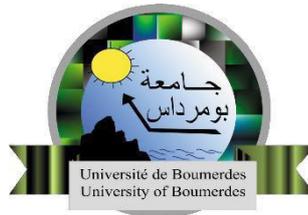


**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**  
**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**  
**DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : **Energies renouvelables**

Option : **Energies renouvelables en mécanique**

**Thème**

**ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UNE UNITE DE  
DESSALAMENT PAR OSMOSE INVERSE FONCTIONNANT EN  
ENERGIE SOLAIRE**

**Réalisé par :**

☞ **Mr. MAZOUZI Dhia eddine**

**Encadreur:**

✚ **Mr. HACHEMI madjid**

**promoteur :**

✚ **Mr. ABBAS Mohamed**

**Année universitaire : 2018/2019**

## REMERCIEMENT

---

Je remercie Dieu, tout puissant pour nous avoir donné la santé et nous avoir guidés vers la connaissance

Je remercie mes parents qui m'ont beaucoup aidé dès mes premiers jours de ma vie

Je remercie mon promoteur **Dr mohamed abbas** et mon encadreur **Pr hachemi majid** pour les précieux conseils qu'il m'a prodigué tout au long de mon travail. Je remercie aussi tous les membres de Jurys qui m'honorent de leurs présences et d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail. Je remercie énormément **Madame Tigrine**, Docteur chercheur au sein de l'UDES pour son aide précieuse lors de la réalisation de ce travail. Je remercie également :

HAMICHE Iddou qui m'a aidé pour réaliser le programme matlab

Grace à eux, j'ai reçu des informations sur les différentes stations de dessalement choisies pour notre travail

**Dédicace**

Je dédie ce modeste travail à La mémoire de mon cher père

Ma chère mère qui ma beaucoup aidée et encourager

Mon frère et ma sœur

Ma grand mère

Mes collègues

Tous ceux qui mon aidées de loin et de prés dans cette thèse

## Nomenclatures

---

### Nomenclatures

<b>SWRO</b>	: sea water reverse osmosis(dessalement d'eau de mer avec osmose inverse)
<b>RO</b>	: reverse osmosis(osmose inverse)
<b>OI</b>	: osmose inverse
<b>PV-RO</b>	: photovoltaïque osmose inverse
<b>CSE</b>	: consommation spécifique d'énergie
<b>TRI</b>	: Taux de Rendement Interne
<b>VAN</b>	: Valeur Actuelle Nette

# Listes des Figures

---

## LISTE DES FIGURES

- Figure I.1** : Réservoir d'eau sur terre d'après Tardy (1986)
- Figure I.2** Disponibilité en eau douce et stress hydrique Source : FAO, Nation unies, World Resources Institute (WRI)
- Figure. I.3.** : Le grand cycle de l'eau
- Figure I.4** : coupe d'un module à membrane spiralé
- Figure I.5**: système d'une unité de dessalement par procédé d'osmose inverse mono étage
- Figure I.6** : système d'unité de dessalement par procédé d'osmose inverse en série .
- Figure I.7** : phénomène de polarisation de concentration
- Figure I.8** : application industrielle des procédés de dessalement à travers le monde (IDA Desalination Yearbook, 2007)
- Figure I.10** : l'évolution de système de récupération
- Figure I.12** Généralité sur le dessalement et ses effets sur l'environnement décelée au point de rejet
- Figure I.13** : Etat initial pas de rejet de saumure.
- Figure.I.14** :la structure d'une cellule solaire
- Figure I.15.** Caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'une cellule solaire pour un ensoleillement de  $1000\text{W/m}^2$  et température égale à  $30^\circ\text{C}$ .
- Figure I.16** Caractéristique  $I = f(V)$  (En haut) et  $P = f(V)$  d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements  $S$  avec  $T = 30^\circ\text{C}$ .
- Figure I.17.** Circuit équivalent d'une cellule solaire.
- Figure. II.1.** Schéma représentant le rôle d'un système de récupération
- Figure. II.2.** l'augmentation des couts au cours des années
- Figure.III.1.**Schéma de principe du prototype d'osmose inverse de l'UDES alimenté par PV
- Figure .III.2..** La consommation d'énergie en fonction la pression
- Figure .III.3..** Débit du perméat en fonction de la pression
- Figure .III.4.** Salinité du permeat en fonction de la pression
- Figure .III.5.** Débit du permeat en fonction de la pression pour différentes températures
- Figure .III.6..** Salinité du perméat en fonction de la pression pour différentes températures

# Listes des Tableaux

---

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau I.1** : Répartition de l'eau sur terre (volumes en km<sup>3</sup>)

**Tableau. I.2** : Caractéristiques comparées des eaux de surfaces et eaux souterraines

**Tableau I.3:** comparaison entre différents modules [9].

**Tableau I.4:** Comparaison des énergies consommées par les différents procédés de Dessalement

**Tableau. II.1** Rejet d'ions d'une membrane RO

**Tableau. II.2.**la consommation sans système de récupération

**Tableau. II.3.**la consommation sans système de récupération

**Tableau .II.4.** Estimations du coût des produits chimiques et des taux de dosage

**Tableau II.5.** Estimation du coût du SWDP .

**Tableau .III.1.** : Les caractéristiques techniques du pilote d'osmose inverse de l'UDES

**Tableau. IV.1.** simulation du premier scenario

**Tableau. IV.2.** représentation des détails des frais(raccordé au réseau)

**Tableau. IV.3.**représentation des frais et les revenus totaux du projet

**Tableau. IV.4.** les paramètres économique du projet(raccordé au réseau)

**Tableau. IV.5.** simulation du deuxième scenario

**Tableau. IV.6.**représentation des détails des frais(off grid)

**Tableau. IV.7.** représentation des frais et les revenus totaux du projet(off grid)

**Tableau. IV.8.** les paramètres économique du projet(off grid)

**Tableau. IV.9.**simulation du troisième scenario

**Tableau. IV.10.** représentation des détails des frais(on grid)

**Tableau. IV.11.** représentation des frais et les revenus totaux du projet

**Tableau. IV.12.**les paramètres économique du projet (on grid)

**Tableau. IV.13.**tableau récapitulatif des résultats des trois systèmes

# SOMMAIRE

---

## I. INTRODUCTION GENERALE

## II. CHAPITRE 1 :GENERALITES SUR LE DESSALEMENT ET LE PHOTOVOLTAIQUE

1.Introduction .....	5
2.Généralités sur l'eau .....	5
2.1Eau dans le monde1.....	5
2.2. Eaux de mers.....	7
3.Historique .....	9
4.Les technologies de dessalement .....	9
4.1 les procédés thermiques.....	9
4.2les procédés membranaires.....	10
5.configuration des modules d'osmose inverse.....	11
5.1 les modules a membrane plane .....	11
5.2Les modules a membrane fibre creuse.....	12
5.3les modules a membrane spirale.....	12
6.conception du procédé d'osmose inverse.....	13
7.Les facteurs influençant l'efficacité de l'osmose inverse.....	15
7.1phenomene de polarisation de concentration .....	15
72 Le colmatage fuling.....	16
73 Entartrage.....	16
8. Consommation Energétique.....	17
9.Aspects environnementale.....	19
10.Généralités sur le photovoltaïque.....	22

# SOMMAIRE

---

## III. CHAPITRE 2

1.Le procédé d'osmose inverse.....	27
2.Source d'énergie solaire photovoltaïque.....	33
3.Calcul des indicateurs économiques.....	37
31.Utilisation de la méthode du taux de rendement interne (TRI).....	38
32 Coût d'investissement de l'usine de dessalement SWRO.....	39

## IV.CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE

1.Introduction.....	45
2.Présentation du banc d'essai de dessalement solaire par osmose inverse.....	45
3.Déroulement de l'étude expérimentale.....	47
3.1 L'effet de la pression sur la consommation énergétique.....	47
3.2 L'effet de la concentration d'alimentation sur le débit du perméat .....	48
3.3 Effet de la température sur le débit du perméat et sa qualité .....	50
4.Conclusion.....	53

## V.CHAPITRE 4 :RESULTATS ET DISCUSSION

1. Introduction.....	55
2.Présentation de l'approche utilisée.....	55
3.Résultats de l'étude.....	56
3.1 SENARIO 1.....	56
3.2 SENARIO 2.....	58
3.3 SENARIO 3.....	60
3.4 Récapitulation des résultats.....	62

VI.CONCLUSION GENERALE .....	63
------------------------------	----

## INTRODUCTION

Face aux demandes croissantes de l'eau dans le monde et plus particulièrement en Algérie, Produire une eau potable de qualité acceptable avec un coût minimal est le principal objectif de tous les exploitants.

Les procédés de dessalement de l'eau peuvent être classés en deux grandes familles : par distillation (thermiques) et les procédés membranaires.

Le recours aux techniques membranaires est de plus en plus important pour résoudre le problème d'approvisionnement en eau destinée à la consommation humaine.

L'osmose inverse devient le procédé le plus courant, le plus rentable et le moins énergivore par rapport aux procédés de distillation. Néanmoins, le coût énergétique est environ 50% du coût global d'exploitation.

La rentabilité, la fiabilité et la durabilité du procédé de dessalement et l'utilisation de la nouvelle technologie des membranes, sont les enjeux des recherches et les développements ont toujours été orientés, et continuent à l'être, pour obtenir les gains ayant les répercussions les plus importantes sur le coût de la production d'eau douce à partir de l'eau de mer.

A cet effet, l'installation de systèmes de récupération ou l'utilisation des pompes de faible consommation d'énergie est devenu une solution optimale pour la réduction de la consommation d'énergie. Il existe différents types de systèmes, les turbines pour les plus anciens systèmes, actuellement les échangeurs de pressions sont les plus utilisés grâce à leur efficacité qui peut atteindre 96%.

Ce travail se divise en deux parties, la première a pour but de réaliser une étude expérimentale et théorique sur l'unité de dessalement de l'Unité de Développement des Equipements solaires (UDES) fonctionnant par le principe d'osmose inverse et alimentée par un champ solaire photovoltaïque et des batteries pour le stockage d'énergie. La seconde partie de ce travail est consacrée pour déterminer les indicateurs économiques liés au projet, tels que le prix du mètre cube dessalé (LCOW), la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rentabilité interne (TRI).

Il est à noter que ce travail a été réalisé à l'Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES, Bou Ismail/ Centre de Développement des Energies Renouvelables

## CHAPITRE 1

### GENERALITES SUR LE DESSALEMENT ET LE PHOTOVOLTAIQUE

#### 1. Introduction

Les ressources en eau douce, très inégalement réparties, ne représentent que 2,5% du volume d'eau total sur la planète par contre plus de 97 % de l'eau à la surface de la terre est de l'eau salée.

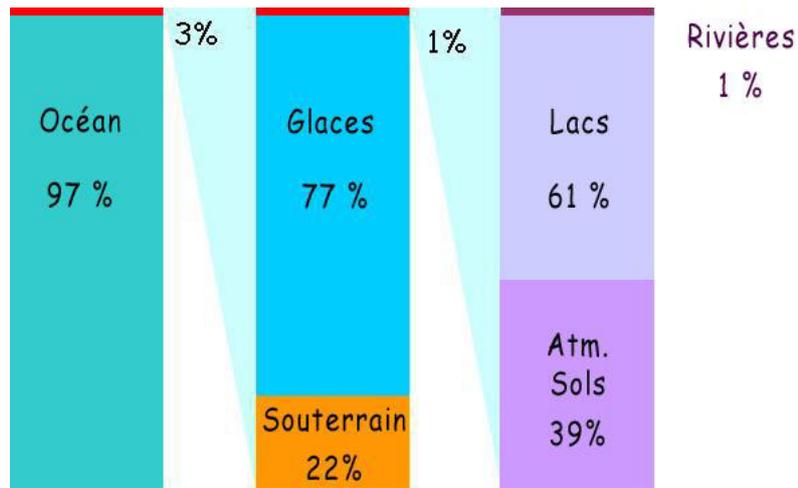
Devant l'impotence des solutions classique de repende aux besoins, le dessalement de l'eau de mer devient la solution alternative pour approvisionner les zones arides ou en situation de stress hydrique

Ce procédé consiste a passé l'eau de mer a traversé une membrane semi perméable pour éliminer les sels dissous pour avoir une eau adéquate pour la consommation humaine, utilisation industrielle ou l'irrigation

#### 2. Généralités sur l'eau

##### 2.1. Eau dans le monde

Trois quarts (70 %) de la surface de la terre est recouverte par de l'eau (mers, océans, lacs cours d'eau). Ces eaux de surface font partie de l'hydrosphère qui correspond à l'ensemble des réserves d'eau disponibles sur terre à savoir des mers et océans, des cours d'eaux (fleuves, rivières, torrents), des réserves souterraines, des glaces (glaciers, banquises, icebergs, neige) et des différentes formes d'eau présente dans l'air (nuage, vapeur d'eau).Cependant, on constate que 97% de cette eau est salée sous la forme des mers et des océans et incapable de répondre aux besoins quotidiens sous la forme naturelle. Le reste (3%) est l'eau douce, qui est la plupart du temps sous forme de glace et de neige Figure. I.1. L'eau potable n'est que de 1 % du total de cette eau, qui est sous forme de rivières, lacs, eaux souterraines et vapeur d'eau dans l'atmosphère. Les réserves d'eau douce sont donc très importantes et doivent être protégées.



**Figure I.1** : Réservoir d'eau sur terre d'après Tardy (1986)

En 2013, 783 millions de personnes n'ont pas accès à une source d'eau améliorée. Pour cette raison, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres peut répondre à l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation des surfaces. Les différentes quantités d'eau sur terre sont indiquées dans le tableau I.1 [4]:

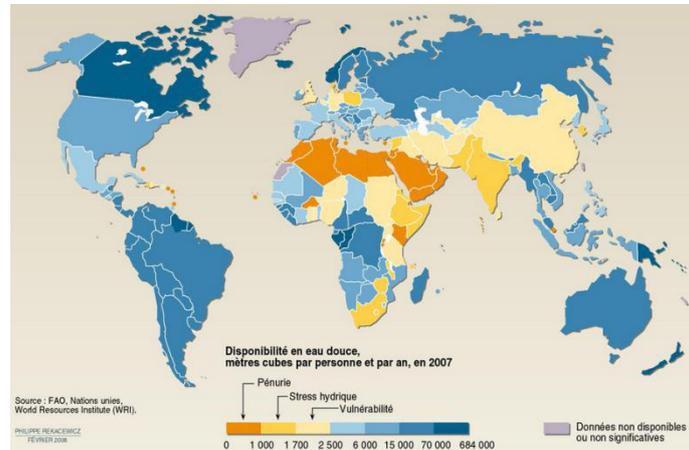
Stocks totaux d'eau	1,4 milliard de Km <sup>3</sup>	
Océans	1,35 milliard de Km <sup>3</sup>	97.45 %
Glaces	8.2 millions de Km <sup>3</sup>	0.59 %
Eaux souterraines	27.5 millions de Km <sup>3</sup>	1.98 %
Mers, lacs, rivières	207 000 Km <sup>3</sup>	0.015 %
Humidité du sol	70 000 Km <sup>3</sup>	0.005 %
Eau des cellules vivantes	1 100 Km <sup>3</sup>	0.0001 %
Humidité de l'air	13 000 Km <sup>3</sup>	0.001 %

**Tableau I.1** : Répartition de l'eau sur terre (volumes en km<sup>3</sup>)

A l'échelle de la planète, environ 40000 km<sup>3</sup> d'eau douce estimée s'écoulent chaque année sur les terres émergées, lesquels sont partagés entre les 7 milliards d'individus qui devraient fournir 5700 m<sup>3</sup> d'eau douce à chacun soit près de 16000 litres d'eau par jour.

Dans les pays développés, les pénuries d'eau ont augmenté annuellement de 4 à 8% entre 1990 et 2000. Près d'un demi-milliard d'habitants de 31 pays, la plupart du Moyen-Orient et d'Afrique souffrent aujourd'hui du manque d'eau. Selon l'ONU, au taux actuel de croissance de la population et de ses besoins en eau douce, en 2025 la quantité moyenne d'eau douce disponible devrait chuter de 6600 à 4800 m<sup>3</sup> par habitant et par an, soit une réduction de près

d'un tiers. A cette date, les experts estiment que 5 fois plus d'habitants qu'aujourd'hui seront touchés par la pénurie d'eau, ce qui représentera 2.8 milliards d'habitants soit 35% de la population estimée de la terre à cette époque.



**Figure I.2** Disponibilité en eau douce et stress hydrique  
Source : FAO, Nation unies, World Resources Institute (WRI)

## 2.2. Eaux de mers

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont 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 traversées. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le Carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , le sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ , le Carbonate de magnésium  $\text{MgCO}_3$  et le Chlorure de Sodium  $\text{NaCl}$ .

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  $\text{NaCl}$ , 3,8 g/l de  $\text{MgCl}_2$ , 1,7 g/l de  $\text{MgSO}_4$ , 1,26 g/l de  $\text{CaSO}_4$ , 0,86 g/l de  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Cette salinité peut être différente 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.

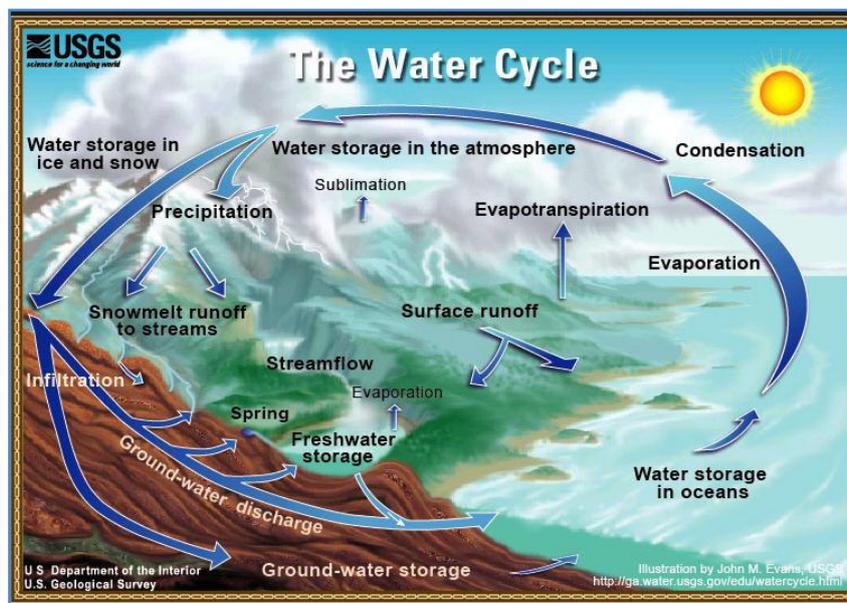


Figure. I.3. : Le grand cycle de l'eau

Tableau. I.2 : Caractéristiques comparées des eaux de surfaces et eaux souterraines .

Caractéristiques	Eaux de surface	Eaux souterraines
<b>Température</b>	Variable selon les saisons	Constante
<b>Turbidité / MES vraies ou colloïdales</b>	Variable et parfois élevée (rejets de carrières, fortes pluies)	Faible ou nulle
<b>Couleur</b>	Dépend essentiellement des MES, des acides humiques, tannins, etc. et des algues	Dépend des acides humiques ou des précipitations Fe - Mn
<b>Minéralisation globale / Salinité</b>	Variable (précipitations rejets, nature des terrains traversés)	Plus élevée que celle mesurée dans les eaux de surface sur le même territoire
<b>Fe et Mn divalent dissous</b>	Absents sauf dystrophisation des eaux profondes	Présents
<b>CO<sub>2</sub> agressif</b>	Généralement absent	Présent souvent en quantité
<b>O<sub>2</sub> dissous</b>	Variable (proche de la saturation dans les eaux propres / absent dans les eaux polluées)	Absent
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Absent	Présent
<b>NH<sub>4</sub></b>	présents dans les eaux polluées	Toujours présents sans rapport avec une pollution bactérienne
<b>Nitrates</b>	Peu abondants	Teneur parfois élevée
<b>Silice</b>	Teneur modérée	Teneur élevée
<b>Micropolluants minéraux et organiques</b>	Surtout présents dans les eaux des régions industrialisés	Absents sauf suite d'une pollution accidentelle
<b>Éléments vivants</b>	Virus, bactéries, algues, protistes, etc. / Présence d'organismes pathogènes toujours possible	bactéries sulfato-réductrices et ferrobactéries surtout

### 3. Historique

Depuis des temps anciens on avait constaté qu'en portant à ébullition de l'eau saline on obtenait, par condensation de la vapeur de l'eau douce. Les marins grecs de l'antiquité distillaient déjà de l'eau de mer en utilisant l'énergie solaire.

La première application industrielle de l'évaporation-condensation a été faite à bord des navires à vapeur vers 1880. Bien que ce soit en 1920 que la première usine de dessalement par voie thermique fut installée à terre (Jeddah – Arabie Saoudite), ce n'est qu'à partir de 1960 que des usines de grande capacité voient le jour, principalement au Moyen-Orient [4].

Les usines de dessalement d'eau de mer utilisant le principe de l'osmose inverse apparaissent à la fin des années 1970. Elles sont tout d'abord adaptées aux faibles capacités de production, pour devenir petit à petit compétitives par rapport à la distillation, et ceci même pour les grandes capacités, du fait principalement de la diminution du prix des membranes et de leurs besoins en énergie électrique. Ainsi, début 2006, il a été mis en service la plus grande usine de dessalement par OI à Ashkelon, avec une capacité de production moyenne de 280 000 m<sup>3</sup> /j [4].

### 4. Les technologies de dessalement

La totalité des installations actuellement en service font appel à deux technologies :

- les procédés thermiques (par vaporisation) basés sur des changements de phase.
- les procédés membranaires basés sur le transport de l'eau à travers des membranes semi-perméables.

Le procédé d'osmose inverse nécessite de l'énergie électrique pour alimenter les pompes à hautes pressions, par contre les procédés thermiques nécessitent l'énergie sous forme de chaleur [4].

#### 4.1. Les procédés thermiques

Le procédé de distillation consiste à chauffer de l'eau de mer pour vaporiser une partie. La vapeur d'eau produite ne contient pas de sels ; il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce [4].

Il existe deux grands types de procédés de distillation :

- la distillation à effet multiple (MED).

- la distillation multi flash (MSF).

#### **4.2. Les procédés membranaires**

La filtration membranaire est un procédé de séparation des composants d'un fluide. Le rôle de la membrane est d'agir comme une barrière sélective, elle permet de laisser passer certains éléments et d'en retenir d'autres en fonction des propriétés respectives de ces éléments sous l'effet d'une force motrice [6]. Qui peut être un gradient potentiel, concentration ou pression qu'il repose sur une différence de pression entre le milieu et la membrane, appelée pression transmembranaire (PTM) [7].

D'après cette pression on distingue les procédés suivants :

- la microfiltration (MF)
- l'ultrafiltration (UF)
- la nano filtration (NF)
- l'osmose inverse (OI)

Les constituants qui sont plus petits que les pores de la membrane sont capables de passer à travers la membrane sous l'effet d'une pression appliquée tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues par la membrane.

##### **La microfiltration (MF)**

La séparation par microfiltration concerne en générale les particules en suspension, les micro-organismes, macromolécules (polymères) pour laquelle la taille des pores de membranes se situant entre 0.1 et 10  $\mu\text{m}$ , les pressions appliquées sont très faible inférieur de 2 bars pour éviter le colmatage [8].

##### **L'ultrafiltration(UF)**

Cette technique utilise des membranes macroporeuses, dont les diamètres des pores sont entre 1 et 100 nm, et les pressions sont supérieures à celle rencontrées en microfiltration entre 1-10 bars. Cette technique permet la séparation des macromolécules et d'espèces colloïdales (polymères, protéines) [8].

##### **La nano filtration(NF) :**

C'est une technique de séparation par membranes dont le champ d'application se situe entre ceux de l'osmose inverse et de l'ultrafiltration. De plus, cette technique retient les sels bivalents et les molécules de l'ordre de 0.001  $\mu\text{m}$  et nécessite une pression de travail de 10 à 25 bars .comparée à l'osmose inverse les membranes de nanofiltration sont moins dense se

qui permet d'obtenir des flux de perméat supérieurs pour des pressions inférieures, cela implique que ce procédé est moins coûteux alors moins consommation d'énergie. La nanofiltration est une technique qui a prospéré au cours des dernières années pour le dessalement de l'eau saumâtre, en raison de sa faible consommation d'énergie. Le rendant moins coûteux que l'osmose inverse. Ayant des pores plus ouverts et fonctionnant avec des pressions plus basses [9].

### **Osmose inverse**

Parmi les procédés membranaires, seule l'osmose inverse est adaptée au dessalement de l'eau de mer.

Lorsque l'on place une membrane semi-perméable entre deux compartiments remplis d'eau de concentration en sels dissous différents, les molécules d'eau ont tendance à migrer de l'eau la moins concentrée vers la plus concentrée de façon à diminuer sa salinité.

Le phénomène est appelé « osmose directe ». Cette migration s'arrête lorsque la différence des niveaux des deux compartiments a atteint une valeur correspondant à la pression osmotique  $\pi$

### **5. Configuration des modules d'osmose inverse**

Pour être mises en œuvre, les membranes sont assemblées sous forme de modules regroupant généralement plusieurs membranes, Cependant en OI, les modules spiralés sont majoritairement employés, ainsi que les fibres creuses. Ces deux types de modules ont l'avantage d'être compacts et peu chers, nécessitent une faible consommation énergétique [13].

Actuellement il existe trois types de modules commercialisés :

- module à membrane plane
- Module à membrane fibre creuse
- module à membrane spiralé

#### **5.1. Le module à membrane plane**

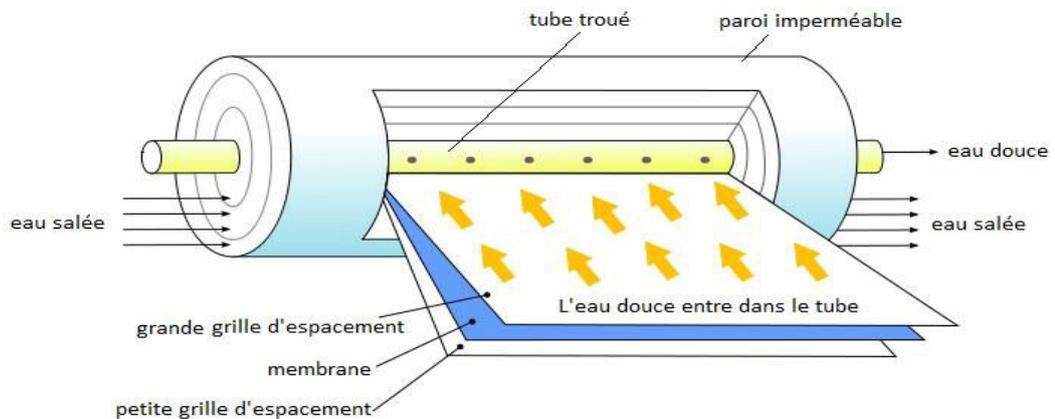
Cet arrangement est le plus ancien et le plus simple, les membranes sont rigides et ne peuvent être enroulées, elles ne sont donc utilisables que dans des dispositifs de type filtre presse (membranes en feuille montées de part et d'autre de cadres rigides, empilés). En raison de leur coût relativement élevé ils ont remplacés dans les procédés d'osmose inverse par les modules spiralés et les modules fibres creuses [8].

## 5.2. Le module à membrane fibre creuse

Se sont des membranes sous forme des fibres en U dont le diamètre est de l'ordre du mm sont mises en faisceau. Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, sont peu coûteux, sensibilités au colmatage et ils sont Inapplicables hors traitement de l'eau [7,12].

## 5.3. Le module à membrane spirale

Pour diminuer les surfaces nécessaires à l'implantation des membranes, celles-ci sont configurées en spirale, comme l'indique la figure I-5. Les zones de circulation de l'eau d'alimentation et de reprise du perméat sont aménagées à l'aide de grilles placées entre les membranes et enroulées avec elle pour former des éléments aux dimensions standardisées [12].



**Figure I.4 :** coupe d'un module à membrane spirale [14]

Le tableau I.1 ci-dessous représente quelque caractéristique concernant les modules membranaires [7]

**Tableau I.3:** comparaison entre différents modules [9]

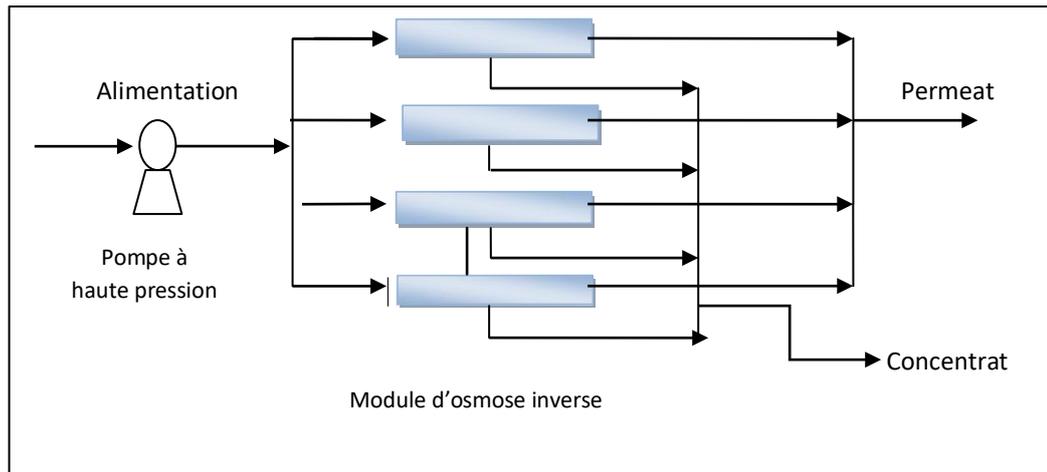
La forme de module	Fibre creuse	plane	spiral
Diamètre hydraulique ( <i>mm</i> )	0.1-1	1-5	0.8-1.2
Matériel de membrane	Organique	Organique inorganique	Organique
Membrane de remplacement	Module	feuille	Cartouche
Coût	Elevé	élevé	Faible
maintenance	Difficile	facile	Difficile
Densité de compactage ( $m^2/m^3$ )	Supérieur 900-3000	Inferieur 100-400	Supérieur 300-1000

Hydranautics, Filmtec, Toray, Koch et dow sont largement reconnus en demain de la technologie membranaire en concurrence pour améliorer l'efficacité économique qualitatif des membranes, la fiabilité et augmenter leur performance [15,16].

## 6. Conception du procédé d'osmose inverse

### Système mono-étage

Un système de dessalement par osmose inverse est un système composé d'une amenée d'eau salée en passant par un système de pompage pour la mise en pression, qui refoule l'eau sous une pression élevée vers les modules d'osmose inverse. Les modules sont montés tous en parallèle [12,17]



**Figure I.5:** système d'une unité de dessalement par procédé d'osmose inverse mono étage [12]

### **Système multi-étages en série**

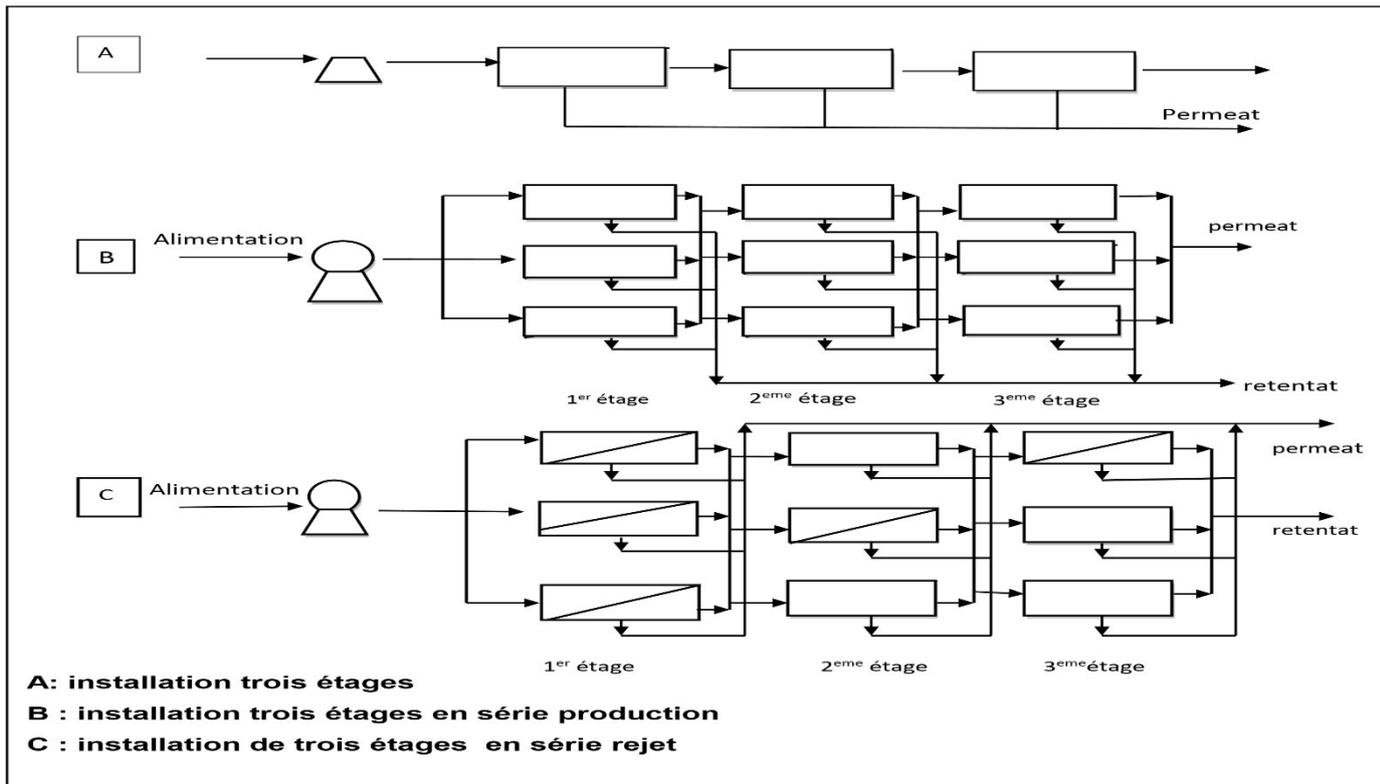
On distingue deux types de montage : montage en série rejet et montage en série production.

#### **Le montage multi-étage en série rejet**

Il est composé principalement par un ensemble d'étage dont le rejet de chaque étage alimente l'étage suivant et ainsi de suite .les productions de l'ensemble des étages sont collectées pour donner à la fin, la production totale du système [18].

#### **Le montage multi-étage en série production**

Il est formé par un ensemble d'étage dont la production de chaque étage alimente l'étage suivant et ainsi de suite, de sorte que l'alimentation de chaque étage a des caractéristiques identiques aux celle de la production de l'étage précédent [18].



**Figure I.6 :** système d'unité de dessalement par procédé d'osmose inverse en série [17].

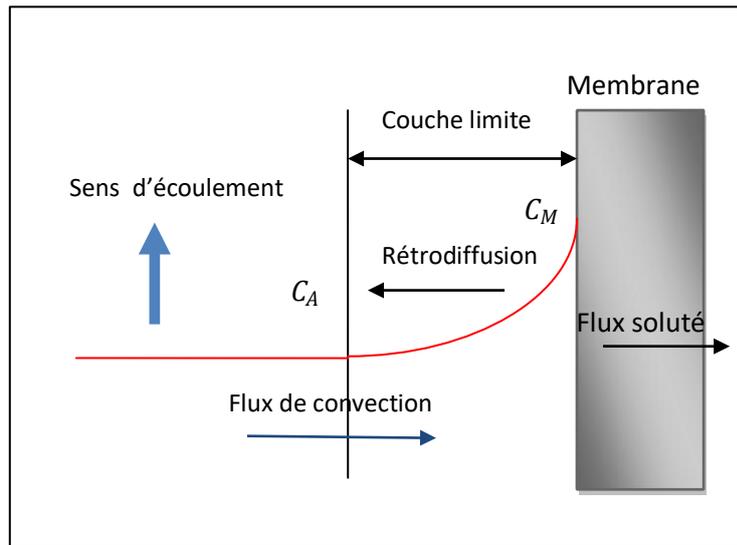
## 7. Les facteurs influençant l'efficacité de l'osmose inverse

Nous définissons sous le terme des facteurs limitant, l'ensemble des phénomènes qui limitent le flux à travers la membrane, citons en premier lieu le phénomène de polarisation de concentration, le colmatage (fouling), notamment l'entartrage et biofouling (colmatage organique).

### 7.1 Phénomène de polarisation de concentration

La polarisation de concentration est un facteur important qui influence directement sur la performance de procédé d'osmose inverse. Elle est la conséquence de l'accumulation de solutés à la surface de la membrane qui engendre un gradient de concentration. celui-ci entraîne un flux rétrodiffusion de soluté qui tend à équilibrer les concentrations. L'équilibre entre le flux convectif et le flux diffusif conduit à un profil de concentration sur distance à la paroi correspondant à l'épaisseur de la couche polarisée [17,19].

La figure I.8 ci-dessous correspond au profil de la polarisation de concentration



**Figure I.7** : phénomène de polarisation de concentration [12]

## 7.2 Le colmatage ou Fuling

L'eau de mer contient des matières organiques en suspensions et colloïdales qui vont avoir tendance de se déposer sur les surfaces des membranes et à les colmater. Les quelles créent du substrat. par conséquent le développement d'un biofilm sur la surface des membranaires [10,14].

Par conséquent une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production du procédé [10].

L'optimisation du procédé membranaire repose principalement sur la maîtrise du colmatage des membranes d'osmose inverse qui ont tendance à se colmater rapidement.

Le colmatage est l'un des facteurs limitant majeur qui limite la performance des procédés d'osmose inverse. On définit le colmatage comme étant l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane. Ces phénomènes qui sont essentiellement de nature physique, chimique, biologique, entraînant à la fois une baisse de la perméabilité et une variation de la sélectivité. [12]

## 7.3 Entartrage (scaling)

L'entartrage des membranes est dû à la précipitation de certains sels dissous si leur produit de solubilité a été dépassé. Ce phénomène peut avoir lieu dans la zone alimentation/concentration où la teneur en sels dissous va augmenter au fur

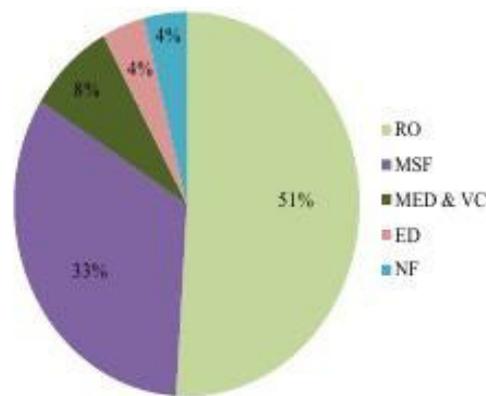
et à mesure de la traversée des éléments successifs logés dans le corps de pression, augmentation due à la perméation d'une partie de l'eau. Compte tenu de s ions présents dans les eaux salines (calcium, magnésium, bicarbonate, sulfate) ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ), de l'hydroxyde de magnésium ( $(OH_2)$ ) et du sulfate de calcium ( $CaSO_4$ ). [9,23]

### 8. La consommation énergétique

Les ressources en eau non conventionnelles, et tout particulièrement le dessalement d'eau de mer sont l'objet d'un fort développement depuis deux décennies.

Elles offrent des solutions pour sécuriser les ressources en eau pour les villes et l'industrie, leur potentiel de développement est considérable si on considère les demandes qu'elles pourraient satisfaire .mais par ailleurs elles sont plus consommatrices d'énergie que les solutions classiques [26].

En regardant toutes les usines de dessalement installées dans le monde nous nous rendons compte simplement que deux technologies importantes de dessalement sont employées l'osmose inverse (RO) avec 51% et MSF avec 33%. La figure ci dessous illustre l'application industrielle des différents procédés de dessalement à travers le monde [26].



**Figure I.8** : application industrielle des procédés de dessalement à travers le monde (IDA DesalinationYearbook, 2007) [26]

L'osmose inverse présente une faible consommation d'énergie et faible coût d'investissement par rapport à la distillation [8]. Le tableau I.2 montre l'ordre de grandeur de la consommation énergétique des différents procédés de dessalement de l'eau de mer [2].

**Tableau I.4:** Comparaison des énergies consommées par les différents procédés de  
Dessalement [27]

Procédé	Consommation d'énergie (kWh/m <sup>3</sup> )
Distillation à détente étagées (multi stage flash)	18
Distillation à multiple effet	15
Osmose inverse	5

### **A. La nécessité de système de récupération**

Les efforts des chercheurs se concentrent sur la réduction de coût de l'eau produite qui se situe entre 68 à 135 DA/m<sup>3</sup> pour les grandes installations, développer et améliorer des membranes permettre de produire une meilleure qualité de l'eau avec des pressions de fonctionnement plus faible, mais le plus important souci est de récupérer l'énergie perdue par le rejet de saumure [2].

L'implantation de système de récupération dans les stations de dessalement par procédé d'osmose inverse, a stimulé la croissance de l'utilisation de la technologie d'osmose inverse à travers le monde entier [1].

Par conséquent, l'énergie de consommation dans les stations de dessalement par osmose inverse sans système de récupération varie de 5.5 à 8 kWh/m<sup>3</sup>, par contre les procédés avec installation de système de récupération l'énergie est variée entre 5-3 kWh/m<sup>3</sup> [28].

### **B. Historique et évolution de système de récupération**

L'efficacité, la disponibilité et la durabilité sont les caractéristiques les plus importantes lorsqu'on compare les systèmes de récupération d'énergie.

Plusieurs systèmes sont conçus et testés pour récupérer l'énergie à la sortie de rejet du saumure de procédé d'osmose inverse, en 1980 le premier concept installé au sein des stations de dessalement était la pompe centrifuge, Francis ou Pelton turbine, ces systèmes ont permis de réduire l'énergie à 5kwh/m<sup>3</sup> [28].

Actuellement le système de récupération installé au sein des grandes stations dessalement l'échangeur de pression d'une efficacité plus de 95% et offre une consommation d'énergie spécifique (CSE) moins de 2.5 kWh/m<sup>3</sup> [28].

En raison de leur fiabilité et efficacité prouvée jusqu'à 88% les turbines sont les systèmes dominants installés dans les procédés d'osmose inverse pour récupérer l'énergie de concentrat couplé avec une pompe centrifuge [28].

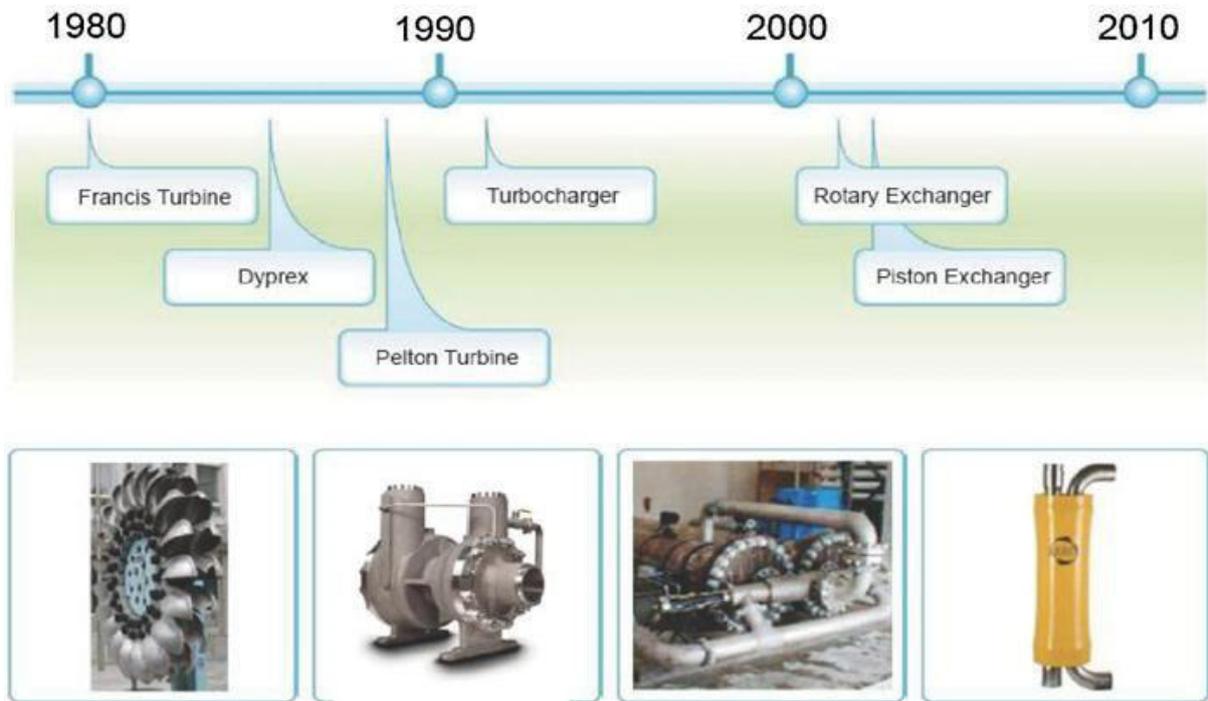
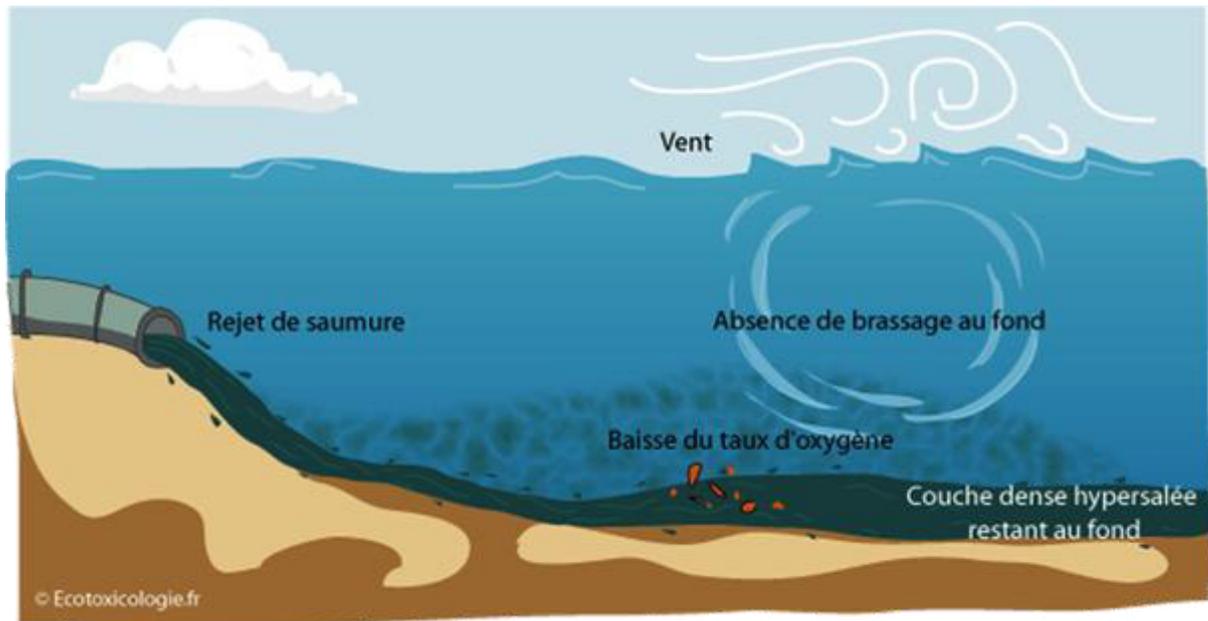


Figure I.10 : l'évolution de système de récupération [28]

## 9. Aspect environnementale

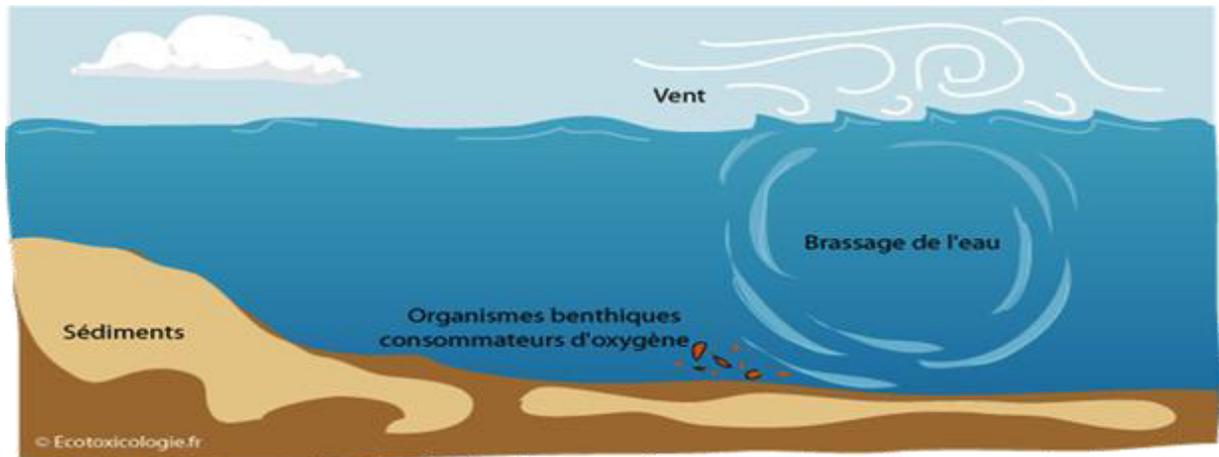
La saumure est un sous-produit de dessalement inévitable, qui est déchargée, généralement dans l'environnement marin. Les implications environnementales de cette solution de sel fortement concentrée (TDS) est auteur de 70 000 ppm sur les écosystèmes marins locaux qui ont été discutées de façon contre-versée pendant beaucoup d'années. La salinité totale de la saumure est de 63,8 g/l contre 38,95 g/l pour l'eau d'alimentation. [29] la saumure d'une salinité d'environ 72 % , est rejetée dans la mer par un émissaire doté à son extrémité d'un multi diffuseur, à une profondeur d'environ 5 m et à une distance de

250 m du rivage; d'après leur étude, un accroissement de la salinité dans un rayon de 200 m à partir du rejet. De fait, la plus forte salinité (54 ‰) a toujours été décelée au point de rejet et il était possible de relever une salinité supérieure à celle de l'eau de mer (39 ‰) jusqu'à 200 m du rejet. La zone d'impact présentant une forte salinité varie selon la saison, l'impact le plus marqué se produisant durant les mois d'été. D'après l'étude de l'usine de dessalement sur marin montre que les salinités élevées c de l'algue macroscopique *Cystoseira* que d'autres espèces d'algues microscopiques disparaissaient de la zone environnante (à une distance de 100 m du point de rejet). En outre, d'autre part, elle montre une diminution importante de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique au site de rejet du concentré. [30] Les modifications de la salinité de l'eau ont induit des changements dans la composition des formations macro faunistiques à proximité du point de rejet. Alors que la communauté benthique avant la mise en place de l'émissaire se composait pour 27% de polychètes, pour 27% d'échinodermes, pour 26% de scaphopodes et pour 20% de gastropodes, durant la période d'exploitation, les seuls taxons observés étaient les polychètes et les crustacés représentant respectivement 80 et 20% de l'ensemble de la macrofaune. Ce phénomène peut conduire à des modifications du milieu local Diminution de la lumière→ d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales.



**Figure I.12** Généralité sur le dessalement et ses effets sur l'environnement décelée au point de rejet

Il était possible de relever une salinité supérieure à celle de l'eau de mer (39 ‰) jusqu'à 200 m du rejet. [30] La zone d'impact présentant une forte salinité varie selon la saison, l'impact le plus marqué se produisant durant les mois d'été. D'après les études sur marin montre que les salinités élevées causaient des dommages importants aux communautés de l'algue macroscopique *Cystoseira barbata* à proximité de l'émissaire du concentré, alors que d'autres espèces d'algues microscopiques disparaissaient de la zone environnante. En outre, d'autre part, elle montre une diminution importante de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique au site de rejet du Les modifications de la salinité de l'eau ont induit des changements dans la ition des formations macro faunistiques à proximité du point de rejet. Alors que la communauté benthique avant la mise en place de l'émissaire se composait pour 27% de polychètes, pour 27% d'échinodermes, pour 26% de scaphopodes et pour 20% de durant la période d'exploitation, les seuls taxons observés étaient les polychètes et les crustacés représentant respectivement 80 et 20% de l'ensemble de la macrofaune. Ce phénomène peut conduire à des modifications du milieu local : la lumière : la présence d'eau hyper salée provoque la formation d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales. [27]



**Figure I.13** : Etat initial pas de rejet de saumure. [27]

## 10. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### 10.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules regroupés forment un champ photovoltaïque.

#### A. Irradiation solaire

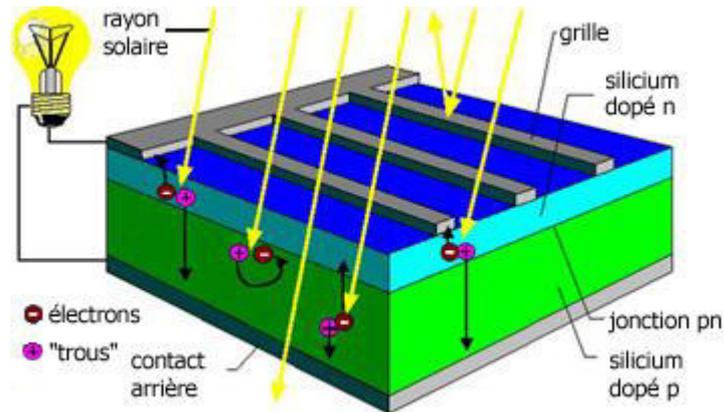
L'irradiation (Ensoleillement ou éclaircissement) est définie comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en  $W/m^2$  (watt par mètre carré). L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en  $(J \cdot m^{-2})$  (Joule par mètre carré). [1]

D'autres unités plus courantes sont le  $Wh/m^2$  (wattheure par mètre carré) Signalons que, l'irradiation solaire dépend de :

- l'orientation et l'inclinaison du panneau solaire.
- la latitude du lieu et son degré de pollution.
- la période de l'année.
- l'instant considéré dans la journée.
- la nature des couches nuageuses.

## B. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est conçue en se basant sur le phénomène physique appelé « effet Photovoltaïque ». Une force électromotrice apparaît lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, sa disposition, température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule .

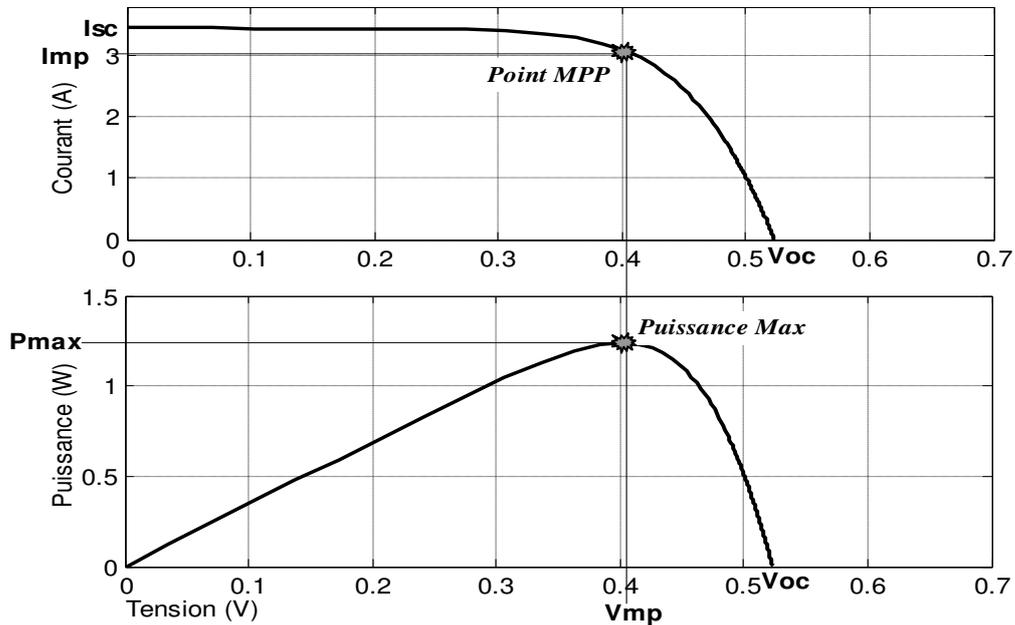


Figure(I.14) :la structure d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre couche dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme montré dans la figure précédente.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

**Caractéristique courant – tension (I-V) d’une cellule photovoltaïque :**



**Figure I.15.** Caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d’une cellule solaire pour un ensoleillement de  $1000\text{W/m}^2$  et température égale à  $30^\circ\text{C}$ .

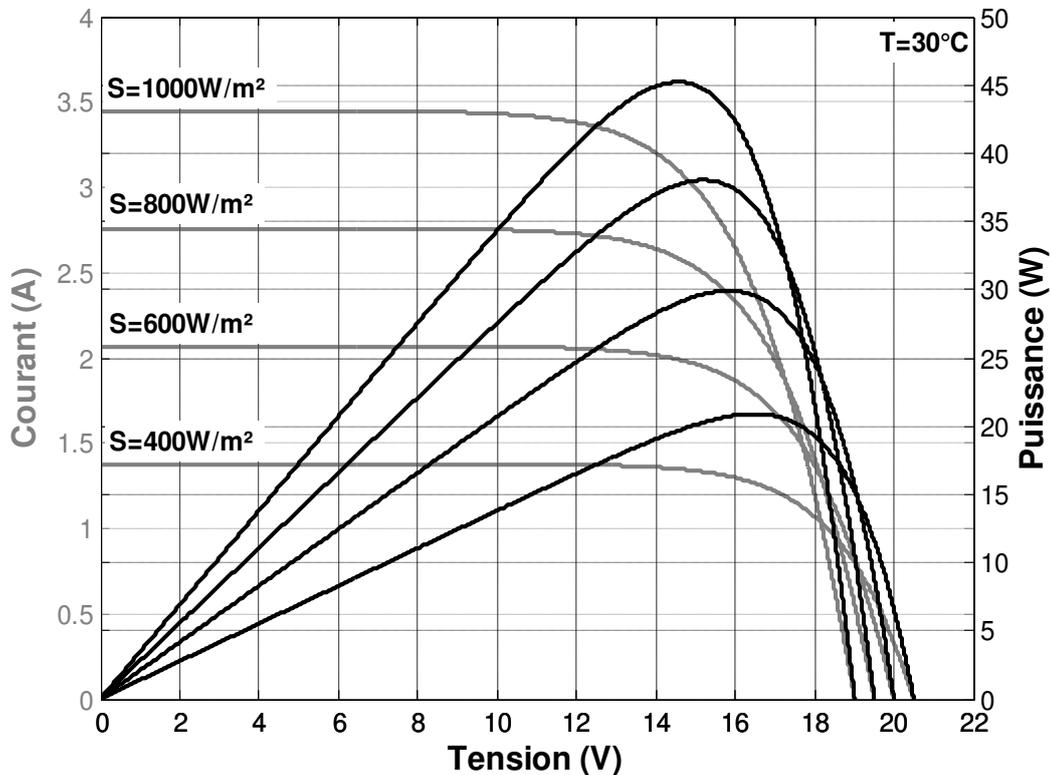
Comme nous le voyons sur la figure 1-15, la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe  $I(V)$  non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d’ensoleillement et de température. Cette courbe nous informe sur trois points importants : [2]

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal ( $I_{sc}$ ). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ).
- Le point de la tension maximale de la cellule ( $V$ ), (environ  $0.6\text{ V}$ ) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V$ ).

**Caractéristique puissance-tension (P-V)**

En traçant les courbes  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  pour différents ensoleillements à température constante (figure 1.16), et pour différentes températures à ensoleillement constant (figure 1.17), on remarque que les caractéristiques du panneau solaire dépendent fortement de l’ensoleillement et de la température.

Pour des ensoleillements variables et température constante le courant de sortie  $I$  est très influencé par le changement de l'ensoleillement alors que la tension  $V$  reste sensiblement constante, contrairement la tension  $V$  elle est influencée par les changements de la température alors que le courant généré  $I$  reste confiné dans un intervalle étroit.



**Figure I.16** Caractéristique  $I = f(V)$  (En haut) et  $P = f(V)$  d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements  $S$  avec  $T = 30^\circ\text{C}$ .

### Modèle d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série  $R_s$  et  $R_{sh}$  comme le montre le schéma équivalent de la figure suivante :

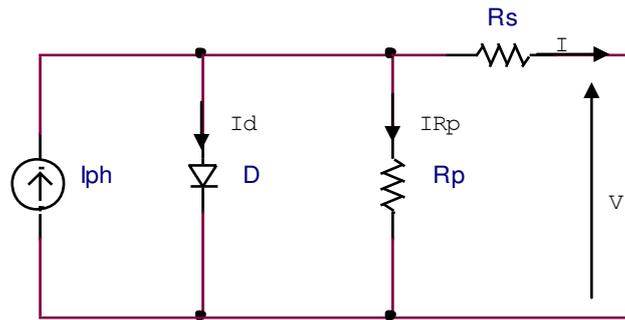


Figure I.17. Circuit équivalent d'une cellule solaire.

#### Association mixte (série +parallèle)

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un champ photovoltaïque, et le même cas pour les panneaux pour atteindre la puissance souhaitée, courant et la tension

#### Type des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle et sont:

- **Cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi le coût le plus élevé.
- **Cellules poly-cristallines** : Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible.
- **Cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

**CHAPITRE 2**

**MISE EN EQUATION**

**1. Le procédé d'osmose inverse**

Pour réduire la concentration en sels dissous d'une eau il suffit d'appliquer une pression supérieure à la pression osmotique afin de forcer les molécules d'eau à travers la membrane semi-perméable. Il s'agit alors d'osmose inverse

La pression osmotique  $\pi$  être exprimée à partir de la relation de Van't Hoff [8] :

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

Avec :

C : Correspond à la concentration molaire du soluté ( $\text{mol.m}^3$ )

R : est la constante des gaz parfaits  $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1} .\text{K}^{-1}$

T : est la température absolue de la solution en Kelvin

L'application d'une pression plus grande que l'osmotique pression d'une solution saline contre une substance semi-perméable la membrane a pour résultat le passage de l'eau pure à travers la membrane. L'équation de base qui décrit le processus de RO est la suivante:

$$J_w = \frac{Q_w}{A_M} = \frac{K'_w(\Delta p - \Delta\pi - \Delta p_{DROPE})}{d} = K_w(\Delta p - \Delta\pi - \Delta p_{DROPE}) \quad (2)$$

$J_w$  est le flux d'eau de perméat ( $\text{m} / \text{s}$ ),

$Q_w$  est le débit d'eau à travers la membrane ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$K_w$  est la perméabilité spécifique de l'eau à travers la membrane ( $\text{m}^2 \text{ h}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ),

$A_M$  est la surface de la membrane ( $\text{m}^2$ ),

$d$  est l'épaisseur de la membrane (m),

$\Delta\pi$  est la différence de pression osmotique entre l'eau d'alimentation à la surface de la membrane et l'eau produite (Pa),

$\Delta P$  est la différence de pression entre l'eau d'alimentation et l'eau de production (Pa),

$\Delta P_{DROP}$  est la chute de pression dans le module de la canal d'alimentation (Pa).

La perméabilité de l'eau à travers la membrane (KW) dépend du matériau (polymère) avec lequel la membrane est construite, de la température et du temps de fonctionnement de la membrane. La température affecte considérablement le débit d'eau à travers la membrane. Une augmentation de la température de 1 C entraîne une augmentation d'environ 3% du débit d'eau.

Comme on peut le voir à partir de l'équation précédente, afin d'atteindre le débit souhaitable de produit de l'eau, il est nécessaire d'appliquer une pression sur l'eau d'alimentation supérieure à celle de la pression osmotique de l'aliment eau. Les systèmes RO fonctionnent avec la compression de l'alimentation 2e3 fois supérieure à la valeur de pression osmotique. Eau de mer la pression osmotique est calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\Delta\pi = \frac{(0.6955 + 0.0025 \times T) \times 10^8}{\rho_{sw}} (C_M - C_P) \quad (3)$$

T est la température en C,

$C_M$  est la concentration en sel à la surface de la membrane (kg / m<sup>3</sup>),

$C_P$  est le sel concentration dans l'eau produite (kg / m<sup>3</sup>)

$\rho_{sw}$  est la densité de l'eau de mer (kg / m<sup>3</sup>) donnée par l'équation :

$$\rho_{sw} = 498.4 \times m(T) + (248.400 \times m(T)^2 + 752.4 \times m(T) \times C_{sw})^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{Avec } m(T) = 1.0069 - 2.757 \times 10^{-4} \times T \quad (5)$$

$C_{sw}$  est la concentration de sel dans l'eau de mer (kg / m<sup>3</sup>).

La concentration moyenne  $C_M$  sur la surface des membranes est donnée par l'équation:

$$\frac{(C_M - C_P)}{(C_R - C_P)} = \exp\left(\frac{J_w}{k}\right) \quad (6)$$

$J_W$  est le flux d'eau à travers la membrane (m/s);

$C_B, C_M, C_P$  sont les concentrations de sels de la saumure, sur la membrane et l'eau produite (kg / m<sup>3</sup>)

$k$  est le coefficient de transfert de masse à travers la membrane (m/l.s).

Le coefficient de transfert de masse à travers la membrane  $k$  pour les modules à enroulement en spirale, est donné par la relation :

$$Sh = \frac{k D_h}{D_B} = 0.065 \times Re^{0.875} \times Sc^{0.25} \quad (7)$$

$Sh$  est le nombre de Sherwood,

$D_h$  est le diamètre hydraulique du canal (m),

$Re$  est le nombre de Reynolds dans le canal d'alimentation,

$Sc$  est le nombre de Schmidt.

$D_B$  est la diffusivité de saumure entrant dans le canal d'alimentation (m<sup>2</sup>/ s), donnée par la relation :

$$D_B = 6.725 \times 10^{-6} \times \exp\left(0.1546 \times 10^{-3} \times C_B - \frac{2513}{273.15 + T}\right) \quad (8)$$

Le nombre de Reynolds à l'intérieur du canal d'alimentation est donné par l'équation :

$$Re = \frac{\rho_{sw} D_h U_B}{\mu_{sw}} \quad (9)$$

$\mu_{sw}$  est la viscosité de l'eau de mer (Pa s)

$$\mu_{sw} = 1.234 \times 10^{-6} \times \exp\left(0.0212 \times C_B + \frac{1965}{273.15 + T}\right) \quad (10)$$

$U_B$  la vitesse de la saumure dans le canal d'alimentation du module enroulé en spirale est donnée par l'équation :

$$U_B = \frac{Q_B}{A_C} = \frac{Q_B}{W_M d_{sp} \varepsilon_{sp}} \quad (11)$$

$W_M$  est la largeur du canal d'alimentation du module(m),

$d_{sp}$  est l'épaisseur du canal épaissi,

$\varepsilon_{sp}$  est l'épaisseur la porosité,

$Q_B$  est le débit de la saumure.

Le nombre de saumure de Schmidt est donné par la relation:

$$S_c = \frac{\mu_{SW}}{\rho_{SW} \times D_B} \quad (12)$$

$\Delta P_{DROP}$  les pertes de charge dans la canal d'alimentation des modules enroulés en spirale est donnée par l'équation suivante:

$$\Delta P_{DROP} = 6.23 \times R_e^{-0.3} \frac{\rho_{SW} U_B^2 L_M}{2 D_h} \quad (13)$$

$U_B$  est la vitesse de la saumure entrant dans le canal d'alimentation (m / s),

$L_m$  est la longueur du canal d'alimentation (m),

$D_h$  est le diamètre hydraulique du canal (m),

$Re$  est le Nombre de Reynolds à l'intérieur du canal d'alimentation.

En raison du fait qu'aucune membrane n'est parfaite et la différence de concentration entre la saumure et l'eau produite, une petite quantité de sels traverse la membrane. C'est un phénomène de transport de masse et peut être décrit par l'équation suivante :

$$J_S = \frac{Q_S}{A_M} = K_S (C_M - C_P) \quad (14)$$

$J_S$  est le flux de sels à travers la membrane (kg / s m<sup>2</sup>)

$Q_S$  est le débit de sels à travers la membrane (kg / s);

$C_M, C_P$  sont les concentrations de sels d'eau de membrane et de produit (kg / m<sup>3</sup>)

$A_M$  est la zone de la membrane (m<sup>2</sup>)

$K_S$  est le coefficient de transfert de masse des sels à travers la membrane (m<sup>2</sup>/ s).

Il est clair que le  $K_W$  doit être aussi grand que possible et  $K_S$  aussi petit que possible pour atteindre la plus petite résistance à la pénétration de l'eau à travers la membrane et la plus grande résistance à la perméation des sels

Deux facteurs importants pour la membrane sont la pénétration des sels et le rejet des sels, qui sont définis par l'équation suivante :

$$\text{le rejet des sels} = 1 - \text{la pénétration des sels} = 1 - C_P/C_F \quad (15)$$

De plus, la pénétration intrinsèque des sels et le rejet des sels ( $R_{IN}$ ) sont des paramètres importants, qui sont définis par l'équation suivante :

$$R_{IN} = 1 - \text{la pénétration intrinsèque des sels} = C_P/C_M \quad (16)$$

Le rejet du sel est une caractéristique importante de la membrane et il est différent pour les différents ions Tableau(II.1).

Tableau. II.1 Rejet d'ions d'une membrane RO [1]

Ions	Rejet d'ions(%)	Ions	Rejet d'ions (%)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	92	Nitrates	85
Na <sup>+</sup>	95	Chlorates	95
K <sup>+</sup>	95	Fluorides	95
Mg <sup>+</sup>	97	Sulfates	97
Sr <sup>+</sup>	97	Phosphates	99
Ca <sup>+</sup>	98	Acides carbonates	95

Le rejet de sel intrinsèque (R<sub>IN</sub>) est un important facteur opérationnel caractéristique du module de la membrane et il est considéré comme indépendant de la pression motrice dans le module.

Un autre facteur important est le taux de production (Y), qui est défini comme le rapport entre les débits de l'eau produit et le débit d'eau d'alimentation. Les systèmes OI dans le cas de l'alimentation en eau de mer sont conçus pour des taux de production est de 45%.

Étant donné un élément spécifique enroulé en spirale à membrane, la caractéristiques géométriques A<sub>M</sub>, d<sub>h</sub>, d<sub>SP</sub>, e<sub>SP</sub>, W<sub>M</sub>, L<sub>M</sub> et les constantes opérationnelles K<sub>w</sub>, K<sub>s</sub>, R<sub>IN</sub> peuvent être déterminées par le fabricant. Puis les équations. (24) et (26) peut être utilisé pour le calcul du taux de récupération de l'élément en fonction de la pression appliquée DP et les caractéristiques de la saumure (CB, QB, T) entrant dans l'élément.

Les besoins en énergie d'une unité d'OI compte tenu du ΔP<sub>F</sub> peut être calculé par l'équation:

$$P_{RO} = \left( \frac{Q_F \times \Delta P_F}{36.6 \times e_{hpp} \times Y} \right) \quad (17)$$

Le tableau suivant représente d'autres éléments consommateurs d'énergie. Ils sont représentés comme Suits :

Tableau. II.2.la consommation sans système de récupération

La description	CONSOMMATION (KWh)	CONSOMMATION SPECIFIQUE
LA DISTRIBUTION	12.51	0.5
OI SYSTEME et POMPES HP	103.66	4.1430
AUTRES	16.263	0.65

Les besoins en énergie d'une unité d'OI compte tenu du  $\Delta P_F$  avec système de récupération peuvent être calculé par l'équation :

$$PR_{RO} = \left( \frac{Q_F \times \Delta P_F \times (1 - e_{hhp} \times (1 - Y))}{36.6 \times e_{hhp} \times Y} \right) \quad (18)$$

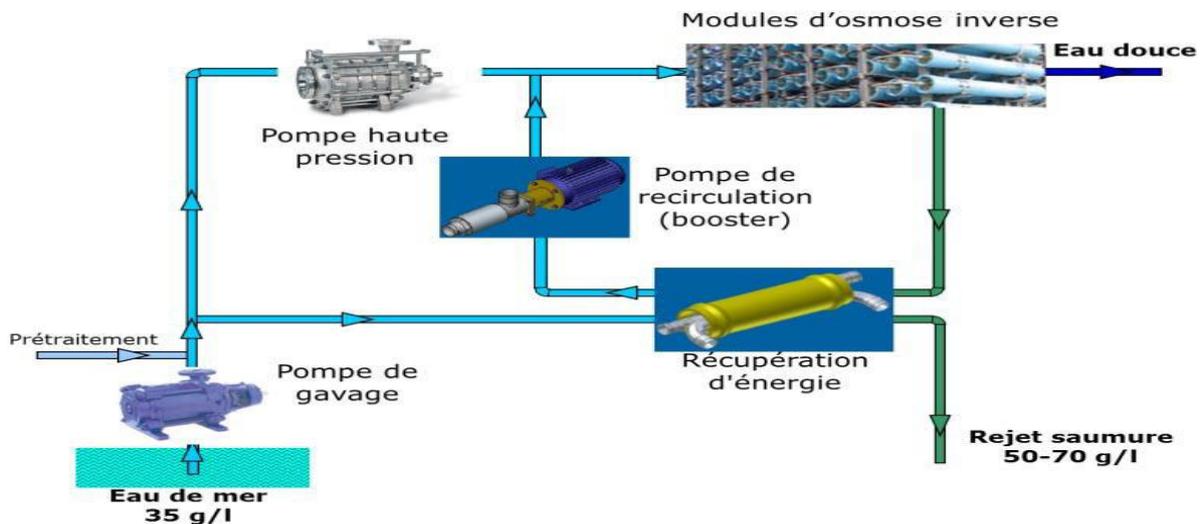


Figure. II.1. Schéma représentant le rôle d'un système de récupération

Le gain en énergie (l'énergie gagnée)

$$gain = \frac{P_{RO} - PR_{RO}}{P_{RO}} \quad (19)$$

Tableau. II.3.la consommation avec système de recuperation

<b>La description</b>	<b>CONSOMMATION (KWh)</b>	<b>CONSOMMATION SPECIFIQUE</b>
LA DISTRIBUTION	12.51	0.5
OI SYSTEME et POMPES HP	55.62	2.20
AUTRES	16.263	0.65

## **2. Source d'énergie solaire photovoltaïque**

Lorsque la lumière est absorbée par une cellule solaire, des électrons sont libérés et se déplacent en fonction du potentiel électrique interne, de sorte que lorsqu'une charge est connectée entre les contacts un courant électrique circule. La tension à travers une cellule solaire est dépendant principalement de la conception et des matériaux de la cellule, alors que le courant électrique dépend principalement sur le rayonnement solaire incident et la zone cellulaire. La sortie d'une cellule solaire typique, exposée au soleil, augmente de zéro au lever du soleil à un maximum à midi puis retombe à zéro au crépuscule. Le rapport entre l'énergie électrique produite par une cellule solaire et l'énergie solaire incidente l'irradiance est connue sous le nom d'efficacité de la cellule PV.

Des groupes de cellules sont montés ensemble sur une plaque de verre et câblé en série pour former un module PV typiquement autour de 1 m<sup>2</sup> de taille. Des groupes de modules peuvent être connectés électriquement pour former un générateur photovoltaïque. Les panneaux PV peuvent être monté sur une structure fixe ou sur un sun-tracking structure pour maximiser le rayonnement solaire incident.

La capacité de production d'énergie d'un générateur photovoltaïque est exprimé en watts-crête ( $W_p$ ). Une cellule PV de 1  $W_p$  produit 1 W d'énergie électrique lorsqu'il est exposé au soleil éclairement énergétique de 1000 W m<sup>2</sup> à une température de cellule 25 ° C

La plupart des systèmes PV utilisent des cellules en silicium monocristallin ou poly cristallin. Le commercial le plus avancé Les modules de silicium cristallin ont des rendements supérieurs à 15% mais les rendements varient généralement entre 13 et 15%.

Autres composants du système PV, tels que le câblage, batteries, contrôleurs de charge de batterie, onduleurs, etc. sont communément appelés «composants de la balance du

système» (CBS). Ces composants fournissent l'interface nécessaire avec la grille ou une application spécifique telle que charges domestiques, équipement de télécommunication, etc.

L'énergie produite par les cellules solaires dépend du rayonnement solaire de la région géographique spécifiée, des cellules PV et leur efficacité.

L'énergie produite est calculée par l'équation :

$$P_{PV} = \eta_{pv} A_{pv} G = \eta_{mp} \eta_{T.coef} G A_{pv} \quad (20)$$

$\eta_{pv}$  est l'efficacité globale,

$\eta_{mp}$  est le maximum de l'efficacité du point PV du module PV,

$\eta_{T}$ , coeff est l'efficacité totale de la poussière, pertes de l'onduleur et pertes dues aux connexions ( $\eta_{con}$ )

$A_{PV}$  est la surface PV ( $m^2$ ),

$G$  est le rayonnement solaire moyen ( $W / m^2$ ).

L'efficacité maximale du point PV du module PV  $\eta_{mp}$  diminue avec l'augmentation de la température de la cellule et Éq. (2) est utilisé pour prendre cela en compte :

$$\eta_{mp} = \eta_{mpSOC} + \mu_{P,MP} (T_C - T_{SOC}) \quad (21)$$

$\eta_{mp}$  est l'efficacité du module en standard conditions de fonctionnement (SOC),

$\mu_{mp}$  est le coefficient de température d'efficacité au point de puissance maximale (il a une valeur négative) ( $^{\circ}C^{-1}$ ),

$T_C$  est la température réelle de la cellule C.

$T_{SOC}$  est la température dans les conditions de fonctionnement standard  $25^{\circ}C$ .

L'efficacité du module dans des conditions de fonctionnement standard est donnée par Eq :

$$\eta_{mpSOC} = \frac{I_{mpSOC} V_{mpSOC}}{A_{PVC} G_{SOC}} \quad (22)$$

$I_{mpSOC}$  est le courant à la puissance maximale point du module dans les conditions de fonctionnement standard (A),

$V_{mpSOC}$  est la tension à la puissance maximale point du module dans des conditions de fonctionnement standard,0

$A_{PVC}$  est la surface de module (m<sup>2</sup>)

$G_{SOC} = 1000 \text{ W m}^2$  est l'ensoleillement solaire dans des conditions de fonctionnement standard.

$I_{mpSOC}$ ,  $V_{mpSOC}$ ,  $A_{PVC}$  dans Eq. (23) sont spécifiques au module PV et sont fournis par le fabricant.

Le coefficient de température mp, point de fusion de l'efficacité à la puissance maximale est approximée comme suit:

$$\mu_{p,mp} = \eta_{mpSOC} \frac{\mu_{VOC}}{V_{VOC}} \quad (23)$$

$\mu_{VOC}$  est le coefficient de température de tension et est également fourni par le fabricant.

La température de fonctionnement du module (cellule)  $T_C$  est estimée par la méthode de Dufie et Beckman, qui est sur la base du bilan énergétique à la surface de la cellule [32]:

$$T_C = T_a + G \times \frac{\tau\alpha}{U_L} \times \frac{1 - \eta_c}{\tau\alpha} \quad (24)$$

$G$  est le rayonnement solaire incident ( $\text{W /m}^2$ ),

$U_L$  est le coefficient de perte de chaleur de la cellule à l'environnement y compris les pertes par convection et le rayonnement de la haut et le bas de la cellule et pertes par conduction à travers le cadre de montage) ( $\text{W /m}^2 \text{ C}$ ),

$T_a$  est la température ambiante (C),

$\tau$  est la transmittance de la couverture sur les cellules,  $\alpha$  est la fraction du rayonnement incident qui est absorbée à la surface de la cellule.

$\eta_c$  est l'efficacité du module dans la conversion du rayonnement en énergie électrique.

L'efficacité du module  $\eta_c$  est approchée par en le prenant égal à  $\eta_{mpSOC}$ . Le produit  $\tau\alpha$  est considéré constante égale à 0,9 ( $t=0,9$ ).  $U_L$  est calculé par l'équation :

$$\frac{\tau\alpha}{U_L} = \frac{T_{C,NOST} - T_{a,NOST}}{G_{T,NOST}} = \frac{T_{C,NOST} - 20}{800} \quad (25)$$

$T_{C, NOST}$  est la température nominale de fonctionnement, défini comme la température de la cellule qui est atteinte lorsque la cellule est montée de manière normale à un rayonnement solaire de  $G_{T, NOST} = 800 \text{ W m}^2$ , vitesse du vent de  $1 \text{ m s}^{-1}$  et température ambiante de  $T_{a, NOST} = 20 \text{ C}$  et à vide opération. Aux fins du modèle,  $T_{C, NOST}$  est : prise pour être constante égale à  $46 \text{ C}$ .

$t_{hd}$  est la moyenne des heures de lumière du jour dans une région (h /jour)

$G$  le rayonnement solaire incident moyen ( $\text{W / m}^2$ ),

Alors la production d'énergie des cellules PV est donnée par l'équation :

$$P_{PVM} = \eta_{mp} \eta_{T,coef} G A_{PVM} t_{hd} \quad (26)$$

$A_{PVM}$  est la zone de module

$P_{PVM}$  est la moyenne de production journalière d'énergie des modules PV ( $\text{kWh / jour}$ ).

Dans l'équation précédente, les modules PV sont considérés inclinés à l'angle optimal pour des performances maximales

La production d'énergie requise PPV ( $\text{kWh / jour}$ ) est donné par l'équation:

$$P_{PV} = \frac{P_{DES}}{t_{hd}/24 + (1 - t_{hd}/24) \alpha_{BCH} \alpha_{BDCH}} \quad (27)$$

$P_{DES}$  est l'énergie requise par le dessalement ( $\text{kWh / jour}$ ),

$\alpha_{BCH}$  est l'efficacité de charge du batterie,

$\alpha_{BDCH}$  est l'efficacité de décharge du batterie.

$N_{PVM}$  Le nombre total de modules nécessaires

La surface PV totale ( $A_{PV}$ ) est calculée par l'équation :

$$P_{PV} = \frac{1}{t_{hd}/24 + (1 - t_{hd}/24) \alpha_{BCH} \alpha_{BDCH}} \frac{P_{DES}}{P_{PVM}} \quad (27)$$

Et la surfaces occupée par les panneaux :

$$A_{PV} = P_{PVM} A_{PVC} \quad (28)$$

La capacité de la batterie dépend des besoins énergétiques ainsi que l'autonomie sans apport solaire (jours d'autonomie)

**Durée d'autonomie:** la durée de l'autonomie correspond à la période au cours de laquelle, les batteries doivent alimenter seules l'installation PV.

### Calcul de la capacité de stockage des batteries

Le calcul de la capacité nominale de la batterie (Ah) prend en compte les besoins et les jours d'autonomie d'une part, et de la profondeur de décharge d'autre part, la capacité est donnée par l'équation:

$$C = \frac{N_a E_c}{U P_d} \quad (29)$$

$P_d$  : Profondeur de décharge (0,7 à 0,8).

$E_c$ : l'énergie consommée (besoins énergétiques).

$U$ : Tension continue du système (volt).

$N_a$ : Nombre des jours d'autonomie de la batterie

Et le nombre ( $N_B$ ) de batteries par cette équation :

$$N_B = C / C_U \quad (30)$$

Avec :

$C_U$  est la capacité d'une seule batterie

### 3. Calcul des indicateurs économiques

Les projets d'immobilisations proposés peuvent être évalués par une étude de faisabilité économique inclure une analyse économique du projet. L'analyse économique a pour but de déterminer s'il existe une justification économique à la décision d'investissement. Cette évaluation va au-delà des éléments généralement inclus dans une analyse financière. La faisabilité économique est intéressé par:

- Les avantages économiques du projet
- Les coûts économiques du projet
- Le solde de ceux-ci exprimés en valeur actuelle (le coût économique net avantage)

Les coûts et avantages économiques ne sont pas toujours les mêmes que les coûts et avantages financiers. L'analyse économique inclut les impacts du projet. C'est donc de cette manière que le développement économique l'analyse jette un filet plus large qu'une évaluation financière.

Lorsque nous examinons le résultat d'une analyse de faisabilité, nous examinons les indicateurs clés pour juger de la mérite du projet. Ce qui devrait être inclus dans les métriques clés dépend du type de projet, stratégie de financement et structure juridique. Les mesures les plus courantes incluent la valeur actuelle nette (VAN), taux de rendement interne (TRI), marge du développeur et rendement des capitaux propres, le VAN est calculé par l'équation suivante :

$$VAN(n) = \sum_{i=1}^n \frac{A}{(1+r)^i} - C \quad (31)$$

Dans cette étude, la méthode TRI a été utilisée comme indicateur économique pour comparer la faisabilité d'établir une usine de dessalement SWRO d'une capacité de 600 m<sup>3</sup>/jour avec les meilleures sources d'énergie.

### **3.1. Utilisation de la méthode du taux de rendement interne (TRI) :**

Le taux de rendement interne (TRI) est le taux de rendement promis par un projet d'investissement sur sa vie utile. C'est un temps simplement appelé rendement sur projet. Le taux de rendement interne est calculé en recherchant le taux d'actualisation qui équivaut à la valeur actuelle de flux de trésorerie d'un projet avec la valeur actuelle de ses rentrées de fonds. En d'autres termes, Le taux de rendement interne est ce taux d'actualisation qui entraînera la valeur actuelle nette d'un projet pour être égal à zéro.

#### **Calcul du taux de rendement interne**

Cette méthode fait référence au taux de rendement en pourcentage implicite dans les flux d'avantages et coûts des projets A. La marge définit le taux de rendement interne IRR «comme le taux d'actualisation auquel la valeur actuelle du rendement moins les coûts est égale à zéro ». En d'autres termes, la réduction taux qui équivaut à la valeur actuelle du projet avec zéro, est connu comme TRI.

Ainsi, le TRI est le taux actualisé qui assimile la valeur actuelle des entrées de trésorerie à la valeur actuelle des sorties de fonds. Le TRI repose également sur une technique de remise telle que Net Méthode actuelle de la valeur actualisée nette. Selon cette technique, les rentrées de fonds futures sont actualisés de telle sorte que leur valeur actuelle totale soit juste égale à la valeur actuelle des sorties de fonds totales. Il est supposé que la direction a une connaissance du temps calendrier de réalisation des flux de trésorerie futurs mais pas du taux d'actualisation. TRI peut être mesurée comme [24]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(1 + TRI)^i} - C = 0 \quad (32)$$

Où,  $A_i$  sont les entrées de trésorerie à la fin de chaque année. Et le taux de rendement est calculé comme suit :

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(1 + TRI)^i} \quad (33)$$

Où correspond à la sortie de fonds ou à l'investissement initial en capital,  $A_i$  à l'entrée de fonds à la fin de chaque année,  $r$  est le taux de rendement de l'investissement.

### 3.2. Coût d'investissement de l'usine de dessalement SWRO

Le coût est un facteur majeur dans la mise en œuvre des technologies de dessalement. Cette section fournit des éléments de coût de dessalement qui font partie des coûts directs, indirects et d'exploitation.

#### Facteurs influant sur les coûts de dessalement

Le coût unitaire du produit est affecté par plusieurs facteurs de conception, d'exploitation et de maintenance, qui comprend les éléments suivants:

- **Qualité et salinité de l'eau d'alimentation:** La qualité de l'eau d'alimentation est un facteur essentiel. La salinité alimentaire inférieure permet des taux de production plus élevés. En conséquence, la plante fonctionne avec une consommation d'énergie spécifique plus faible et un dosage de l'agent antitartre produits chimiques. En outre, les temps d'arrêt liés à la mise à l'échelle chimique sont réduits.

- Capacité de l'usine: les usines de grande capacité nécessitent un coût en capital élevé par rapport à installations de capacité. Cependant, le coût de production unitaire pour les installations de grande capacité peut être inférieur.
- Conditions du site: L'installation de nouvelles unités sur le site existant réduirait les coûts associés à des installations de prise d'eau d'alimentation, d'élimination de la saumure et d'eau d'alimentation et le prétraitement.
- Main-d'œuvre qualifiée: il en résulterait la disponibilité d'opérateurs et d'ingénieurs qualifiés dans la capacité de production de l'usine plus élevée.
- Coût de l'énergie: le type d'énergie utilisé sur le site de l'usine a un impact important sur l'unité coût du produit.
- Durée de vie de la centrale: L'augmentation de la durée de vie de la centrale réduit le coût du produit de capital.
- Exigences réglementaires: Ces coûts sont associés aux permis locaux et exigences réglementaires.

### **Eléments de calcul économique**

Le calcul du coût unitaire des produits dépend de la capacité de l'usine, des caractéristiques du site et caractéristiques de conception. La capacité de l'usine spécifie les dimensions de divers équipements de traitement, de pompage unités et zone membranaire. Les caractéristiques du site ont un effet important sur le type d'équipements de prétraitement et de post-traitement, et taux de consommation de produits chimiques. Dans En outre, les caractéristiques de conception du processus affectent la consommation d'énergie électrique et produits chimiques.

Les coûts de mise en œuvre des installations de dessalement peuvent être classés en coûts d'investissement coûts) et les coûts d'exploitation et de maintenance.

### **Coûts en capital**

Les coûts en capital comprennent les coûts directs et indirects. Le coût en capital indirect est généralement estimé en pourcentage du coût total en capital direct. Les coûts indirects peuvent inclure l'assurance, les frais généraux de construction, les frais du propriétaire et les frais d'urgence. Ci-dessous est un description des divers coûts directs et indirects associés à la construction d'un usine de dessalement.

### **Coût en capital direct**

Le coût en capital direct couvre le coût d'achat de divers types d'équipements, auxiliaires équipement, coût du terrain, construction et bâtiments. Brève description pour divers coûts articles est montré ci-dessous:

1- Coût du terrain

2- Puits d'approvisionnement

3- Equipement de traitement.

4- Système d'énergie

C'est l'un des éléments les plus coûteux et cela dépend du type de processus et de la capacité.

Article inclus dans cette catégorie sont énumérés ci-dessous:

- Instrumentation et contrôles
- Pipelines et vannes
- câblage électrique
- Pompes
- Systèmes de nettoyage de processus
- Matériel de pré et post traitement
- Ligne de prise d'eau de mer et de décharge de saumure
- équipement de chloration.

5- Equipement auxiliaire

L'équipement auxiliaire suivant est inclus:

- tuyauterie de transmission,
- réservoirs de stockage,
- générateurs et transformateurs,
- des pompes
- Pipelines et vannes.

6- Coût de construction

Le coût de construction dépend du type de bâtiment. Les bâtiments comprennent:

- Salle de contrôle,
- laboratoire
- Des bureaux.

7- Coût de la membrane

Le coût des modules à membrane dépend de leur taille. Coût de l'usine de dessalement SWRO Membranes est de 600000 DA / module.

### • Coût en capital indirect

Les éléments de coûts indirects sont exprimés en pourcentage du coût en capital direct comme suit:

- 1- Assurance: Ce coût est égal à 5% du total des coûts directs.
- 2- Frais généraux de construction: Ce coût est égal à 15% du matériel direct
- 3- coût de la main d'œuvre.
- 4- Frais du propriétaire.
- 5- Coût d'urgence

### Frais d'exploitation

Les postes de coûts d'exploitation comprennent la main-d'œuvre, l'énergie, les produits chimiques, les pièces de rechange et les produits divers.

Vous trouverez ci-dessous une brève description de chaque élément et des coûts actuels estimés:

- 1- Energie: La consommation moyenne est de 55.62 kW / h.
- 2- Main d'œuvre: Le personnel de l'usine de dessalement SWRO et leurs salaires
- 3- Remplacement de la membrane: le taux de remplacement peut varier entre 5% et 20% par an.
- 4- Maintenance et pièces de rechange: Une valeur inférieure à 3% du coût total en capital annuel.
- 5- produits chimiques

Les produits chimiques utilisés dans le traitement et le nettoyage des aliments pour animaux comprennent l'acide chlorhydrique,

Soude caustique, anticalcaire, bisulfite de sodium, chlorure ferrique et chlore. Coût de Ces articles pourraient être affectés par la situation politique dans la bande d'Algérie.

**Tableau (II.1):** Estimations du coût des produits chimiques et des taux de dosage

Le produit chimique(concentration)	Le prix/ton(DA)
Hydrochlorid acid(33%)	807000
Caustic soda(50%)	941500
antiscaiant(100%)	3766000
chlorine(10%)	739750

sodiumbisulfite(100%)	672500
Ferric chloride(100%)	807000

Tableau (III.2): Estimation du coût du SWDP [23].

	Cost
Energie	18%
Operations&maintenances	11.6%
Produits chimiques	8.1%
Staff	10.3%

Le cout annuel de l'usine SWRO avec une durée en série (durée de vie) est le suivant 20 ans. Les coûts d'investissement ont été calculés comme ils sont présentés à Figure. II.2. Certains coûts sont les mêmes dans différents scénarios tels que les coûts d'établissement et les coûts fonciers. Mais les bénéfices du projet ont été estimés sur la base du prix de vente et de l'unité de production de l'installation

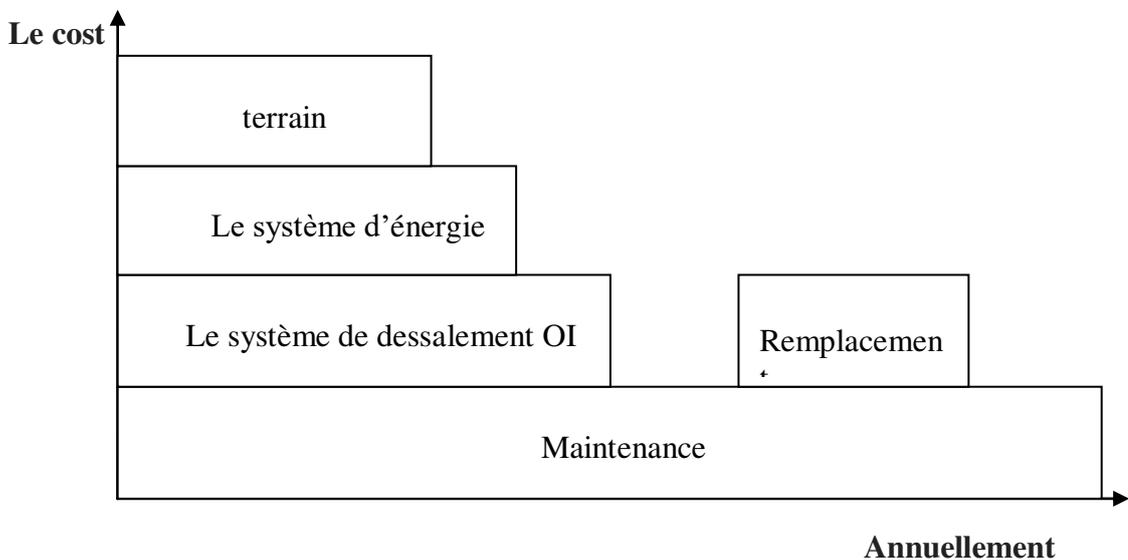


Figure. II.2. l'augmentation des couts au cours des années

Les performances économique des différents systèmes de réseaux connectés au réseau L'usine PV-RO a été évaluée sur la base du coût standardisé de l'eau (LCOW, en DA / m<sup>3</sup>) à divers endroits aux eaux. Le LCOW a été calculé en utilisant l'équation

$$lcow = \frac{(I \times C_r) + C_{ROO\&m}}{Q_D} \quad (34)$$

**Lcow** est le cout de production d'eau (DA/m<sup>3</sup>)

$C_r$  est calculé par

$$C_r = \frac{r \times (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (35)$$

$r$  est le taux de dévalorisation de la money

$n$  est la durée de vie du projet

## CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE

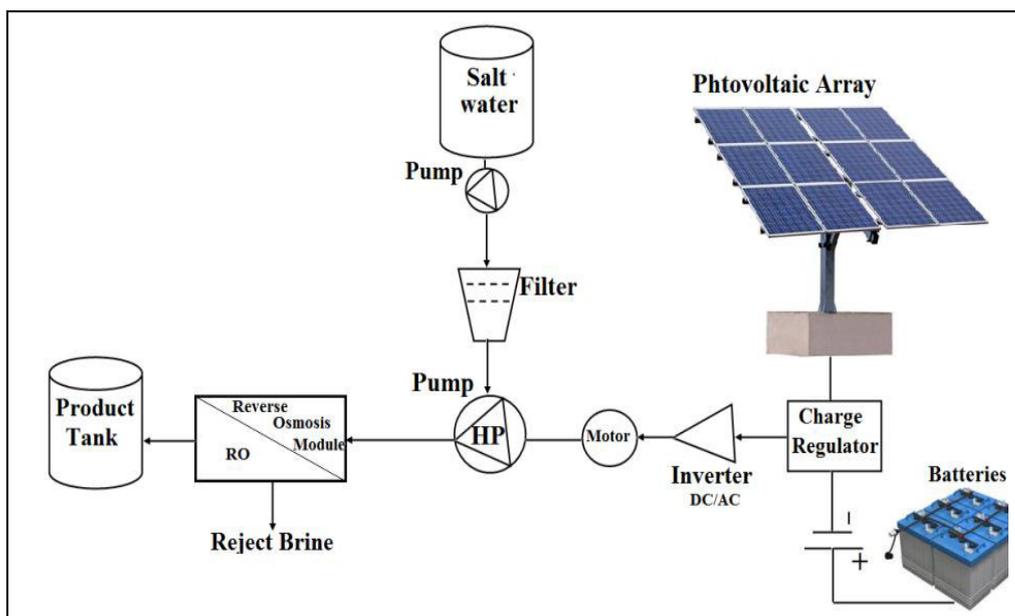
### 1. Introduction

Le développement de procédé de dessalement solaire par osmose inverse en vue de son implémentation dans différents région de l'Algérie passe une étude expérimentale fine pour valider les solutions proposées dans la phase de recherche & développement et par la suite améliorer sa conception et son fonctionnement.

C'est dans ce but que nous allons procéder à une étude expérimentale sur le prototype de dessalement de l'Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES/CDER de Bou Ismail fonctionnant en énergie solaire photovoltaïque depuis l'année 2015.

### 2. Présentation du banc d'essai de dessalement solaire par osmose inverse

L'équipe de recherche de Dessalement et Distillation des eaux Saumâtres et de Mer de l'UDES a procédé au montage d'un prototype de dessalement d'osmose inverse de faible capacité dans une première étape. La seconde étape a été consacrée à l'aspect énergétique du fait que l'osmose inverse est un procédé énergivore, un champ solaire photovoltaïque de 3 kW et un bac de batteries ont été installés sur le toit pour satisfaire les besoins en énergie électrique du prototype durant les 24 h de la journée. Le schéma global de ce prototype est présenté sur la figure(III.1)



**Figure.III.1.**Schéma de principe du prototype d'osmose inverse de l'UDES alimenté par PV

Les différentes caractéristiques de fonctionnement du prototype sont illustrées sur le tableau 1. Le pilote dispose d'une membrane spiralée (1000 PSI (70bar) Feuille de Membrane Résistante FRP) placée dans un carter. Les caractéristiques de la membrane utilisée dans notre travail sont présentées dans le tableau 2. La conservation de cette membrane a été assurée par l'utilisation d'une solution de méta bisulfite de sodium.

Tableau .III.1. : Les caractéristiques techniques du pilote d'osmose inverse de l'UDES

Données technique		DESIGN	
<b>Flux du permeat</b>	180 l/h	TDS	<35000 ppm
<b>Operating pressure</b>	55 bars	La temperature nominal	18 ° C
<b>Raw water consumption</b>	1651/h	Inlet pressure of Need	At least 3 bar
<b>Raw water pressure</b>	3-5 bars	Operating pressure requirement	67 bar max
<b>Rejection</b>	99%	Flow	16 L / m <sup>2</sup> / h
<b>Current</b>	230V/50 Hz	SDI	<3
<b>Power installed</b>	3 kW/500 A	Iron	<0.01mg / lt
<b>Dimensions</b>	H*W*D=179*90*44 cm <sup>3</sup>	Silica	<20

Le système d'osmose inverse étudié est caractérisé par :

1. Rinçage et démarrage automatique
2. Ecran LCD
3. Toutes les alarmes sont automatisées
4. Indicateurs de l'état du système sur le panneau automatisé (arrêt, danger)

### 3. Déroulement de l'étude expérimentale

Il est à rappeler que le fonctionnement de l'osmoseur se résume comme suit : l'eau d'alimentation contenue dans le récipient est refoulée, grâce à une pompe de gavage, vers un filtre cartouche, puis vers la pompe haute pression (HP) dont le but est de fournir la pression transmembranaire nécessaire. L'eau d'alimentation, en traversant la membrane, est divisée en deux flux : perméat et retentât. Deux débitmètres sont situés à la sortie de chaque flux. Les deux flux retournent au récipient d'alimentation pour maintenir constante la concentration de la solution d'alimentation tout le long de l'expérience.

Une série d'expériences a été menée dans le but de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires (à savoir la pression d'attaque, la concentration, la température et le débit du perméat) sur les performances de notre système de dessalement solaire par osmose inverse.

#### 3.1. L'effet de la pression sur la consommation énergétique

En absence de récupération, l'énergie dépensée en osmose inverse correspond essentiellement à celle consommée par les pompes de l'installation. Dans notre expérience, l'énergie totale consommée par le système, déterminée par un wattmètre, est notée à la fin de chaque expérience, et notée sur la figure (II.2). Dans cette figure, on remarque clairement que l'énergie consommée par l'osmoseur (la pompe haute pression) est proportionnelle à la pression d'attaque, et la différence entre l'allure théorique et expérimentale peut être justifiée par les hypothèses prises en compte par le modèle théorique. Les résultats sont donnés par **Figure .II.2.**

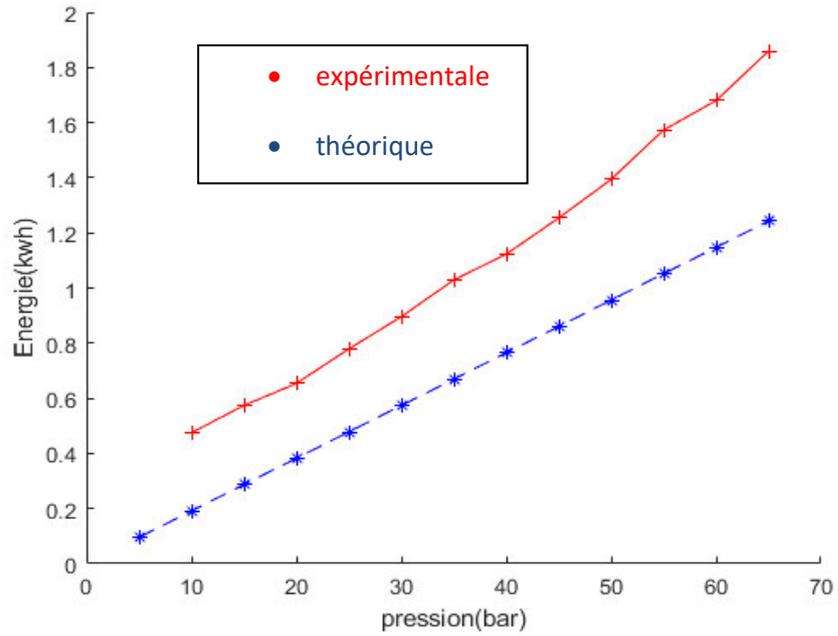
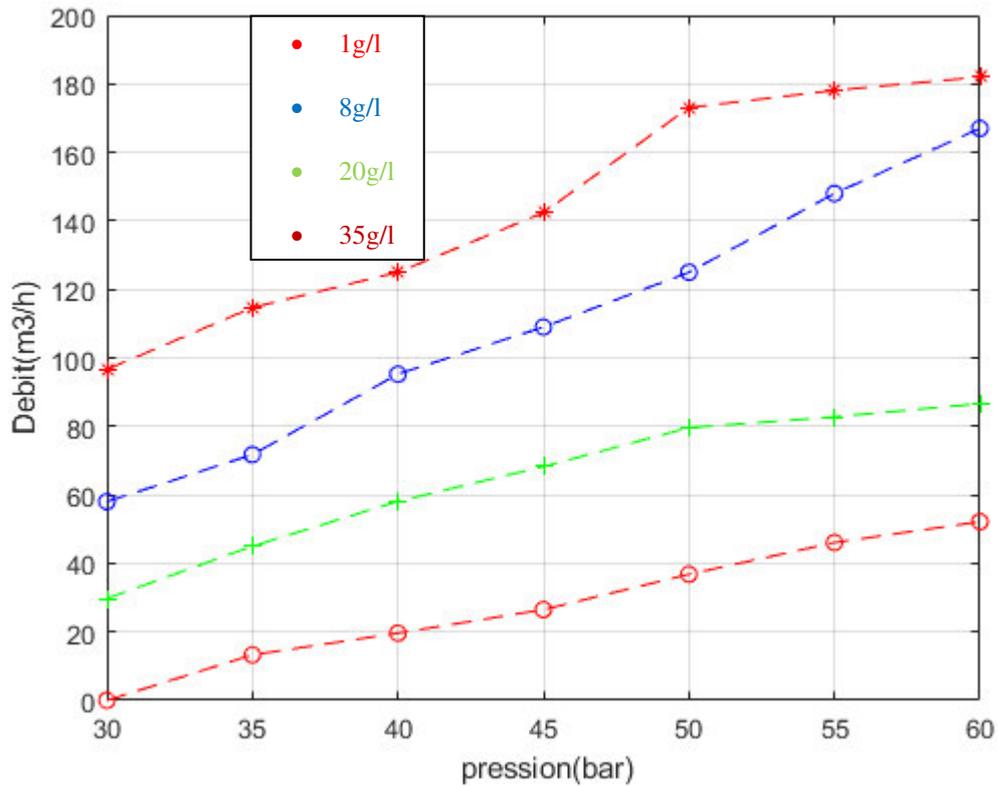


Figure .III.2.. La consommation d'énergie en fonction la pression

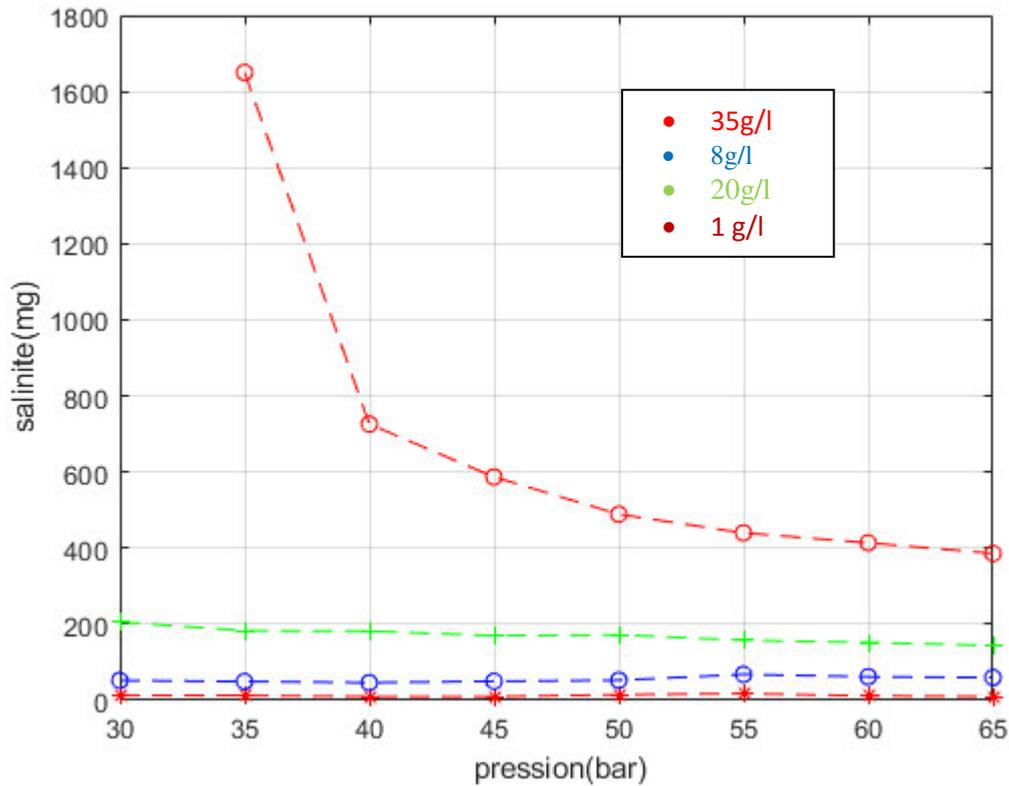
### 3.2. L'effet de la concentration d'alimentation sur le débit du perméat :

Dans le but de mettre en évidence l'effet de la concentration sur la densité de flux de perméat, plusieurs concentrations ont été choisies pour alimenter le module d'osmose inverse. Les valeurs du débit volumique du perméat  $Q_p$  obtenues sont représentées sur la figure (II.5) en fonction de la pression.



**Figure .III.3.** Débit du perméat en fonction de la pression pou différentes salinités

Il est évident, d'après ces résultats, que la densité de flux de perméat diminue de façon remarquable lorsque la concentration de la solution d'alimentation augmente. L'augmentation de la concentration d'alimentation engendre, en effet, une augmentation de la pression osmotique ce qui correspond à une contre pression osmotique provoquant une diminution de la pression efficace. A une pression transmembranaire constante, le flux diminue . Les résultats sont donnés par **Figure (III.4)**

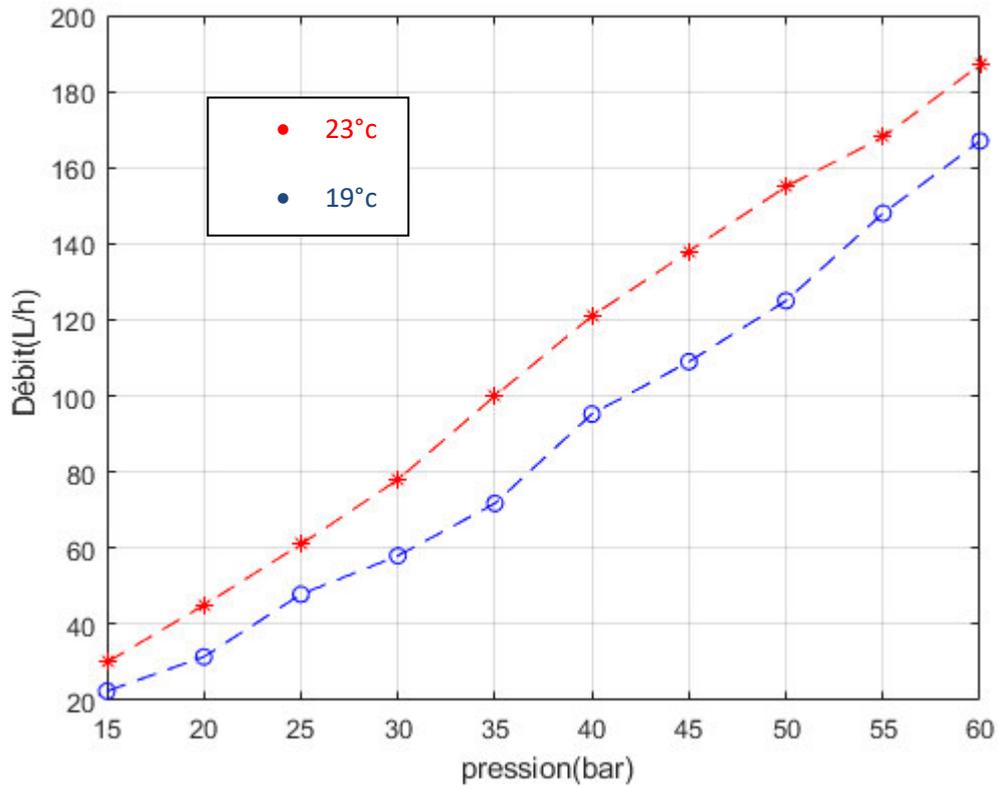


**Figure .III.4.** Salinité du perméat en fonction de la pression pou différentes salinités

Concernant l'effet de la concentration d'alimentation sur la qualité du perméat produit, **la figure.III.4.** montrent une augmentation de la salinité du perméat. lorsque la concentration de l'alimentation a doublé. Cette diminution de la sélectivité de la membrane peut être expliquée du faite que l'augmentation de concentration engendre une diminution de la pression efficace donc de la densité de flux de perméat. Ainsi, ce dernier se trouve moins dilué, ce qui peut conduire à une augmentation de sa concentration.

### 3.3. Effet de la température sur le débit du perméat et sa qualité

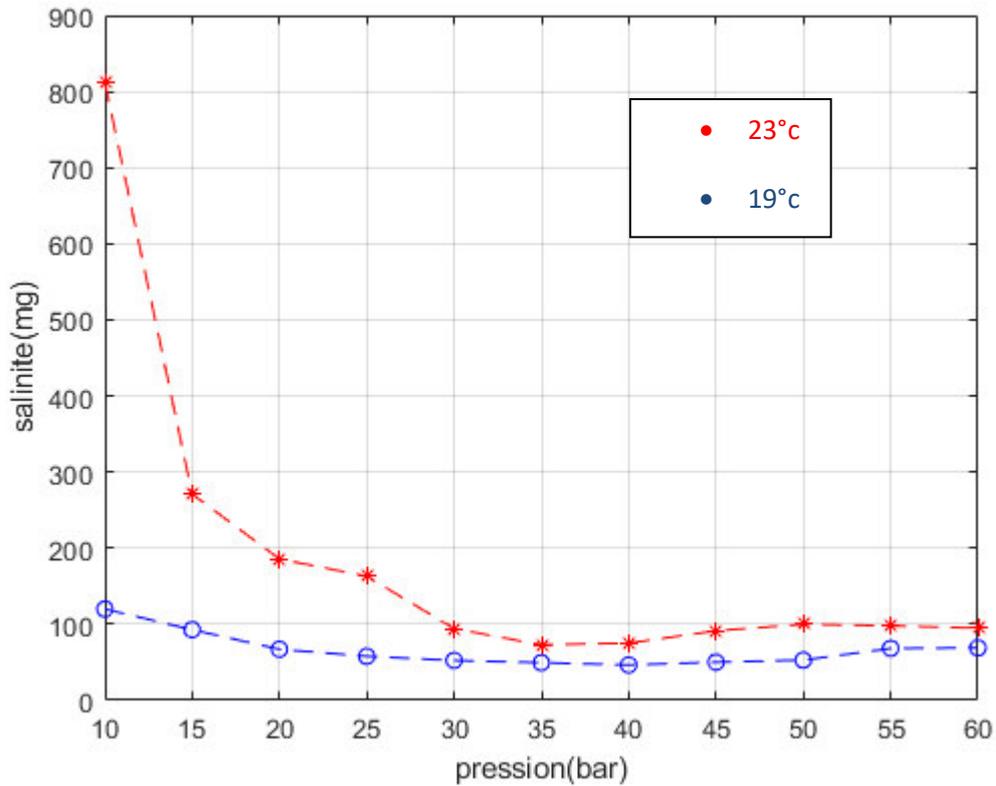
Les densités du flux de perméat ont pu être calculées à différentes températures conformément aux conditions opératoires fixées. Les résultats sont donnés par **Figure .II.5.**



**Figure .III.5.** Débit du perméat en fonction de la pression pour différentes températures

Les valeurs obtenues et illustrées par la figure précédente montrent bien que le flux de perméat augmente avec la température. Cette augmentation du flux de perméat est liée à l'augmentation de la perméabilité au solvant de la membrane avec la température

Quant à l'effet de la température sur la qualité du perméat, nous avons suivi l'évolution de la sélectivité de la membrane en fonction de la température. Les valeurs du facteur de séparation (taux de rétention), aux différentes températures enregistrées, sont données par **Figure (II.6)**



**Figure .III.6..** Salinité du perméat en fonction de la pression pour différentes températures

Ces résultats montrent que le facteur de séparation évolue d'une manière inversement proportionnelle à la température, pour toutes les expériences réalisées sur l'unité pilote d'OI. En effet, la sélectivité de la membrane semble diminuer lorsque la température augmente.

La diminution de la sélectivité de la membrane traduit une augmentation de la conductivité du perméat donc un passage de solutés à travers la membrane. En effet, la diffusivité aussi bien de l'eau que des solutés augmente avec la température.

### **Conclusion :**

Cette étude expérimentale, bien que limitée dans le temps, nous a permis de réaliser certains objectifs concernant l'évaluation de l'influence des paramètres opératoires (pression, température, concentration et débit) sur les performances du procédé de dessalement par osmose inverse, en particulier la densité de flux de perméat, sa qualité et la sélectivité de la membrane.

La perméabilité au solvant de la membrane a été déterminée, son évolution en fonction de la température a été tracée. La température semble avoir une influence positive sur la perméabilité au solvant de la membrane. Cette dernière augmente, en effet, avec la température, vue essentiellement que la viscosité de l'eau, une fois chauffée, diminue.

La pression d'attaque et la température semblent avoir aussi une influence notable sur la densité du flux de perméat. Alors que la sélectivité de la membrane semble s'améliorer si on travaille avec des pressions d'attaques de plus en plus élevées car le perméat se trouve de plus en plus dilué, la température semble diminuer le taux de rétention de la membrane. En effet, l'augmentation de la température entraîne une augmentation du coefficient de diffusion de NaCl à travers la membrane comme elle entraîne une augmentation des volumes des pores de la membrane laissant aussi diffuser les molécules de NaCl.

La concentration de la solution d'alimentation semble avoir une influence négative aussi bien sur la densité du flux de perméat que sur sa qualité. En effet, travailler avec des concentrations élevées engendre une contre pression osmotique provoquant une diminution de la pression efficace. Sans augmentation de pression transmembranaire pour la contrer, le flux diminue. De plus, la diminution de la densité de flux de perméat engendre une augmentation de la concentration dans le perméat, donc une diminution du taux de rétention de la membrane.

La détermination des conditions optimales de fonctionnement du pilote d'osmose inverse doit se baser aussi, en plus de la quantité et qualité du perméat produit et de la sélectivité de la membrane, sur la consommation énergétique du procédé. C'est pour cette raison que nous avons introduit dans cette étude la densité de flux spécifique et l'indice de

performance spécifique  $Y_{sp}$ . Le but est de déterminer les conditions de fonctionnement optimales permettant d'avoir la plus grande production de perméat par KWh (L/KWh).

Finalelement cette étude reste préliminaire. En effet, la densité de flux de perméat, sa qualité ainsi que la sélectivité de la membrane ne dépendent pas seulement des principaux paramètres opératoires déjà cités, d'autres mécanismes et interactions plus compliqués y interviennent. Par exemple, les propriétés physiques de la membrane comme le nombre de pores, leur forme ainsi que la rugosité de la surface, jouent un grand rôle dans la rétention des solutés et la production de perméat. Les interactions électrostatiques entre solutés et entre membrane et solutés ainsi que le pH participent de manière importante au mécanisme de rétention.

## **CHAPITRE 4**

### **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

#### **1. Introduction**

Tout d'abord, il est à rappeler que l'énergie solaire est une ressource inépuisable et gratuite, tandis que les équipements servant à collecter et convertir cette ressource en énergie utile aient un coût très élevés. Les systèmes solaires sont généralement caractérisés par des coûts d'investissement importants et des coûts de fonctionnement relativement faibles. L'analyse économique de l'utilisation de l'énergie solaire pour différentes applications se pose comme un aspect très important dans le but de choisir la technologie appropriée qui peut satisfaire la demande énergétique avec un coût faible. Certaines difficultés rencontrées lors de l'étude économique sont causées, d'un coté, par la comparaison entre le coût de l'investissement initial et les futurs couts de fonctionnement et d'autre coté par le rassemblement d'un nombre suffisant de données économiques du système étudié.

#### **2. Présentation de l'approche utilisée**

Il existe plusieurs méthodes et approches pour procéder de l'analyse économique des systèmes solaires, chaque méthode a ses propres avantages, inconvénients et limitations. A noter aussi que chaque méthode a ses conditions spécifiques qui doivent être satisfaites. Certaines méthodes peuvent donner des résultats différents pour des conditions différentes.

Quant à notre étude, nous avons pris en compte trois scenarios de l'alimentation de notre prototype par l'énergie électrique requise pour son fonctionnement. La capacité de dessalement s'élève à  $600 \text{ m}^3/\text{J}$ .

**Scénario 1 :** Alimentation par le réseau électrique conventionnel

**Scénario 2 :** Alimentation par un champ solaire photovoltaïque et batteries pour le stockage ( off grid)

**Scénario 3 :** Alimentation par Energie solaire injectée au réseau électrique conventionnel ( on grid)

Pour chaque scenario mentionné ci-dessus, on procède à déterminer les indicateurs et paramètres mentionnés en détail dans le chapitre 2 (Mise en Equation).

**3. résultats de l'étude**

**3.1. Scénario 1**

La figure (IV.1) représente le premier scénario de l'usine proposée, qui dépend des conditions locales du réseau électrique. L'énergie requise par l'usine de dessalement est de 2944 kwh/jour, alors que Le prix commercial d'un kilowatt d'électricité est estimé à 10.5 DA / kWh. L'estimation des autres coûts ont été effectués en faisant référence aux Autorités algérienne de l'énergie et Myah Tipaza , UNITE DE DEVELEPPMENT DES EQUIPEMENTS SOLAIRES (UDES). Le tableau (IV.1) montre ces estimations. Pendant ce temps, les bénéfices du projet ont été estimés sur la base du prix de vente et unité de production de l'usine (DA par mètre cube d'eau dessalée) comme suit :

$$80 \text{ DA} / \text{m}^3 * 600 \text{ m}^3 / \text{jour} * 365 \text{ jours} = 17532556 \text{ DA} / \text{an}.$$

Tableau. IV.1. simulation du premier scenario

Le taux de récupération	65%
Le débit d'une seule membrane/heure	0.1800 m <sup>3</sup> /h
La pression d'attaque	58 bar
Le taux de rétention	98.59%
L'énergie spécifique	3.3562 kwh/m <sup>3</sup>
Le gain d'énergie gagne	46%
Le débit journalier	600.48 m <sup>3</sup>
L'énergie nécessaire	1324 kwh

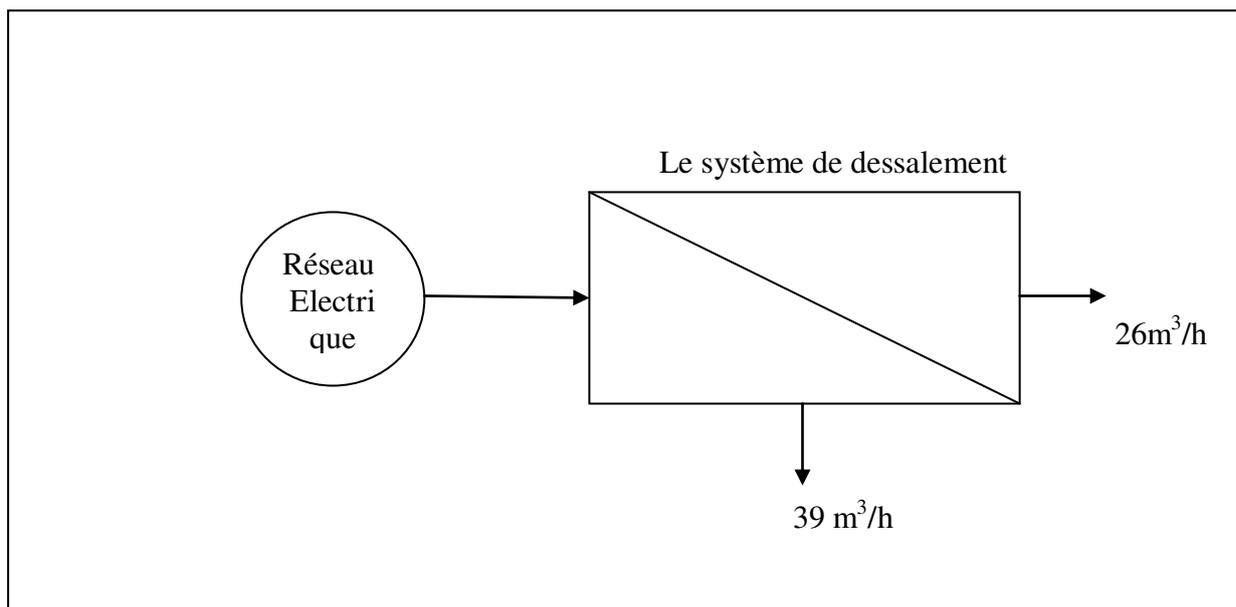


Figure. IV.1. schéma d'un système de dessalement raccordé au réseau

Tableau. IV.2. représentation des détails des frais(raccordé au réseau)

Types	L'élément	Les unités	Coûts annuel	Détails
Fixe	Système de dessalement	DA	65000000	Le système oi, stockage, distribution...
	Terrain	m <sup>2</sup>	0	7000
Variable	Energies	kWh	5078062.5	
	Operations et maintenances	DA	4611061.5	Produits chimiques, opérations et maintenances
	Remplacement	DA	410000	Pompes et membranes

Pour estimer la valeur de TRI du projet le taux d'actualisation appropriée devrait être déterminée par la valeur actuelle nette (VAN) pour évaluer correctement les flux de trésorerie futurs, ce seront des gains ou des obligations .le tableau (IV.3) montre les détails :

Tableau. IV.3.représentation des frais et les revenus totaux du projet

Années	1	2	..	11	12	...	20
Capital	65000000	0		0	0		0
Frais /an	10099124	10099124		10099124	10099124		10099124
Revenus	17532556	17532556		17532556	17532556		17532556
Van	-57566568	-50609000		-167580	4178600		35070000

Tableau. IV.4. les paramètres économique du projet(raccordé au réseau)

TRI	11.43%
PRIX DU m <sup>3</sup>	69.87
L'année de retour d'investissement	12 <sup>eme</sup>

L'analyse précédente montre que la valeur de TRI du projet est égale a 11.43%

La valeur de tri du projet est supérieure au taux d'intérêt en Algérie, qui est égal a 2.5%.alors la valeur est réalisable du point de vue des investisseurs.

### 3.2. Scénario 2 (Off Grid)

La figure (IV.2), représente le deuxième scénario de la centrale proposée, qui dépend de système d'énergie solaire uniquement connu sous le nom de (système hors réseau).

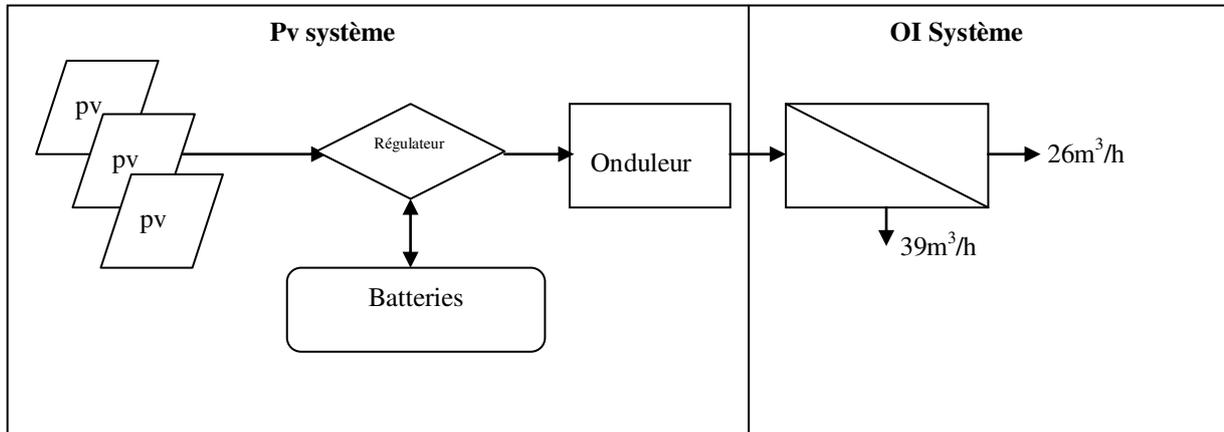


Figure. IV.2. la représentation du schéma du deuxième scénario qui dépend d'un système D'énergie solaire (système hors réseau)

Les systèmes hors réseau ne sont pas connectés au réseau électrique. La sortie du système hors réseau dépend entièrement de l'intensité du soleil. Plus l'exposition au soleil est intense, plus le rendement est important.

Tableau. IV.5. simulation du deuxième scénario

Le taux de récupération	65%
Le débit d'une seule membrane/heure	0.1800 m³/h
La pression d'attaque	58 bar
Le taux de rétention	98.59%
L'énergie spécifique	3.3562 kwh/m³
Le gain d'énergie gagne	46%
Le débit journalier	600.48 m³
L'énergie nécessaire	1324 kwh
La puissance d'un seul panneau	0.1017kw
L'énergie journalière d'un seul panneau	0.8136 kw
L'énergie journalière nécessaire	1.33 MWh
Nombre de panneaux	3702
La surface nécessaire	4000 m²
La capacité totale	399 kha
La capacité d'une seule batterie	250Ah
Nombre de batteries nécessaire	1593
Batterie en séries	4
Batteries en parallèles	399

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

Panneaux en séries	4
Panneaux en parallèles	2056

Tableau. IV.6.représentation des détails des frais(off grid)

types	L'élément	Les unités	Sommes	Détails
fixe	Système de dessalement	DA	65000000	Le système OI, stockage, distribution...
	Terrain	m <sup>2</sup>	Prix symbolique	16000 m <sup>2</sup>
variable	Energies	kWh	4955072.5	Le cout annuel estime
	Operations et maintenances	DA	4611061.5	Produits chimiques, opérations et maintenances
	Remplacement	DA	410000	Pompes et membranes

Tableau. IV.7. représentation des frais et les revenus totaux du projet(off grid)

années	1	2	...	10	11	...	20
capital	65000000	0		0	0		0
Frais /an	9976134	9976134		9976134	9976134		9976134
revenus	17532556	17532556		17532556	17532556		17532556
Van	-57443578	-50247000		-3733900	905110		36726000

Tableau. IV.8. les paramètres économique du projet(off grid)

TRI	11.72%
PRIX DU m <sup>3</sup>	69.31
L'année de retour d'investissement	11 <sup>eme</sup>

L'analyse précédente montre que le TRI du projet est égale a 11.72%

La valeur de TRI du projet est supérieure au taux d'intérêt en Algérie, qui est égal a 2.5%.alors la valeur est réalisable du point de vue des investisseurs

3.3. Scénario 3 (Système on grid)

La figure (IV.3) représente le troisième scénario de la centrale proposée, qui dépend de l'énergie solaire et le réseau électrique (système ON Grid).

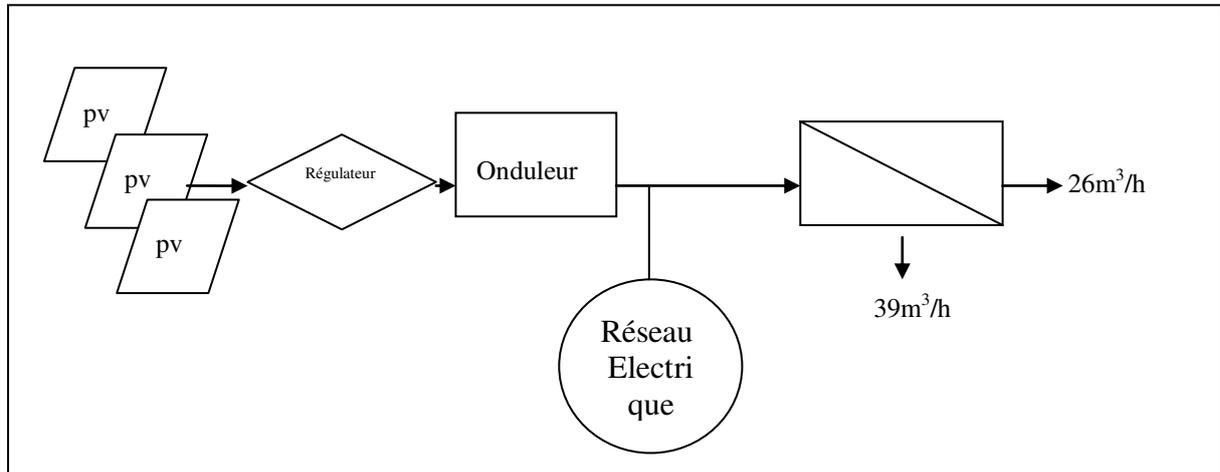


Figure. IV.3.représentation du schéma d'un troisième scenario dépend du système on grid

Le principal avantage de ce type de système est sa capacité à équilibrer le système, Les exigences de production et de puissance de l'usine. Lorsqu'un système interconnecté à une grille produit plus de puissance que l'usine consomme, l'excédent peut être revendu au service public dans une pratique connue sous le nom de facturation nette. Lorsque le système ne produit pas assez de puissance, la centrale peut tirer son énergie du réseau de distribution.

Tableau. IV.9.simulation du troisième scenario

Le taux de récupération	65%
Le débit d'une seule membrane/heure	0.1800 m <sup>3</sup> /h
La pression d'attaque	58 bar
Le taux de rétention	98.59%
L'énergie spécifique	3.3562 kwh/m <sup>3</sup>
Le gain d'énergie gagne	46%
Le débit journalier	600.48 m <sup>3</sup>
L'énergie nécessaire	1324 kwh
La puissance d'un seul panneau	0.1017kw
L'énergie journalière d'un seul panneau	0.8136 kw
L'énergie journalière nécessaire retire du réseau électrique	0.883 MWh

## Chapitre 4 : Résultats et discussions

L'énergie journalière nécessaire fournis par le champ photovoltaïque	0.442 MWh
Nombre de panneaux	1234
La surface nécessaire	1294m <sup>2</sup>
Panneaux en séries	4
Panneaux en parallèles	309

Tableau. IV.10. représentation des détails des frais(on grid)

types	L'élément	Les unités	Sommes	Détails
fixe	Système de dessalement	DA	65000000	Le système OI, stockage, distribution...
	Terrain	m <sup>2</sup>	Prix symbolique	10000
variable	Energies	kWh	3382820	Le cout annuel estime (photovoltaïque+réseau électrique)
			1244278.5	
	Operations et maintenances	DA	4611061.5	Produits chimiques, opérations et maintenances
	Remplacement	DA	410000	Pompes et membranes

Tableau. IV.11. représentation des frais et les revenus totaux du projet

années	1	2	...	10	11	...	20
capital	65000000	0		0	0		0
Frais	9648160	9648160		9648160	9648160		9648160
revenus	17532556	17532556		17532556	17532556		17532556
van	-57115604	-49607000		-1074700	3765600		41141000

Tableau. IV.12.les paramètres économique du projet (on grid)

TRI	12.49%
PRIX DU m <sup>3</sup>	67.82
L'année de retour d'investissement	11 <sup>eme</sup> année

L'analyse précédente montre que le TRI du projet est égale a 12.49%

La valeur de TRI du projet est supérieure au taux d'intérêt en Algérie, qui est égal à 2.5%. alors la valeur est réalisable du point de vue des investisseurs

### 3.4. Récapitulation des résultats

Le coût de l'usine de dessalement SWRO (600 m<sup>3</sup>/ d) qui dépend du système combiné (Systeme On Grid ) en tant que source d'énergie est le coût le plus bas entre autres scénarios. C'est reflété positivement selon les indicateurs économiques. Tableau(IV.13) montre les détails de comparaison.

Tableau. IV.13.tableau récapitulatif des résultats des trois systèmes

	Réseau	Off grid	On grid
PRIX DU m <sup>3</sup> (DA)	69.87	69.31	67.82
TRI(%)	11.43	11.72	12.49
L'année de retour d'investissement	12	11	11
Totales Les revenus (DA)	35070000	36726000	41141000

Le troisième scénario a été choisi comme la meilleure option économique pour optimiser le coût de l'usine de dessalement à fouka . Cela dépend du système d'énergie solaire et de l'énergie électrique.connu sous le nom (ON Grid Solar System)

## Conclusion Générale

---

La détermination des conditions optimales de fonctionnement du pilote d'osmose inverse doit se baser aussi, en plus de la quantité et qualité du perméat produit et de la sélectivité de la membrane, sur la consommation énergétique du procédé. C'est pour cette raison que nous avons introduit dans cette étude la densité de flux spécifique et l'indice de performance spécifique .

Le but est de déterminer les conditions de fonctionnement optimales permettant d'avoir la plus grande production de perméat .

L'étude portait sur l'utilisation optimale de l'énergie solaire et la sélection des produits les plus utiles. Configuration économiquement réalisable d'utiliser cette source totalement ou partiellement dans le Processus SWRO. Le taux de rendement interne (TRI) a été utilisé comme indicateur économique pour analyser la faisabilité de la création d'une usine de dessalement SWRO d'une capacité de 600m<sup>3</sup>/ d à Fouka (algerie) en fonction des sources d'énergie optimales, Les options disponibles des sources d'énergie

l'usine de dessalement proposée étaient les suivants:

- 1- Système d'énergie électrique (service public d'électricité) ou EES
- 2- Système d'énergie solaire (système hors réseau) ou SES
- 3- Système énergétique combiné (sur réseau) ou CES

A la fin on remarque que le système on grid est le plus rentable des projets propose.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

[1] Val S. Frenkel. « Seawater Desalination: Trends and Technologies, Desalination » Trends and Technologies, Michael Schorr (Ed.), ISBN: 978-953-307- 311-8, 2011.

[2] Henri Boyé, « Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée », Aout 2008

[3] Alice Daussy, Maxime Guérin, Tries Guth, « dessalement de l'eau de mer à Malte et en Israël », université de technologie Compiègne, 2011

[4] katem fayrouz, Trad hayet « dessalement des eaux par distillation solaire avec stockage » umbb, 2014

[5] Eric Daini, « de l'eau salée à l'eau potable, analyse et synthèse de document scientifique, lycée Paul Cézanne.

[6] Chatkaew Tansakul, « Procédés hybrides à membranes pour le Prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse », thèse doctorat, 13 novembre 2009.

[7] Julie Mendret, « mise au point de caractérisation de membrane application à la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé », thèse doctorat, INSA Toulouse, novembre 2007.

[8] el Khabbaze hatim, « traitement des solutions modèles du lait par des membranes de nano filtration et d'osmose inverse », thèse doctorat, université Mohamed V, Rebat 07 février 2008.

[9] Hanane Dach, « comparaison des opérations de nano filtration et d'osmose inverse pour le dessalement sélectif des eaux saumâtres : de l'échelle du laboratoire au pilote industriel », thèse doctorat, université d'Angers, mai 2008.

[10] Alain maurel, « dessalement de l'eau de mer et des eaux de saumâtres : et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce », 2ème édition 2006.

[11] Marjorie Gavach, « Détoxification de condensats de distillerie par osmose inverse échange d'ions et leur combinaison Application au recyclage en fermentation alcoolique », thèse de doctorat, 27 mai 2010

[12] Camille Sagne, « étude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse », thèse doctorat, institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement Agro Paris Tech, 24 avril 2008.

[13] Jean Marc B, Catherine J, « Les procédés membranaires pour les traitements de l'eau », document technique, Ministère de l'agriculture de l'alimentation de la pêche et des affaires rurales direction de l'espèce rural et de la forêt Direction de l'Espace Rural et de la Forêt, France, Décembre 2002

[14] [www.lenntech.fr](http://www.lenntech.fr)

## Références bibliographiques

---

- [15] Desalination technologies and filtration processes, filmtec membrane, Tech Manual Excerpt, Form No. 609-02002-504. 76
- [16] [www.toray.com](http://www.toray.com)
- [17] Camille Sagne, « étude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse », thèse doctorat, institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement Agro Paris Tech, 24 avril 2008.
- [18] John Palmeri, Mehdi Metaiche, « dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres par osmose inverse et nanofiltration », MEDERC, février 2009
- [19] S Sablani, M F A Goosena, « Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review », Desalination 141 269-289 (2001).
- [20] Patrice BACCHIN, « principes de bases de la filtration membranaire », Université Paul Sabatier Laboratoire de génie Chimique de Toulouse,
- [21] Najah Wehebe, « dénitrification de l'eau potable en réacteur », thèse doctorat Université de Lyon, le 23 octobre 2008.
- [22] [www.enseeih.fr/entartrage](http://www.enseeih.fr/entartrage) et colmatage
- [23] Liu Wen-jun , F. Hui, J. Lédion & Wu Xing-wu, « The influence of metal ion on the scaling in the mineral water tests », Ionics, 14 (2008) 449–454
- [24] Mahdi Metaiche, « technologie membranaire, faculté des sciences appliqués ,université de bouira ,juin 2014
- [25] hadjali yassine, « Impact des stations de dessalement de l'Eau de mer sur le littoral cas de la Station Plage EL Hilel (AIN Témouchent) »these master ,université Abou Belkaid ,Tlemcen ,2012.
- [26] A.M.K. El-ghonemy, « waste energy recovery in seawater reverse osmosis desalination plants.part 1: Review », renewable and sustainable energy reviews 18 (2013) 6–22.
- [27] yousef mandari « Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide », thèse doctorat ,11decembre 2011.
- [28] ASSMA ADDA «ETUDE PRELIMINAIRE DE MODELISATION ET SIMULATION D'UNE STATION DE DESSALEMENT PAR PROCEDE D'OSMOSE INVERSE», these magister, avril 2015
- [29]R. EINAV and F. LOKIEC, «environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon»; desalination», 2003.
- [30]M. ARGYROU, «Impact of Desalination Plant on marine macrobenthos in the coastal waters of Dehkelia bay, Cyprus». Internal Report, 2000.

## Références bibliographiques

---

[31] C.M. FREIXA, «Benmarking International en matière de dessalement des eaux», revue HTE N°142, juin 2009

[32] Development of a logistic model for the design of autonomous desalination systems with renewable energy sources. Middle East Desalination Research Centre Report; February 2002.