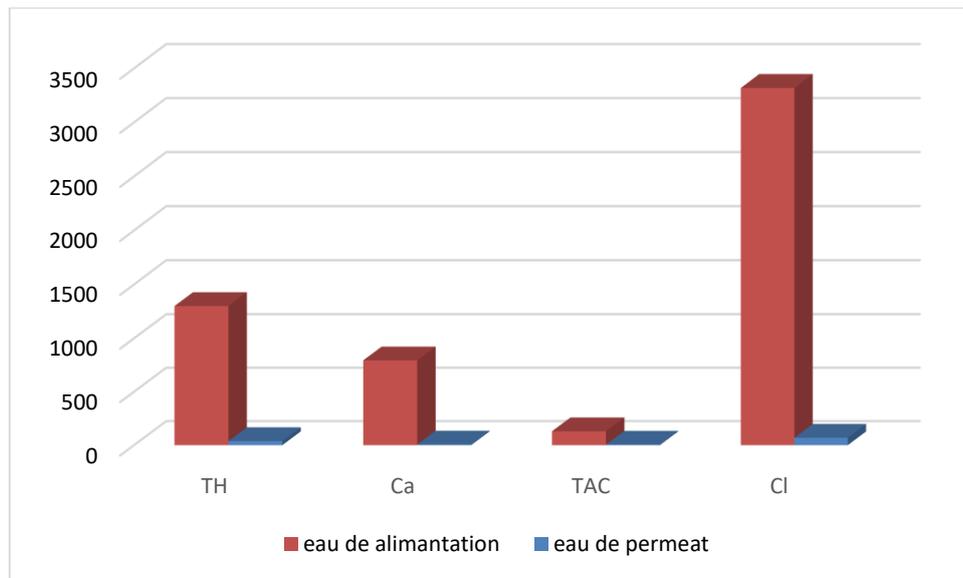


Figure III.30: Résultats de l’analyse des eaux avant et après traitement à membrane.

**D. Energie consommé PV par le système**

À l’aide d’une prise intelligente, nous avons mesuré la puissance électrique fournie par la pompe haute pression lors du processus de dessalement par la membrane du système pour différentes salinités. Les résultats de la puissance fournie par la pompe sont calculés pour chaque pression et salinité donnée, la puissance électrique générée par le système est calculée. En figure III.31 sont tracés.

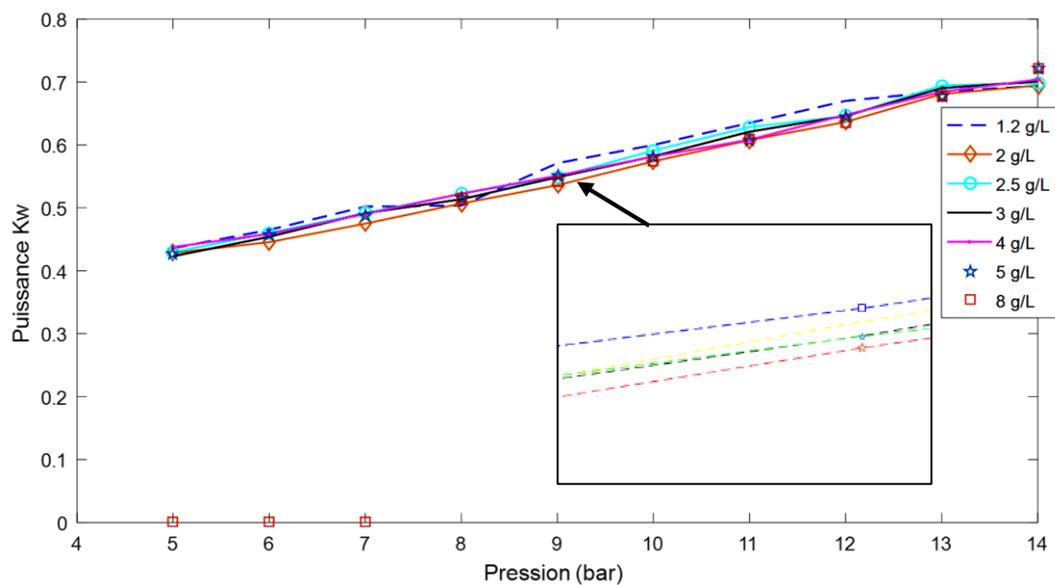


Figure III.31 : Puissance fournie par la pompe HP en fonction de la pression a différentes TDS.

On remarque qu’à une salinité de 8 g/L, la pompe ne fonctionne pas jusqu’à ce que la pression atteigne 8 bars. Cela indique que plus la salinité augmente, plus la puissance requise par la pompe augmente, nécessitant une pression plus élevée pour assurer un fonctionnement

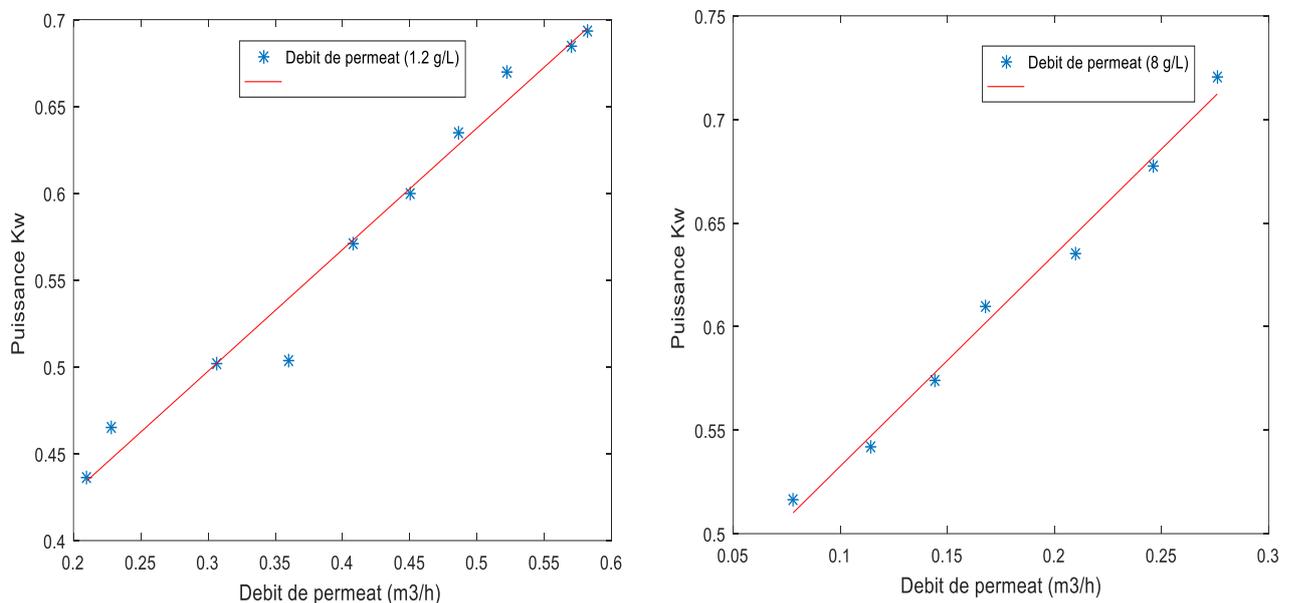
optimal. Ainsi, il est clair que le fonctionnement de la pompe haute pression est considérablement affecté par la salinité de l'eau d'alimentation.

Ceci entraîne une augmentation de la puissance électrique fournie par la pompe avec l'augmentation de la pression d'alimentation, c'est-à-dire lorsque la concentration en sel est plus élevée, la densité de l'eau augmente également. Cette augmentation de la densité entraîne une augmentation de la pression osmotique de l'eau, c'est-à-dire la pression nécessaire pour surmonter la force osmotique et permettre à l'eau de traverser la membrane.

L'équation de régression linéaire est donnée par  $P_e = a * Q_p + b$ , et les points de données s'ajustent bien à une droite, ce qui confirme la corrélation entre les débits de perméat produits par l'osmose inverse ( $Q_p$ ) et la puissance électrique fournie par la pompe HP ( $P_e$ ). Les résultats de régression sont donnés au tableau .

**Tableau III-11:** Modèle mathématique qui présente la variation de débit de perméat avec la puissance de la pompe pour différentes salinités.

TDS (g/L)	Modèle mathématique
1.2	$P = 0.7008Q_p + 0.2873$
8	$P = 1.0212Q_p + 0.4304$

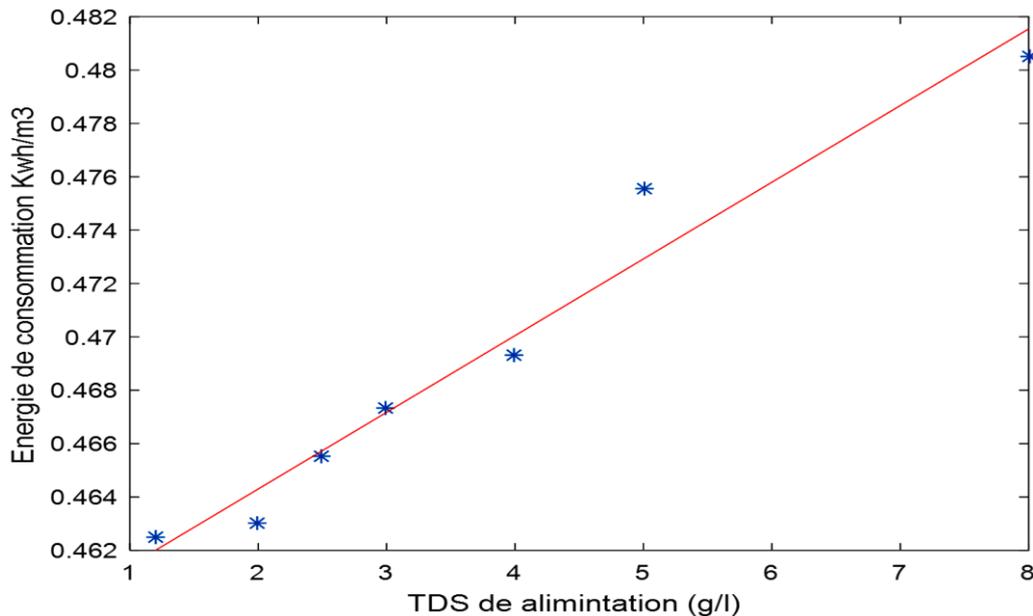


**Figure III.32:** Evolution de la puissance fournie par la pompe HP en fonction du débit de production : eau d'une faible salinité de 1.2 g/L, et l'eau d'une forte salinité de 8 g/L.

La figure III.32 présente la relation entre la puissance électrique fournie par la pompe HP ( $P_e$ ) et le débit de perméat ( $Q_p$ ) pour deux concentrations en sel (1.2 g/L et 8 g/L). Nous observons qualitativement une relation linéaire pour les deux salinités étudiées, nous a permis d'estimer la consommation d'énergie nécessaire pour produire 1 m<sup>3</sup> d'eau de perméat à

différentes concentrations en sel est calculée à l'aide de la relation  $E_c = P * t$ , où nous avons varié la pression toutes les 4 minutes. Pour une pression optimale de 14 bar, le temps nécessaire pour atteindre 1 m<sup>3</sup> est de 40 minutes (0.67 heure). La puissance est ensuite extraite à partir du tableau 1(anexe)... pricident , ce qui nous donne une consommation d'énergie de 0.4648 kWh/m<sup>3</sup> pour une eau saline de 1.2 g/L et de 0.483 kWh/m<sup>3</sup> pour une eau saline de 8 g/L. Cela montre une augmentation progressive de la consommation d'énergie spécifique lorsque la concentration en sel augmente.

La figure III.33 représente la variation des énergies de consommation pour différentes salinités d'alimentation. Nous constatons que pour une augmentation de la salinité de l'eau d'alimentation dans le processus d'osmose inverse entraîne une augmentation de la consommation d'énergie nécessaire pour produire de l'eau de perméat, en raison de la pression accrue requise pour surmonter la concentration élevée en sel et le potentiel encrassement de la membrane. Il est donc important de prendre en compte la salinité de l'eau d'alimentation lors de la conception et de l'exploitation d'un système d'osmose inverse afin d'optimiser l'efficacité énergétique du processus.



**Figure III.33 :** Variation de l'énergie spécifique consommée (SEC) pour différentes salinités d'alimentation.

### III.5 Conclusion

Ce chapitre présente une étude complète de conception et de dimensionnement d'une installation d'osmose inverse alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque. Les expérimentations réalisées ont permis d'optimiser la configuration du système pour assurer une qualité d'eau traitée élevée tout en réduisant la consommation d'énergie. Le dimensionnement du générateur solaire photovoltaïque a été réalisé pour répondre aux besoins énergétiques de l'installation. Une étude expérimentale a également été menée sur un autre système d'osmose inverse afin d'évaluer son efficacité dans le traitement de différentes

concentrations en sel d'eau à dessaler. Les résultats des analyses du pH, de la conductivité, du TDS et de la salinité ont été présentés pour chaque essai.

De plus, le chapitre aborde le dimensionnement d'une éolienne comme alternative au champ photovoltaïque pour répondre à la charge de l'installation. L'objectif global de cette étude est d'améliorer la durabilité et l'efficacité des systèmes de dessalement en exploitant les avantages des sources d'énergie renouvelable. Les résultats et les analyses présentés fournissent des informations précieuses pour la conception de systèmes de dessalement autonomes alimentés par des énergies renouvelables, contribuant ainsi à répondre à la demande croissante en eau douce de manière durable.

### **Référence**

[1] : Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC).

[2] : <https://www.ryse.energy/3kw-wind-turbines/#design-characteristics>.

[3] : <https://www.tubs.fr/fr/systeme-de-desinfection-uv-p-3910.html>.

## Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était de faire une étude de conception et de dimensionnement d'une installation d'osmose inverse autonome alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne, avec une capacité moyenne de 24 m<sup>3</sup>/jour. Différentes expérimentations ont été effectuées à l'aide du logiciel IMSdesign. Le code de calcul a été utilisé pour tester différentes membranes et comparer leurs performances. Ce logiciel permet de simuler le comportement de différentes membranes en fonction des caractéristiques de l'eau saumâtre à traiter et de déterminer celle qui offre la meilleure efficacité en termes de réduction du TDS, de la dureté de l'eau et de la consommation d'énergie. De plus, il est possible d'optimiser la conception du système en sélectionnant la membrane la plus adéquate pour répondre aux besoins spécifiques du projet.

En effet, nous avons constaté que la membrane ESPA2-LD-4040 présente la plus faible valeur de TDS et une consommation d'énergie moyenne par rapport aux autres membranes testées. Après avoir optimisé la configuration adéquate du système d'osmose inverse en termes de qualité de l'eau traitée et de consommation d'énergie, le scénario 3 s'est avéré être la meilleure configuration du système pour obtenir une eau traitée de haute qualité, avec des concentrations réduites.

Le dimensionnement d'un générateur solaire photovoltaïque a également été effectué pour alimenter la pompe d'osmose inverse. De plus, le dimensionnement d'une éolienne pour répondre à la charge de l'unité en remplaçant le champ solaire a été réalisé. Les résultats ont montré que les besoins du système nécessitent une éolienne d'une puissance de 3 kW pour alimenter le même osmoseur.

Après avoir effectué la conception, le dimensionnement et l'optimisation d'un système d'osmose inverse, nous avons acquis les différents composants nécessaires pour sa réalisation au niveau de l'équipe de dessalement DDESM, UDES.

De plus, l'objectif de cette étude est d'évaluer les performances du système membranaire dans des conditions climatiques réelles du site de Bou-Ismaïl en utilisant différentes concentrations de sel dans l'eau d'alimentation. Nous avons donc mené des essais expérimentaux sur ce système d'osmose inverse d'une capacité de production 12m<sup>3</sup>/jour alimenté par un générateur solaire photovoltaïque.

Notre travail consiste à déterminer l'effet des paramètres opératoires pour le bon fonctionnement des deux membranes. Il en ressort que la pression ainsi que la salinité des eaux d'alimentation influent sur la quantité de l'eau produite comme suit :

- L'augmentation de la pression appliquée de l'eau à traiter augmente la production d'eau douce. Par conséquent, ces deux paramètres améliorent donc le taux de conversion.
- L'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'alimentation accroît la pression osmotique ce qui nécessite une augmentation de la pression d'entrée du module.

Les résultats obtenus par les deux membranes ont démontré la nécessité du suivi des facteurs physico-chimiques prouvant la qualité de l'eau propre à la consommation à savoir :

- L'augmentation de la pression appliquée, résulte une diminution importante de la concentration en TDS du perméat.
- La variation de la consommation d'énergie en fonction de la salinité souligne l'importance de prendre en compte ce paramètre lors de la conception et de l'exploitation d'un système d'osmose inverse.

En fin, l'intégration du dessalement de l'eau avec les énergies renouvelables offre une solution prometteuse pour répondre aux besoins en eau potable dans les régions arides et isolées.

Les progrès technologiques dans le domaine des énergies renouvelables, tels que les systèmes photovoltaïques et éoliens, ont ouvert de nouvelles opportunités pour rendre le dessalement de l'eau plus efficace et durable. En combinant ces sources d'énergie propres avec des technologies d'osmose inverse, il est possible de produire de l'eau potable de manière plus économique et respectueuse de l'environnement.

L'étude a souligné l'importance de la modélisation et de l'optimisation des composants clés du système, tels que l'osmoseur, le système PV et le système éolien. L'utilisation de logiciels spécialisés pour le dimensionnement et l'optimisation a permis d'obtenir des résultats précis ainsi la conception optimale du système de dessalement.

# ANNEXE

## 1-Étapes du dimensionnement dans le logiciel IMS-Design

**Étape 01 : Analyse :** C'est la première étape où on compte comment traiter l'échantillon d'eau brute (eau de mer, eau saumâtre ...) on peut saisir les valeurs du rapport d'analyse de l'eau.

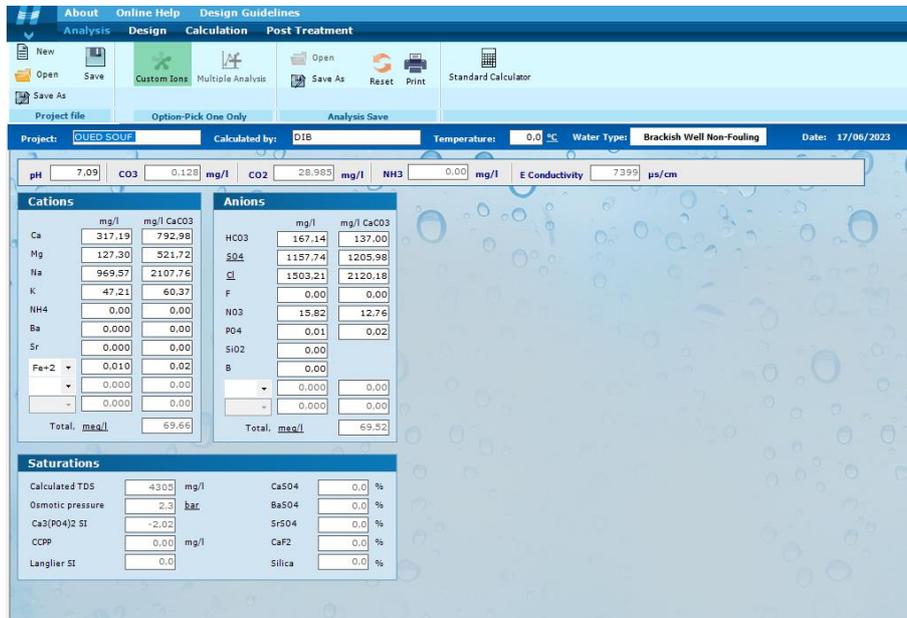


Figure 1: Capture d'écran de l'étape analyse par IMS-Design.

**Étape 2 : Dimensionnement :** Il s'agit de la deuxième étape du système. Pour effectuer cette étape de haut niveau, vous pouvez spécifier des paramètres tels que le flux de perméat, le taux de rejet, le type de membrane et le nombre d'étages.

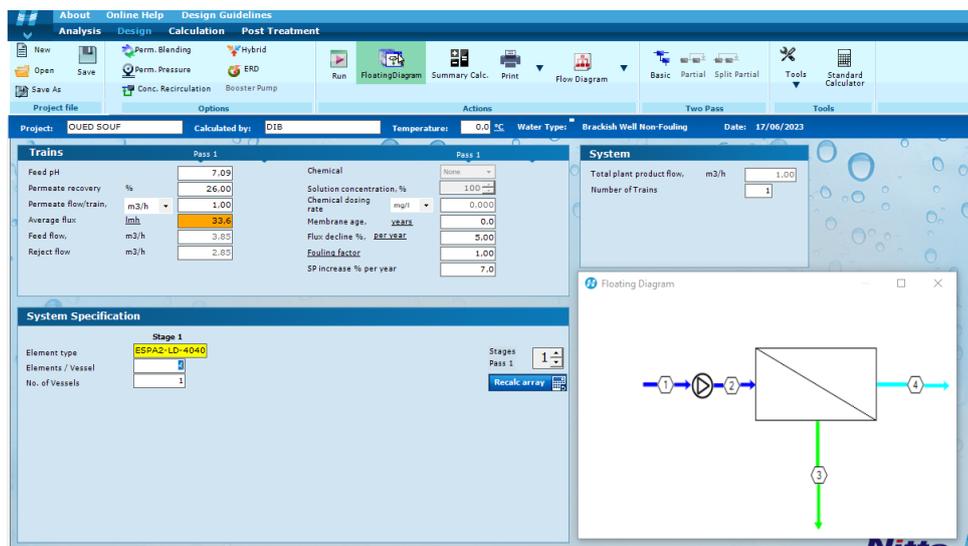
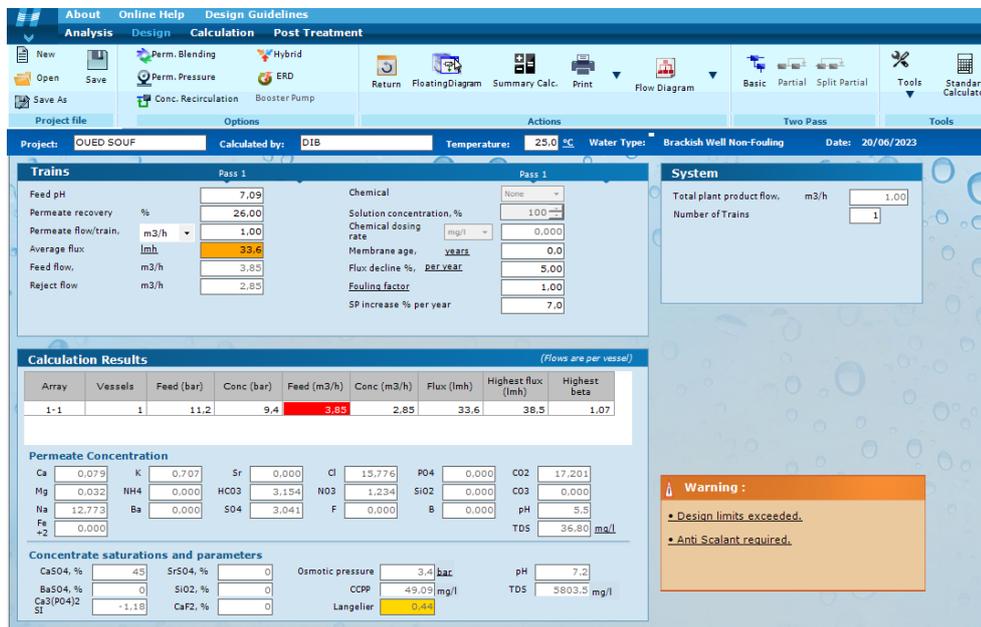


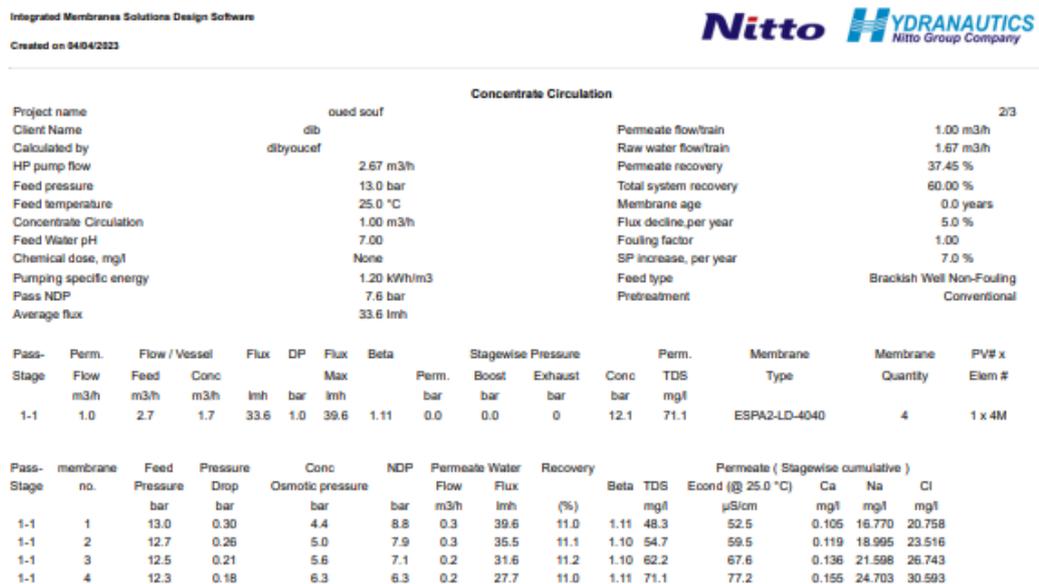
Figure 2: Capture d'écran de l'étape de dimensionnement avant le calcul.

**Etape 3 :** Calcul : Il s'agit de la troisième étape du processus de conception. L'application calcule et affiche les valeurs de la demande énergétique, de la demande chimique et du coût, calcule la qualité du produit.



**Figure 3:** Capture d'écran de l'étape de dimensionnement après le calcul

**Etape 4 :** Résultats : les résultats ce forme de rapport.



**Figure 4:** résultats du simulation.

## 2-Analyse des eaux

### 2-1-Préparation des solutions

- Solution PH10 : dissoudre 67.5 g  $\text{NH}_4\text{Cl}$  dans 570mL de  $\text{NH}_3$  (25%) dans une fiole de 1 litre et compléter avec  $\text{H}_2\text{O}$
- Solution EDTA : 3.725 gr EDTA dans une fiole de 1litre d'eau
- NaOH (8%) : 20g de NaOH dans une fiole de 250mL et compléter avec  $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0.1N) : 2.5 gr de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0.1N) dans 100 ml d' $\text{H}_2\text{O}$
- Indicateur de phénophtaléine : dissoudre 1g de phénophtaléine dans 100 ml d'éthanol et diluer avec de l'eau distillée à 200 ml.
- Vert de bromocrésol rouge de méthyle : 0.2g de vert de bromocrésol+ 0.015g de rouge de méthyle dans 100 ml±4mL d'éthanol
- HCl (0.02N) : 100 ml HCl (0.1 N) dans une fiole de 500 ml et compléter avec  $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{AgNO}_3$  (0.02N) : mettre 3.3974g  $\text{AgNO}_3$  (séché à 105° pendant 30min) dans une fiole de 1L et compléter avec  $\text{H}_2\text{O}$
- Solution  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  : 10g de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  dans une fiole de 100 ml et compléter avec  $\text{H}_2\text{O}$

#### 2.1.1. Analyse volumétrique du T.A et du T.A.C (ALCALINITE D'UNE EAU)

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence bicarbonates, carbonates, et hydroxyde, les mesures sont réalisées en neutralisant un certain volume  $V_0$  d'eau par de l'acide sulfurique ou chlorhydrique de normalité Na, en présence de phénophtaléine pour le TA et en présence de Bromocrésol pour le TAC .

1. Agiter délicatement le flacon de HCL 0,02 N.
2. Remplir la burette avec HCL 0,02 N.
3. Eliminer les bulles d'air contenues dans la partie inférieure de la burette en ouvrant le robinet.
4. Agiter l'échantillon doucement.
5. A l'aide d'une fiole jaugée propre de 100 ml, introduire 100 ml d'échantillon dans un erlen meyer propre de 250 ml.
6. Ajouter 1 goutte de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0,1 N et 3 gouttes de phénophtaléine et puis mélanger.
7. Si une coloration rose apparaît, alors commencer à verser HCL goutte à goutte tout en mélangeant jusqu'à décoloration complète.
8. Noter le volume de burette « V1 ».
9. S'il n'y a pas de coloration rose, alors « VI=0 ml »
10. Ajouter 5 gouttes de Vert de Bromocrésol dans le même erlen meyer et mélanger, (on obtient une coloration Bleu)( figure 6).
11. Continuer à verser HCL goutte à goutte tout en mélangeant jusqu'à obtenir le début d'une coloration jaune( figure 6).
12. Noter le volume de burette « V2 ».

Calcul du T.A et T.A.C de la manière suivante :

$$\text{T. A (CaCO}_3\text{)} = V1 \times 10 \quad \text{mg /l}$$

$$\text{T. A. C (CaCO}_3\text{)} = V2 \times 10 \quad \text{mg /l}$$



Avant le dosage



Après le dosage

**Figure 6:** Les analyses de T.A et T.A.C avant et après le dosage.

### 2.1. 2. Analyse Volumétrique De La Dureté Totale De L'eau (TH)

Le dosage des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  se fait par complexométrie avec l'EDTA en milieu basique. Vers  $\text{pH} = 10$ , on dose simultanément les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  en présence de NET. La dureté magnésienne s'obtient par différence entre la dureté totale et la dureté calcique.

- 1- Agiter délicatement le flacon de l'EDTA 0.01 N.
- 2- Remplir la burette avec l'EDTA 0.01 N.
- 3- Eliminer les bulles d'air contenues dans la partie inférieure de la burette en ouvrant le robinet.
- 4- Agiter l'échantillon doucement.
- 5- A l'aide d'une fiole jaugée propre de 50 ml, introduire 50 ml d'échantillon dans un erlen Meyer propre de 250 ml
- 6- Ajouter 4 ml de Tampon PH10 à l'aide de la pipette en plastique propre.
- 7- A l'aide de la spatule, ajouter un peu de NET jusqu'à obtenir une coloration rose-violette.
- 8- Mélanger le tout et commencer à verser l'EDTA goutte à goutte tout en mélangeant énergiquement jusqu'à la coloration bleue franche (figure 7).

- 9- Noter le volume « V » de burette  
Calcul du TH de la manière suivante:

$$\text{TH} = (\text{CaCO}_3) = V \times 20 \quad (\text{mg/l})$$



Avant le dosage



Après le dosage

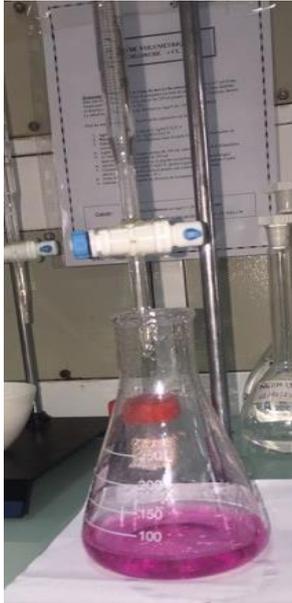
**Figure 7:** les analyses de TH avant et après le dosage.

### 2.1. 3 Analyse Volumétrique Du Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

- 1- Agiter délicatement le flacon de l'EDTA 0.01 N ;
- 2- Remplir la burette avec l'EDTA 0.01 N ;
- 3- Eliminer les bulles d'air contenues dans la partie inférieure de la burette en ouvrant le robinet ;
- 4- Agiter l'échantillon doucement ;
- 5- A l'aide d'une fiole jaugée propre de 50 ml, introduire 50 ml d'échantillon dans un erlen meyer propre de 250 ml ;
- 6- Ajouter 2 ml de NaOH 2 N à l'aide de la pipette en plastique propre ;
- 7- A l'aide de la spatule, ajouter un peu de murexide jusqu'à obtenir une coloration bien rose ;
- 8- Mélanger le tout et commencer à verser l'EDTA goutte à goutte tout en mélangeant énergiquement jusqu'à la coloration violette ;
- 9- Noter le volume « V » de burette ;

Calculer la concentration en calcium à l'aide de la formule suivante :

$$[\text{Ca}^{2+}] \text{ en mgr par litre} = V \times 8.016$$



Avant le dosage



Après le dosage

**Figure 8:** les analyses de  $\text{Ca}^{2+}$  avant et après le dosage.

### 2.1.3 Analyse Volumétrique Du Chlorure ( $\text{Cl}^-$ )

Pour l'analyse de l'eau de mer et du concentrât, prélever 0,5 ml d'eau dans une fiole jaugée de 100 ml et compléter au trait de jauge avec de l'eau distillée.

Transvaser le tout dans un erlen meyer de 250 ml propre et continuer l'analyse décrite ci-dessous à partir de la ligne n°6.

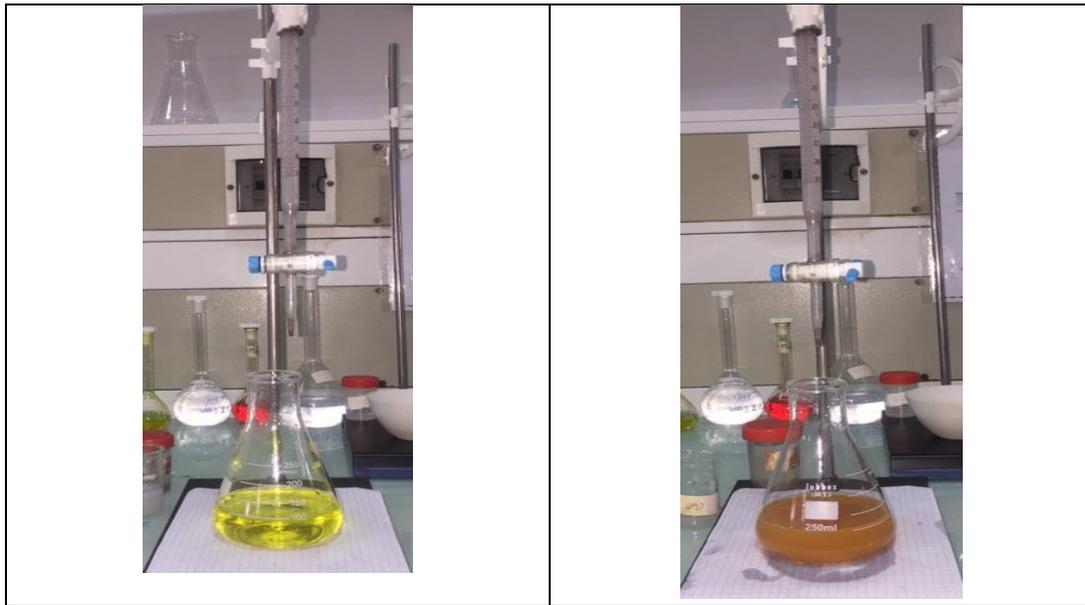
Le calcul de la concentration en chlorure en mgr/l est :  $(V - 0,2) \times 1418,12$

Pour les autres types d'eaux, le protocole opératoire est le suivant :

1. Agiter délicatement le flacon d' $\text{AgNO}_3$  0,02 N ;
2. Remplir la burette avec  $\text{AgNO}_3$  0,02 N ;
3. Eliminer les bulles d'air contenues dans la partie inférieure de la burette en ouvrant le robinet ;
4. Agiter l'échantillon ;
5. A l'aide d'une fiole jaugée propre de 100 ml, introduire 100 ml d'échantillon dans un erlen meyer propre de 250 ml ;
6. Ajouter 1 ml de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  avec la pipette en plastique propre et mélanger ;
7. Commencer à verser  $\text{AgNO}_3$  0,02 N goutte à goutte tout en agitant l'erlen meyer jusqu'à ce que la solution prenne une couleur brune-orange ;
8. Noter le volume de burette « V » ;

Calculer la concentration en chlorure de la manière suivante :

$$\text{Concentration en chlorure} = (V - 0,2) \times 7,0906 \quad \text{mg/L}$$

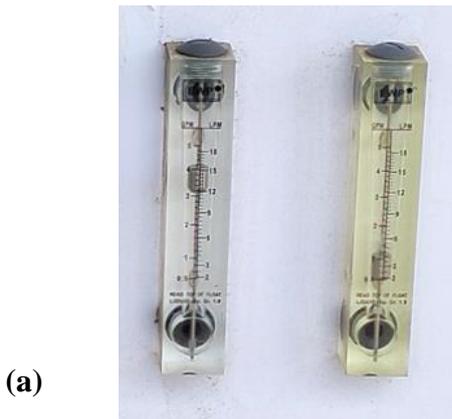


Avant le dosage

Après le dosage

**Figure 9:** les analyses de  $\text{Cl}^-$  avant et après le dosage.

### 3-Equipements de mesure



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 10 :** (a) débitmètre , (b)manomètre, multi-paramètre(c), (d)prise intelligente :  
Mesure de puissance

#### 4- Paramètres liés à l'eau traitée

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les caractéristiques physicochimiques de l'eau potable sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 1** : les caractéristiques physicochimiques de l'eau potable Selon OMS.

<b>Paramètres</b>	<b>Unité</b>	<b>OMS(2004) Limite de qualité</b>
<b>T</b>	<b>°C</b>	<b>25</b>
<b>pH</b>	<b>-</b>	<b>7-8.5</b>
<b>titre hydrotimétrique (TH)</b>	<b>°F</b>	<b>50</b>
<b>Calcium (Ca<sup>2+</sup>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>200</b>
<b>Chlorures (Cl<sup>-</sup>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>200</b>
<b>Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>150</b>
<b>Sulfate SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>mg/L</b>	<b>250</b>
<b>Nitrate NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>mg/L</b>	<b>50</b>
<b>Phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>5</b>
<b>Fer ( Fe)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0.3</b>
<b>Bore (B)</b>	<b>mg/L</b>	<b>2</b>
<b>Titre alcalimétrique complet (TAC)</b>	<b>mg/L</b>	<b>500 mg/L de CaCO<sub>3</sub></b>
<b>Dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH)</b>	<b>mg/L</b>	<b>200 mg/L de CaCO<sub>3</sub></b>
<b>Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>0.5</b>
<b>Chlore libre (Cl<sub>2</sub>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>5</b>
<b>Sodium Na<sup>+</sup></b>	<b>mg/L</b>	<b>200</b>
<b>Conductivité</b>	<b>µs/cm a 20 °C</b>	<b>180-1000</b>

## 5-Puissance Fournie Par La Pompe HP

**Tableau 2:** Résultats de mesure de la puissance fournie par la pompe HP.

Pression (bar)	kW (1.2g/l)	kW (2g/l)	kW (2.5g/l)	kW (3g/l)	kW (4g/l)	kW (5g/l)	kW (8g/l)
5	0.4360	0.4283	0.4295	0.4231	0.4378	0.4273	-
6	0.4650	0.4456	0.4600	0.4541	0.4585	0.4566	-
7	0.5020	0.4750	0.4916	0.4915	0.4903	0.4883	-
8	0.5038	0.5069	0.5225	0.5137	0.5226	0.5165	0.5161
9	0.5710	0.5361	0.5492	0.5487	0.5512	0.5500	0.5418
10	0.6000	0.5740	0.5912	0.5819	0.5816	0.5812	0.5740
11	0.6350	0.6076	0.6284	0.6210	0.6083	0.6063	0.6098
12	0.6700	0.6366	0.6457	0.6462	0.6478	0.6440	0.6353
13	0.6850	0.6809	0.6947	0.6903	0.6844	0.6774	0.6774
14	0.6937	0.6945	0.6983	0.7010	0.7040	0.7133	0.7208