

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master

Option : ingénierie thermique et solaire

Etude d'une installation de dessalement fonctionnant en énergie solaire

Présenté par :

EMZAINÉ Zakaria Dr. ABBAS Mohammed
AZZA Fethi

Encadré par :

Année universitaire 2014/2015



Remerciements

Au terme de ce Mémoire nous tenons à remercier tout naturellement en premier lieu **Dieu le tout Puissant** qui m'a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.

Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur **Dr ABBAS MOHAMED**, Directeur de division FTEER à UDES et Maître de Conférences à université Saad Dahlab de Blida, qu'il trouve ainsi l'expression de ma profonde reconnaissance pour sa compétence, ses encouragements et ses précieux conseils durant le déroulement de ce travail.

Mes sentiments vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

Au-delà des personnes, des lieux et des temps, je dédie ce travail avec ma profonde conviction, à tous ceux qui ont toujours cru et sans doute à la science cette lumière qui éclaire les esprits et leur permet de transcender les limites installées par les sociétés et les cultures dans leurs périodes de dégénérescence.

Je le dédie aussi :

A ceux qui savent concrétiser leurs idées et savent réussir.

A ceux qui ne portent que du bien pour les autres.

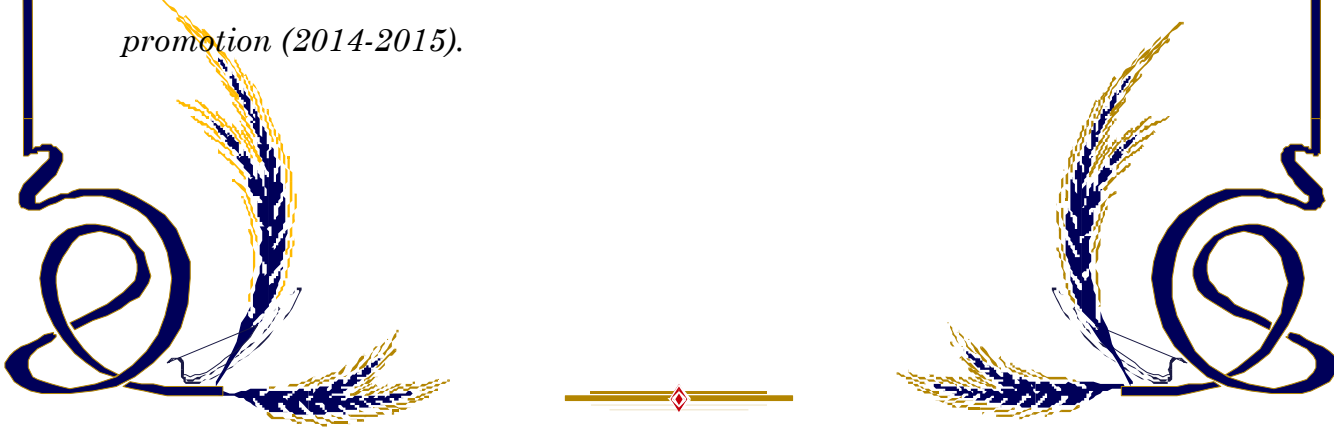
A ceux qui ne vivent que dans et par la vérité.

Sans oublier mes chers parents.

Mes frères et à mes soeurs.

Mes collègues et amis. Rabah, Khathir, Djalil, Raouf, IHCEN et bien sur mon binôme Fethi

Et tous les enseignants de Génie mécanique et étudiants de la promotion (2014-2015).



Sommaire

Remerciements.....	I
Didicas	II
Listes des tableaux	IV
Listes des figures	V
Résumé	VIII

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE DESSALEMENT

I.1 Définition.....	05
I.2 Les procédés de dessalement.....	05
I.2.1. Les procédés thermique de dessalement (distillations).....	06
I.2.1.1. La distillation multi flash : (MSF).....	06
I.2.1.2. La distillation à multiples effets : (MED).....	08
I.2.1.3. La distillation par compression de vapeur.....	09
I.2.2. Les procédés membranaires.....	09
I.2.2.1. L'électrodialyse.....	09
I.2.2.2. L'osmose inverse (L'OI).....	10
I.2.2.2.1. L'Histoire de l'osmose inverse.....	11
I.2.2.2.2.Principe de fonctionnement de l'osmose inverse.....	11
I.2.2.2.3.étapes et composant d'une station de dessalement par OI.....	12
A. La prise d'eau de mer.....	12
B. Les prétraitements.....	13
C. Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	13
C.1.Pompe haute pression.....	13
C.2.Système de récupération d'énergie.....	13
C.3.Modules d'Osmose Inverse.....	14
C.3.1.Les membrane.....	14
C.3.1.1.Modules tubulaires.....	14

C.3.1.2. Modules fibres creuses.....	16
C.3.1.3. Modules plant.....	18
C.3.1.4. Modules spirales.....	19
C.4. Types de membranes.....	24
C.5. Les caractéristiques des membranes.....	24
D. Récupération d'énergie.....	27
D.1. Différents système de récupération de l'énergie.....	29
D.1.1. Les turbopompes intégrées.....	29
D.1.2. Les turbines Pelton.....	30
D.1.3. Les systèmes dits « échangeur de pression ».....	31
E. Les stations de dessalement en Algérie.....	34
E.1. Etat des lieux.....	34

CHAPITRE 2 : MODELISATION DU SYSTEME OSMOSE INVERSE PHOTOVOLTAIQUE (OI/PV)

II.1. Introduction.....	39
II.2. Modalisation mathématique du système étudié.....	40
II.2.1. Hypothèses principales.....	40
II.2.2. Sous-modèle du rayonnement.....	40
II.2.3. Modèle du système photovoltaïque	42
II.2.4. Contrôle Électronique.....	44
II.3. Moteur.....	45
II.4. Pompe.....	46
II.5. Récupération d'énergie.....	46
II.5.1. Pompe de clarck.....	46
II.5.2. Les turbines Pelton.....	48
II.6. Membrane d'Osmose Inverse.....	49
II.6.1. Equations de transport.....	49

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1.Introduction.....	53
III.2.Méthodologie.....	53
III.2.1. Description de la station de dessalement référence.....	56
III.3.Résultats et discussion.....	57
III.3.1.Résultats du model d'éclairement.....	57
III.3.2. Résultats du model photovoltaïque.....	58
Conclusion générale.....	69

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : comparaison des différents modules d'osmose inverse.....	22
Tableau 1.2 : principales membranes d'osmose inverse Commercialisées.....	23
Tableau 1.3: consommations d'énergie en KWh/m ³ d'une unité de dessalement d'eau de mer par osmose inverse en l'absence de récupération d'énergie.....	26
Tableau 1.4 :avantages et inconvénients des différents types de pompes utilisées en osmose inverse.....	26
Tableau 1.5 : énergie consommée par le procédé d'osmose inverse avec récupération d'énergie pour le dessalement de l'eau de mer.....	28
Tableau 1.6 : Une comparaison globale des grands systèmes de récupération d'énergie.....	33
Tableau 1.7 : Les stations de dessalement en Algérie.....	37
Tableau 2.1 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.....	41
Tableau 3.1 : Caractéristiques de la station OI étudiée.....	56

LIST DES FIGURES

Figure 1.1 : Les différents procédés de dessalement.....	05
Figure 1.2 : Schéma du procédé de détentes successives (MSF).....	07
Figure1.3 : Schémas distillation à multiples effets.....	08
Figure 1.4 : La compression de vapeur.....	09
Figure 1.5: Schéma De Principe d'une électrodialyse.....	10
Figure1.6 : Principe de fonctionnement l'osmose.....	12
Figure1.7 : Schéma simplifié de la filière de dessalement par osmose inverse.....	12
Figure1.8 : schéma de principe.....	15
Figure1.9 : Module tubulaire SFEC/Rhône-Poulenc.....	16
Figure1.10 : Schéma de principe d'un module à fibres creuses.....	17
Figure1.11 :Module d'osmose inverse à fibres creuses de Dupont Nemours.....	17
Figure 1.12 : Module d'osmoses inverses plans.....	19
Figure 1.13 : Module spirale.....	21
Figure 1.14 : différents types de pompes utilisées en osmose inverse ...	27
Figure 1.15 : récupérations d'énergie par turbine.....	28
Figure 1.16 :Récupération d'énergie en osmose inverse par turbopompe TPMDX Gui nard.....	29
Figure 1.17 : La turbine Pelton.....	30
Figure 1.18 : récupérations d'énergie par système à pistons	31

Figure 1.19 : principes du système de récupération d'énergieDweer.....	32
Figure 1.20 : Evolution de la capacité installée de systèmes de dessalement en Algérie entre 2006 et 2014.....	36
Figure1.21 : Procédés des stations de dessalement en Algérie.....	38
Figure1.22 : Production d'eau dessalée en Algérie.....	38
Figure2.1 : Système d'osmose inverse photovoltaïque simple considéré dans évaluation.....	39
Figure 2.2: Système PV_RO de haut niveau. Le modèle de bloque le diagramme.....	40
Figure 2.3: Base Mécanique de pompe de Clarck.....	47
Figure 3.1 : Algorithme de l'éclairement.....	54
Figure 3.2 : Algorithme de système PV-OI.....	55
Figure 3.3: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site de Bousmail.....	57
Figure 3.4: Eclairement direct en fonction du temps pour le site deBousmail.....	58
Figure 3.5 :graphe caractéristique du panneau photovoltaïque étudié.....	58
Figure 3.6 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque en fonction De la tension.....	59

Figure 3.7 : La lumière cellulaire solaire produit le courant en fonctionne de temps.....	59
Figure 3.8:Graphe de la puissance de system PV en fonction du temps pour le site de Bousmail.....	60
Figure 3.9 : Moment de torsion exigé par une pompe en fonction de pression.....	61
Figure 3.10 : Le flux d'eau douce de la membrane en fonction de la pression.....	61
Figure 3.11 : Perte de pression dans la pompe en fonction de taux de récupération de la pompe de clarck.....	62
Figure 3.12 : La pression de l'eau d'alimentation d'entrée en fonction de taux de récupération de pompe de clarck.....	63
Figure3.13 : Le débit du perméat en fonction de taux de récupération depompe de clarck.....	64
Figure 3.14 : le Débits de fuite dans la pompe de clarck en fonction des chutes de pression dans la pompe.....	65
Figure 3.15 : le CP (la concentration de sel dans l'eau douce) en fonction desurface de la membrane.....	66
Figure 3.16 : le CP (la concentration de sel dans l'eau douce) en fonction de facteur de concentration de polarisation.....	67
Figure 3.17 : Le CP (la concentration de sel dans l'eau douce) en fonction de TCF.....	6

Résumé

Ce travail a pour objet d'étudier une installation de dessalement d'eau de mer basé sur le principe d'osmose inverse et couplée à un système solaire. Il consiste également à modéliser, dimensionner le système entier afin d'étudier ses performances sous le climat algérien.

Abstract

The objects of this work is to study an installation of desalination of sea water based on the principle of reverse osmosis and coupled with a solar system. He also consists in modelling, in sizing the whole system to study his performances under the Algerian climate.

المخلص

الهدف من هذا العمل هو دراسة منشأة لتحليلت مياه البحر و التي تعمل على أساس التناضح العكسي و الذي يكون مربوط بنظام شمسي. كما يقوم بالنمذجة. التحجيم للنظام برمته لدراسة أدائه تحت المناخ الجزائري.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction :

L'eau est source de vie, c'est un élément indispensable à la survie des êtres vivants, malheureusement certaines régions de notre planète sont menacées par de graves pénuries d'eau. Le manque d'eau ne concerne pas seulement les régions confrontées à la sécheresse ou à une démographie galopante. Il touche également une grande partie du monde industrialisé, où les exigences de confort plus élevées et les importantes quantités d'eau consommées par les industries à grande échelle appauvrissent les réserves aquatiques naturelles.

Les ressources en eau douce sont très inégalement réparties et ne représentent qu'environ 2,5 % du volume d'eau existant sur la Terre. L'eau de mer contient en moyenne 35g/l de sel qui sont essentiellement des chlorures de Sodium (76%) et de magnésium (11%), des sulfates de magnésium (5%), de calcium (3,5%) et de potassium (2,4%). Dans les zones maritimes chaudes et partiellement fermées elle est plus élevée : en méditerranée elle varie de 36 à 39g/l, dans le Golfe Persique elle peut monter à un delà de 60g/l. C'est l'inverse dans les mers froides recevant de forts apports fluviaux : 7g/l dans la Baltique. Une bonne partie des zones consommatrices se trouvant proches des rivages océanique, une solution intéressante consiste à dessaler l'eau de mer.

Un peu d'histoire :

Dessaler l'eau de mer n'est pas une idée récente. Depuis de temps très anciens, on avait pu constater que si l'on portait à ébullition de l'eau saline on obtenait, par condensation de la vapeur, de l'eau déminéralisée. Les premiers appareils industriels de distillation sont apparus probablement dans la première moitié du 19 e siècle à bord des navires à vapeur. Mais c'est durant la seconde moitié du 20e siècle et plus particulièrement entre 1975 et 2000 que le dessalement de l'eau de mer et eaux salines est devenue un moyen industriel fiable de production de l'eau douce.

A partir des années 1975, suite aux différents chocs pétroliers de 1973 puis de 1979, les industriels ont pu prendre le relais et valoriser ainsi l'effort de près de 25

ans de recherches. En effet, les pays du Moyen-Orient (Arabie Saoudite, Emirats arabes Unis, Qatar, Libye) ont disposé de moyens financiers colossaux et compte tenu leurs besoins en eau douce, ont investi massivement dans des installations de dessalement et permis ainsi aux technologies de progresser à la fois du point de vue technique et économique.

L'eau en Algérie :

Approvisionnement en eau potable en Algérie

L'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, et se situe donc en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale, soit 1000 m³ par habitant et par année. En 1962, la disponibilité annuelle en eau par habitant était de 1500 m³ elle n'était plus que de 720 m³ en 1990 de 680 m³ en 1995 et de 630 m³ en 1998. La disponibilité annuelle en eau par habitant est aujourd'hui de 500 m³. Du fait de la pression démographique, cette disponibilité ne sera plus que de 430 m³ par habitant en 2020.

Les ressources d'eau en Algérie :

Les ressources en eau superficielle :

Les ressources en eau sont généralement faibles et surtout extrêmement irrégulières, leur exploitation devient de plus en plus difficile dans notre pays. Leur répartition sur le territoire est inégale; elles sont également exposées à des risques de pollution de plus en plus importants et qui compromettent l'utilisation de ces eaux dans de nombreuses régions du pays. Sur l'ensemble du territoire national, il y a seulement 49 barrages en exploitation totalisant actuellement une capacité de 4,48 Milliards de m³ pour l'alimentation en eau potable.

Les ressources en eau souterraine :

Les eaux souterraines sont généralement faibles et localisées dans le Sahara. Les lits d'oueds alimentent quelques nappes phréatiques souvent saumâtres: Ghir, M'zeb, Saoura, ou encore des nappes profondes, semi - fossiles ou fossiles comme l'Albien. Au nord, les précipitations sont irrégulières et mal distribuées géographiquement, elles augmentent d'Ouest en Est et affectent successivement les monts de Tlemcen, le versant nord de l'Ouarsenis, le massif de la grande kabyle, la petite Kabylie, le nord constantinois et le massif des Aurès [1].

Le dessalement en Algérie :

Le dessalement s'est imposé, partout dans le monde, comme une réponse à la pénurie d'eau. Comme l'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km, l'une des solutions consiste à dessaler l'eau de mer ou l'eau saumâtre.

Les premières installations de dessalement remontent à l'année 1964, trois petits blocs de 8m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est de type «tubes submergés», travaillant à basse pression. En 1969, une autre installation à Arzew a été installée pour une capacité de production de 4560 m³/j, le procédé utilisé est de type multi-flash (MSF). Dès lors, de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes industriels. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté, nécessaire aux complexes de production d'électricité (Cap Djènet à l'Est d'Alger) et à l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda).

Depuis 2003, 21 petites stations (monobloc) ont été installées dans le cadre du programme d'urgence lancé au début de l'année 2002. Ces stations sont d'une capacité totale de 57500 m³/jour. En ce qui concerne les grandes stations, 11 stations sont en opération avec capacité de production s'élève jusqu'à 2.1 millions m³ /jour. Toutes ces installations fonctionnent en osmose inverse.

Objectifs de ce travail :

Le présent travail a pour objet l'étude d'un système de dessalement de l'eau de mer basé sur le principe « osmose inverse » couplé à un générateur photovoltaïque. Cette étude consiste à la modélisation mathématique de la chaîne de transformation de l'eau de mer en eau douce. Il s'agit également d'établir un modèle global caractérisant le processus et composé de trois sous-modèles, chaque sous-modèle représente un des composants du système considéré dans cette étude. Ce mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique en présentant quelques travaux de recherche menés auparavant sur l'osmose inverse, et ce après le passage en revue les différents procédés de dessalement.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation du procédé étudié. Un modèle mathématique est développé et présenté. Il est constitué de trois

sous-modèles principaux ; un pour l'estimation de l'éclairement solaire, un autre pour les performances d'un générateur photovoltaïque et le dernier pour le système d'osmose inverse.

- Les différents résultats de cette étude seront présentés en détail dans le troisième chapitre. Ces résultats sont validés par les résultats disponibles dans la littérature.

Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE DESSALEMENT

I.1.Définition

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

I.2.Les procédés de dessalement

Les technologies actuelles de dessalement de l'eau, illustrées par la figure (1.1), sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué, on distingue :

- Les procédés membranaires, l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phase, la congélation et la distillation.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

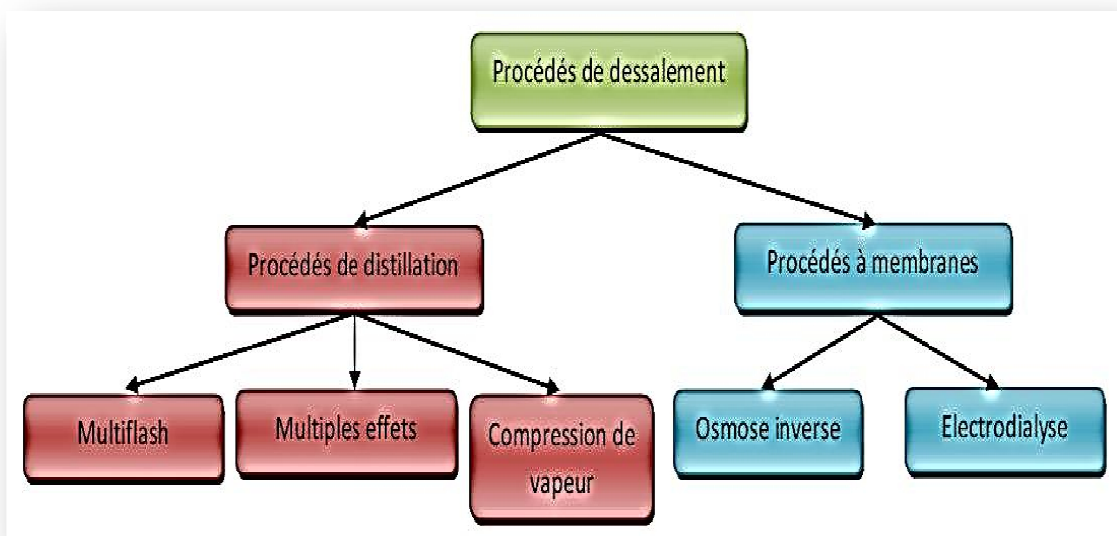


Figure 1.1 : Les procédés de dessalement

I.2.1. Les procédés thermique de dessalement (distillations):

Dans ces procédés, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide, on retrouve le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur de ce type de procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer un kg d'eau liquide en vapeur à la même température, il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique, le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effet Distillation MED)[2].

I.2.1.1. Distillation multistage : (MSF)

Ce procédé porte son nom du phénomène de "flash" qui s'effectue dans les chambres au fur et à mesure que l'eau passe d'une chambre à l'autre. De grandes villes, telles que Jeddah, en Arabie Saoudite, sont alimentées par ce type d'installations. Ces véritables usines d'eau potable utilisent de la vapeur recyclée provenant généralement de centrales électriques de proximité.

Ce procédé consiste en maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation partielle instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore pour se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes (figure

1.2).L'eau de mer chaude se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation. L'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré.

Le phénomène flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successive dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, elle circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible. Elle est alors progressivement préchauffée en récupérant de la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » ceci limite les risques d'entartrage. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer. Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour[3].

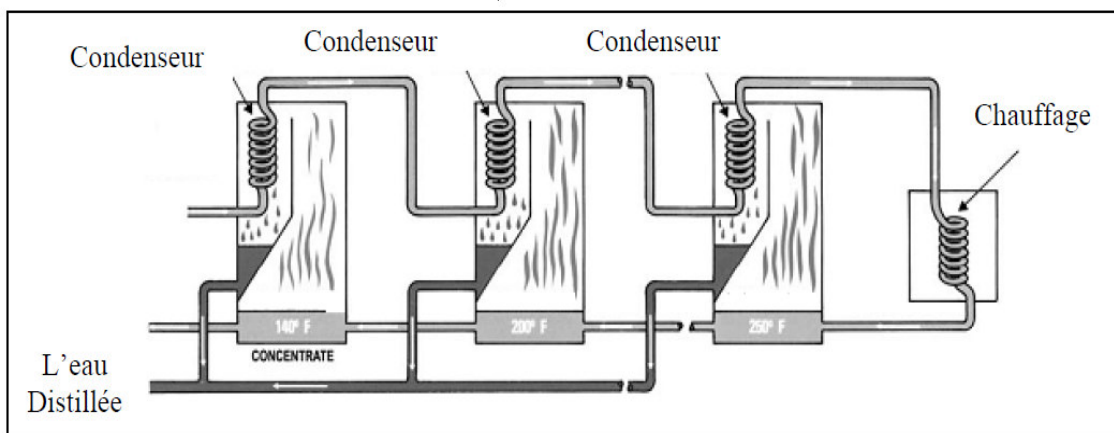


Figure 1.2 : Schéma du procédé de détente successive (MSF)

I.2.1.2. Distillation à multiples effets : (MED)

Le procédé DME est similaire au procédé MSF du fait que l'eau de mer est introduite consécutivement dans des chambres à pression décroissante, ce qui permet à chaque étape d'abaisser la température nécessaire pour porter l'eau à ébullition ; mais les procédés DME diffèrent en ce que l'ébullition est obtenue par les surfaces de transmission de chaleur (faisceaux de tube) plutôt que par évaporation flash. Une petite quantité de flash a lieu mais ce n'est qu'une petite contribution par rapport au total. Chaque chambre est appelée effet. Une source première de chaleur est nécessaire pour produire la vapeur pour le premier effet, qui a la température la plus élevée. Dans une installation classique, l'eau de mer entrant par le premier effet est pulvérisée sur un faisceau de tubes évaporateurs, tandis que la vapeur produisant le processus d'ébullition est envoyée dans les tubes évaporateurs. Un tel dispositif est appelé évaporateur à couches minces.

La vapeur d'eau distillée obtenue par ce processus d'évaporation est à une température plus élevée que la température de saturation dans le deuxième effet ; elle est envoyée dans les tubes de l'évaporateur du second effet, où elle est condensée, cédant sa chaleur au reste de l'eau de mer, provenant du premier effet. Ce processus se reproduit dans chaque effet. Un condenseur séparé est nécessaire pour condenser la vapeur distillée générée dans le dernier effet, servant également à légèrement préchauffer l'eau de mer et abaisser la température d'entrée désirée. Le distillat de chaque étape est recueilli dans un récupérateur commun et transporté pour post traitement. [4]

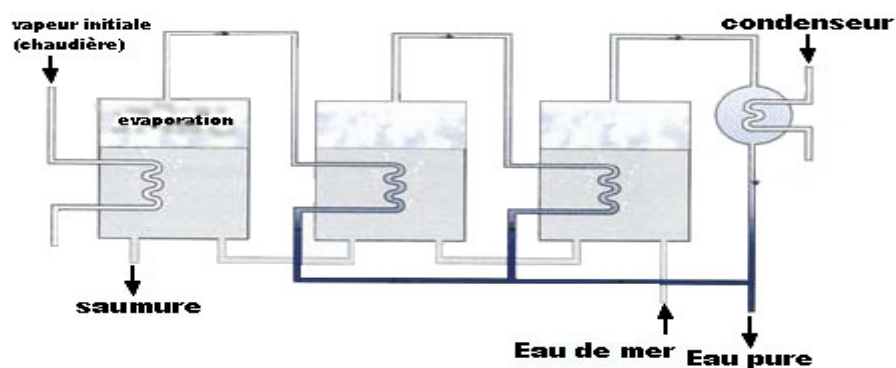


Figure 1.3 schémas distillation à multiples effets [5]

I.2.1.3. Distillation par compression de vapeur :

Lors de la distillation par compression de vapeur (Figure 1.4), l'eau de mer est portée à ébullition dans une enceinte thermiquement isolée. La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'évaporation de l'eau salée. Ce procédé permet d'obtenir une production maximum 5 000 m³.j⁻¹ avec une salinité de 1 à 50 mg.L⁻¹ pour une consommation énergétique de 12 à 17 kWh.m⁻³ d'eau produite [5]

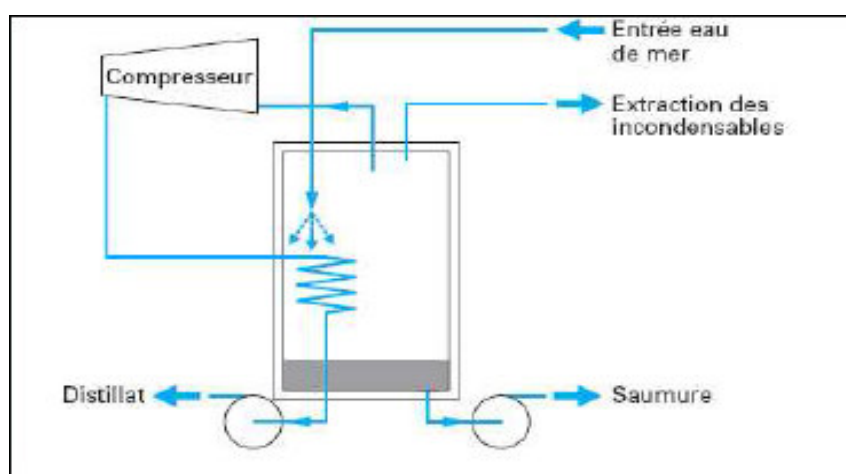


Figure 1.4. La compression de vapeur [Danis, SIDEM].

Outre leur consommation énergétique élevée, les procédés de distillation présentent plusieurs contraintes techniques. Tout d'abord, il est nécessaire d'évacuer les gaz incondensables présents dans l'eau de mer qui se sont évaporés lors du processus de distillation. Des prétraitements sont également requis comme une chloration, une filtration par tamisage à 0,5 mm et un traitement antitartre.

I.2.2. Les procédés membranaires :

I.2.2.1. L'électrodialyse :

L'électrodialyse est un procédé électro membranaire permettant la concentration et la déminéralisation de solutions contenant des espèces chargées. La force motrice est un gradient de potentiel appliqué entre deux électrodes. Entre

ces électrodes, sont placées alternativement des membranes échangeuses d'anions et des membranes échangeuses de cations. Le champ électrique provoque déplacement des ions présents dans l'eau. Ces ions se concentrent dans un compartiment (concentrât) tandis que l'autre est appauvri en sel.

En raison de sa consommation électrique, l'électrodialyse n'est compétitive (face à l'osmose inverse) et donc utilisée que pour le traitement des eaux saumâtres de concentration inférieure à 3 g.L-1. [5]. En fait, l'électrodialyse a été surtout envisagée jusqu'ici pour le dessalement d'eaux saumâtres, dont la salinité n'excède pas 1‰, le procédé n'étant pas rentable pour des teneurs en sels supérieures, les membranes étant en effet très sensibles, la moindre impureté en solution ou en suspension peut les endommager. Pour prolonger la vie des membranes, il peut être nécessaire d'effectuer un pré traitement, parfois coûteux. L'électrodialyse n'est pas non plus pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04‰ de sels. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales.

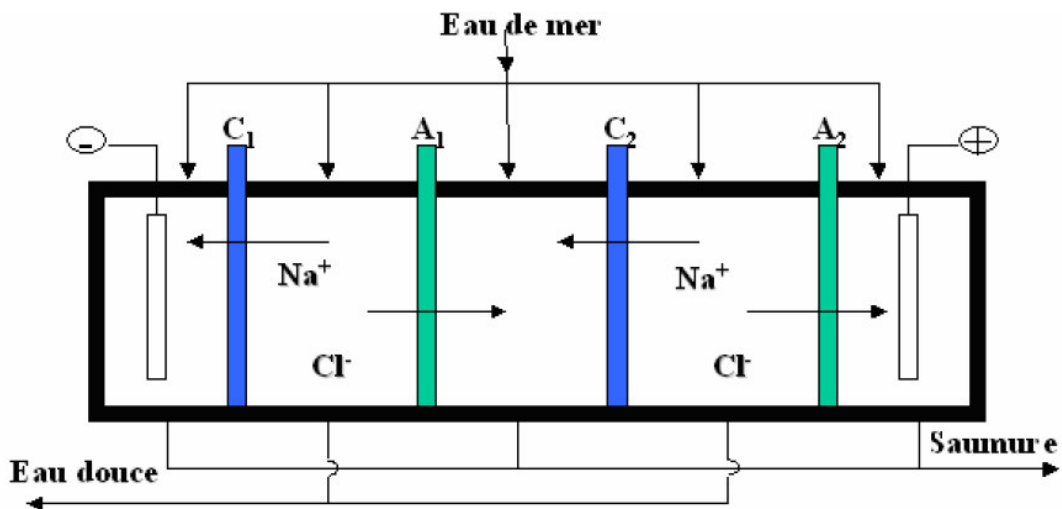


Figure 1.5: Schéma De Principe d'une électrodialyse [6]

I.2.2.2.L'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels

dissous, les molécules organiques de 10 à 7 mm de taille. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmoses est de l'ordre de 0,5 g/l

I.2.2.2.1. L'Historique de l'osmose inverse

Au XVII^{ème} siècle déjà, Jean Antoine Nollet, un physicien français, a remarqué qu'une membrane constituée d'une vessie de porc laissait passer l'eau douce et retenait l'alcool: c'est l'osmose.

Deux siècles plus tard, Jacobus Henricus Van't Hoff, grand chimiste et physicien hollandais, trouve une autre technique: il plonge un vase poreux qui contient une solution de sulfate de cuivre dans une solution de ferricyanure de potassium. Les liquides, se rencontrent dans les pores du vase, donnent un précipité gélatineux de ferricyanure de cuivre, formant ainsi une paroi semi-perméable. Plus tard, d'autres chercheurs comme A. Crum Brown, H. N. Morse et J. C. W. Frazer approfondirent le travail de Van't Hoff. En 1950, les premières membranes en acétate de cellulose sont créées en Floride.

I.2.2.2.Principe de fonctionnement de l'osmose inverse :

- OI est un système de purification de l'eau par passage sous pression à travers une membrane semi-perméable qui à la propriété de retenir la quasi-totalité des sels dissous. (figure 1.6). [7].
- A partir d'une quantité d'eau de mer à traiter, on obtient environ 40 à 45% d'eau dessalé à travers la membrane tandis que l'autre partie qui contient de l'eau de mer concentrée en sels doit être rejetée.

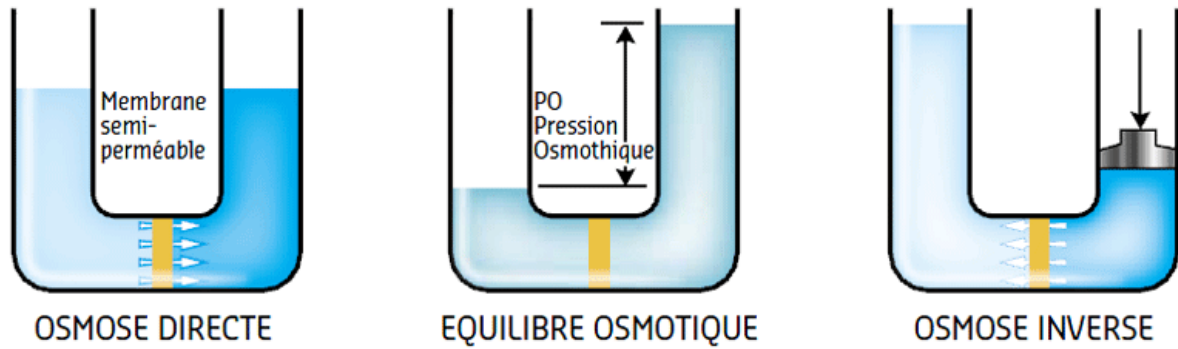


Figure1.6. Principe de fonctionnement l'osmose inverse [7]

I.2.2.3. Etapes et composants d'une station de dessalement par osmose Inverse

La Figure 1.7 présente un schéma simplifiée de la filière de dessalement par osmose inverse depuis l'eau de mer jusqu'à l'eau potable. Les différents éléments de la filière sont: la prise d'eau de mer, les prétraitements, l'osmose inverse et les post-traitements

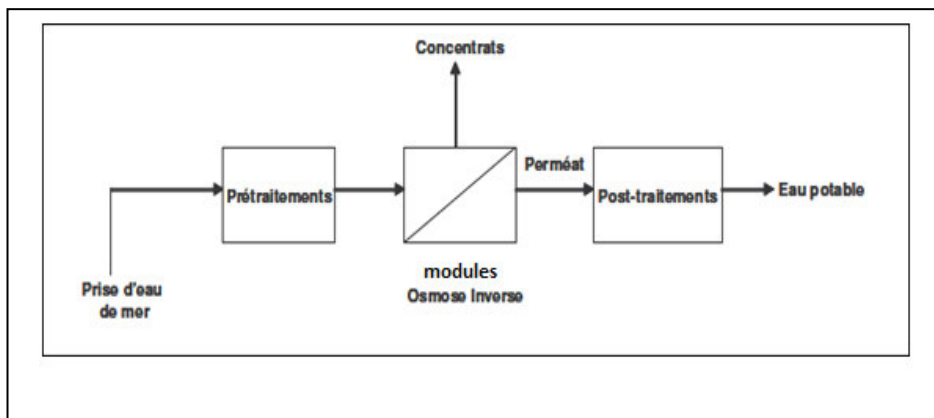


Figure 1.7. Schéma simplifié de la filière de dessalement par osmose inverse.

A. La prise d'eau de mer

La prise d'eau de mer est la première étape de la filière de dessalement. Elle doit permettre d'obtenir une eau en entrée de filière de la meilleure qualité possible et surtout minimiser les matières en suspension présentes. Il existe deux technologies : les forages côtiers et les prises d'eau de surface.

Les forages côtiers permettent d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stable. Le prélèvement s'effectue à travers le sol qui sert de filtre

naturel. Cependant, cette technique est limitée en débit suivant la nature du terrain et elle est ainsi utilisée pour des usines de dessalement de capacité inférieure à 40 000 m³.j-1. L'inconvénient de cette méthode est le colmatage éventuel au cours du temps du filtre.

Les prises d'eau en pleine mer (ou open intake) sont effectuées en zones profondes, éloignées de la côte et protégées des pollutions par rejets et des forts courants. Cette technique permet d'obtenir des débits supérieurs à 100 000 m³.j-1 mais des variations de la qualité de l'eau peuvent avoir lieu avec la présence de particules, colloïdes, polluants hydrocarbures ou d'organismes biologiques.

B. Le prétraitement

La présence de particules, de colloïdes, de matières organiques, de micro-organismes, de carbonate de calcium etc. peut provoquer un colmatage important sur la membrane d'OI et réduire sa durée de vie. L'OI présente ainsi une forte dépendance à la qualité des prétraitements. Le colmatage peut intervenir de plusieurs façons : les particules colloïdes argileuses peuvent coaguler avec les métaux Al, Fe ou les silicates pour former un gâteau sur la membrane ; les matières organiques dissoutes peuvent s'adsorber sur la membrane ; les carbonates de calcium peuvent provoquer un entartrage tandis que les micro-organismes forment des bios films.

C. Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

C.1. Pompe haute pression

Avant d'entrer dans les membranes d'osmose inverse, l'eau de mer clarifiée est pressurisée au moyen de la pompe haute pression généralement entre 55 et 85 bars, en fonction de la température et de la salinité de l'eau. [8].

C.2. Système de récupération d'énergie

La perte de charge à travers les membranes d'OI est d'environ 1.5 à 2 bar, en fonction du nombre d'éléments par tube de pression, le concentrât sort donc à haute pression. Grâce au système de récupération d'énergie, il est possible de réutiliser l'énergie du concentrât. Le concentrât est dirigé vers le système de récupération d'énergie, où il transmet directement son énergie à une partie de l'eau d'alimentation.

Il existe deux principaux concepts de récupération d'énergie:

- Turbine à récupération d'énergie
- Echangeur de pression [8].

C.3. Modules d'Osmose Inverse

C.3.1. Les membranes

Sont des minces parois permettant une séparation sélective d'espèces chimiques, ioniques, moléculaires ou biologiques : un « nano filtre ». Les pores d'une membrane sont de l'ordre de grandeur du nanomètre et varient de 1 à 100 suivant l'emploi que l'on destine à ces membranes. [9]. Pour être mises œuvre les membranes doivent être montées dans supports appelés modules. Actuellement quatre types de modules sont commercialisés :

1-modules tubulaire ;

2-modules fibre creuses ;

3-module plans ;

4-modules spirales ;

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix d'un type de module :

-régime d'écoulement permettant de minimiser les phénomènes de polarisation (écoulement laminaire ou turbulent) ;

-compacité qui est exprimée par le rapport de la surface filtrante ou volume de l'appareil ;

- facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuses ;

-volume mort de l'appareil (exprimé en l/m²) ;

-adaptation au produit à traiter (nécessité ou non de pré filtration).[10]

C.3.1.1. Modules tubulaires

Ce type de module est constitué de tubes métalliques ou plastiques sur lesquels est fixée la membrane semi-perméable. Le diamètre du tube est compris entre 7 et 25 mm et le plus souvent de 12.5 mm (1/2 inch). En générale l'eau de mer sous pression circule à l'intérieur de tube et l'eau douce produit est récupérée à l'extérieur du tube (figure 1.8).le tube est soit poreux soit perforé de trous pour permettre l'évacuation.

Avantages

- Prétraitement simplifié : compte tenu des diamètres relativement importants utilisés, les modules tubulaires peuvent accepter des fluides chargés en particules. Comme ordre de grandeur on considère qu'un module tubulaire peut tolérer des particules ayant une dimension inférieure ou égale à 1/10e du

diamètre du tube. Ainsi une solution ayant des particules de 1250 μm peut être traitée sur des tubes de 12.5 mm de diamètre.

- Facilité de nettoyage : soit par circulation à débits élevés de solutions adéquates, soit par la mise en place de système mécanique (boules tapproge par exemple).
- Technologie simple : dans certains cas, l'utilisateur peut lui-même remplacer une membrane sans difficulté.

Incontinents

- Consommation d'énergie élevée : afin de diminuer les risques de dépôts dus aux phénomènes de polarisation de concentration, les vitesses de circulation recommandées sont compris entre 2 et 6 m/s. Les nombres de Reynolds correspondants sont en générales supérieurs à 10000, de manier à être en régime turbulent. Ceci entraine une consommation énergétique d'autant plus élevée que le diamètre est important.
- Faible compacité : les modules tubulaires ont la surface de transfert par unité de volume la plus faible de tous les systèmes existant, soit entre 10 et 300 m^2 par m^3 .

Schéma de principe

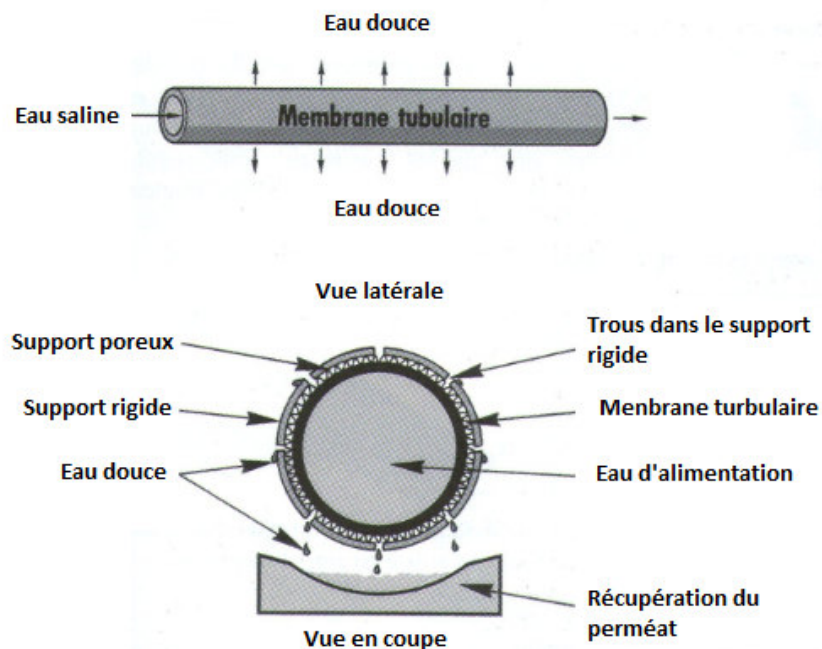


Figure1.8 : schéma de principe [10].

Module tubulaire SFEC/Rhône-Poulenc

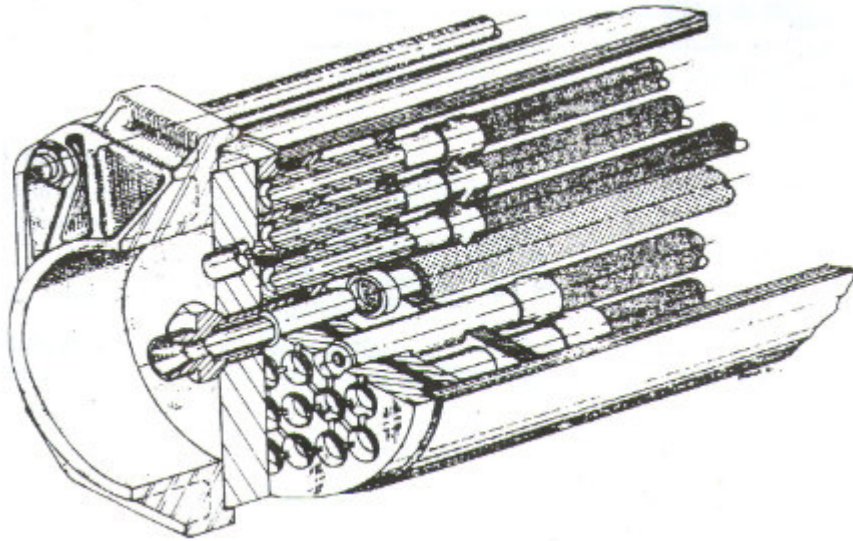


Figure 1.9 Module tubulaire SFEC/Rhône-Poulenc [10].

- Volume mort élevé : ceci présente un inconvénient lorsque l'on veut atteindre des facteurs de concentrations élevés ainsi que lorsque à traiter est de haute valeur (produits sanguins produits pharmaceutiques).
- Coût élevé.
- Ce type de module a été utilisé pour les premières installations de dessalement vers les années 1960-1970 aux États-Unis par Havens Industries et en France par Sfec puis Rhône-Poulenc.

Pour des problèmes de coût, le module tubulaire n'est plus utilisé pour le dessalement des eaux. Il est en revanche toujours utilisé en agroalimentaire.

C.3.1.2. Modules fibres creuses

Les modules fibres creuses peuvent être considérés comme des modules tubulaires composés de tubes de petit diamètre compris entre quelques millimètres et quelques dizaines de microns. Mais à la différence des modules tubulaires qui sont constitués d'une membrane et d'un support inerte. Les fibres creuses jouent à la fois de rôle de membrane et de support. [10].

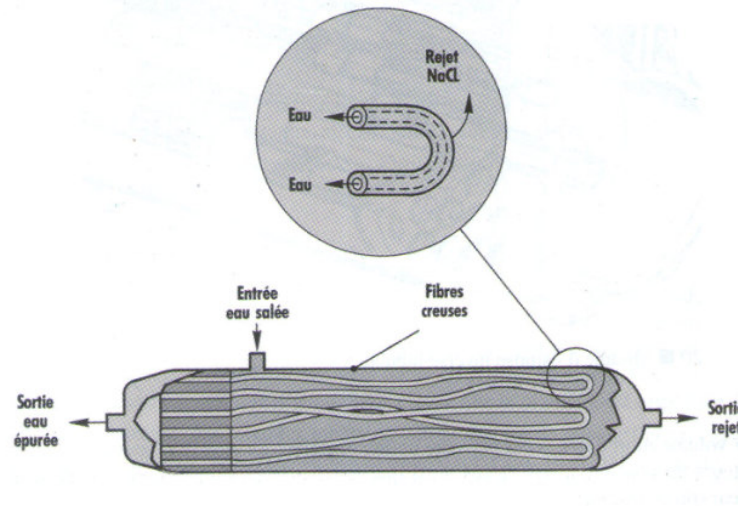


Figure 1.10 : Schéma de principe d'un module à fibres creuses.

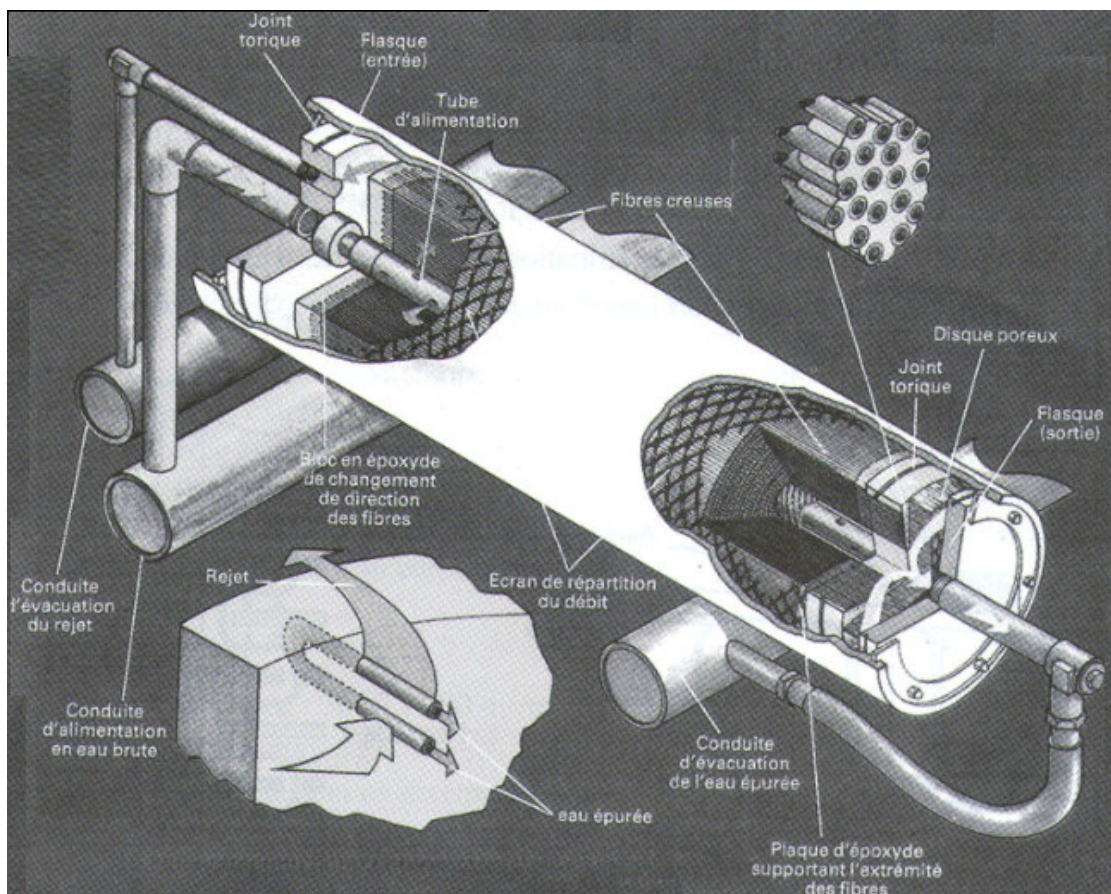


Figure 1.11 Module d'osmose inverse à fibres creuses de DupontNemours[10].

A titre d'exemple, les fibres creuses Dupont de Nemours avaient un diamètre intérieur de 40 μm et un diamètre extérieur de 80 μm . Le liquide à traiter circulait à l'extérieur de la fibre (figures 1.10-1.11)

Avantage

- Compacité élevée les modules fibres creuses ont la surface d'échange par unité de volume la plus élevée dans tous les systèmes existants (1500m²/m³ pour les fibres d'osmose inverse Dupont de Nemours).
- Faible volume mort.
- Faibles consommations énergétiques résultant d'une faible vitesse et d'un régime laminaire.
- Possibilité de nettoyage à contre courant.

Inconvénient

- Sensibilité au colmatage à cause du faible diamètre des fibres.

En 2005, le seul module fibres creuses commercialisé pour le dessalement des eaux est le module HoloSep® de la société Toyobo Co Ltd.

C.3.1.3. Module plan

Ce type de module qui est le plus simple, est aussi le plus ancien car sa technologie a été calquée directement sur celle des filtres presses. Il peut se présenter soit sous forme de plaques unitaire, soit de cartouches. Un des paramètres importants est la distance entre membranes :

- Faible épaisseur : nécessité de préfiltration et difficulté de nettoyage.
- Forte épaisseur : volume mort important et énergie de pompage élevée.

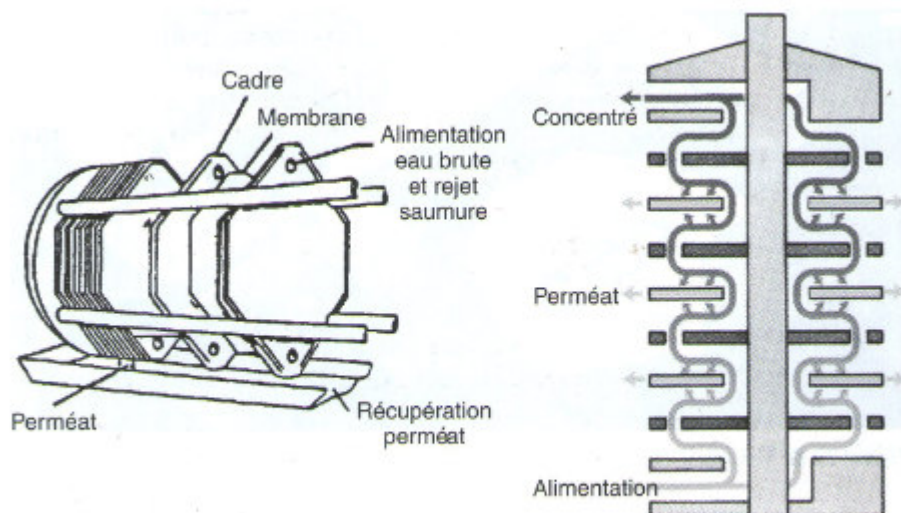


Figure 1.12 Module d'osmose inverse plans[10].

Avantage

- Système modulaire pouvant être modifié relativement aisément par l'utilisateur.
- Possibilité pour l'utilisateur de changer lui-même les membranes, soit usage, soit pour tester de nouveaux types de membranes.
- Prétraitement simplifié résultant de diamètre entre membrane en général de l'ordre du millimètre.
- Visualisation du perméat produit par chaque élément : ceci peut permettre de détecter rapidement la détérioration d'une membrane.

Inconvénient

- Système peu compact : 100 à 400 m²/m³.
- Investissement relativement élevé.

Ce type de module est assez peu utilisé en traitement d'eau compte tenu de son coût élevé. Il est en revanche utilisé en agroalimentaire, ainsi que pour le traitement des Lixiviats de décharge.

C.3.1.4. Modules spirales

Dans ce type de module, les membranes planes sont enroulées autour d'un tube perforé et creux destiné à collecter le perméat. Entre les membranes est placé un grillage plastique de 0.8 à 1.2 mm d'épaisseur, qui a pour but de créer une turbulence dans la circulation de fluide (figure1.13) .l'eau à traiter renfermant les sels

dissous entre à l'une des extrémités du rouleau et passe axialement à travers la membrane. Afin de pouvoir exercer la pression requise sur le liquide à traiter, les rouleaux de membranes (appelées souvent cartouches) sont insérés dans des corps de pression tubulaires avec un système de joints aux extrémités. En général, plusieurs cartouches sont assemblées dans un seul corps de pression.

Avantage

- Compacité élevée : 300 à 1 000 m²/m³
- Faible volume mort.
- Coût d'investissement relativement faible.
- Possibilité de charger les membranes par l'utilisateur.

Inconvénients

- Sensibilité relativement élevée au colmatage par suite de la faible distance entre membrane et surtout de la présence d'un espaceur.
- Difficulté de nettoyage.

Ce type de module s'est imposé en dessalement (95% du marché). À titre d'exemple, les caractéristiques d'un module standard utilisé pour des installations grandes capacités sont les suivantes :

- Diamètre en mm
- Longueur en mm
- Surface de membrane en m²
- Débit de perméat en m³/jour (eau de mer 35g/l – pression 56 bar)
- Taux de rejet de membrane en %

En 2005 les principaux fournisseurs de module spiral sont :

- DOW-Filmtec (www.filmtec.com);
- Hydranautics (www.hydranautics.com);
- Toray (www.toray.com);
- Koch Fluids (www.kochmembrane.com);
- CSM (www.saehancsm.com); [10].

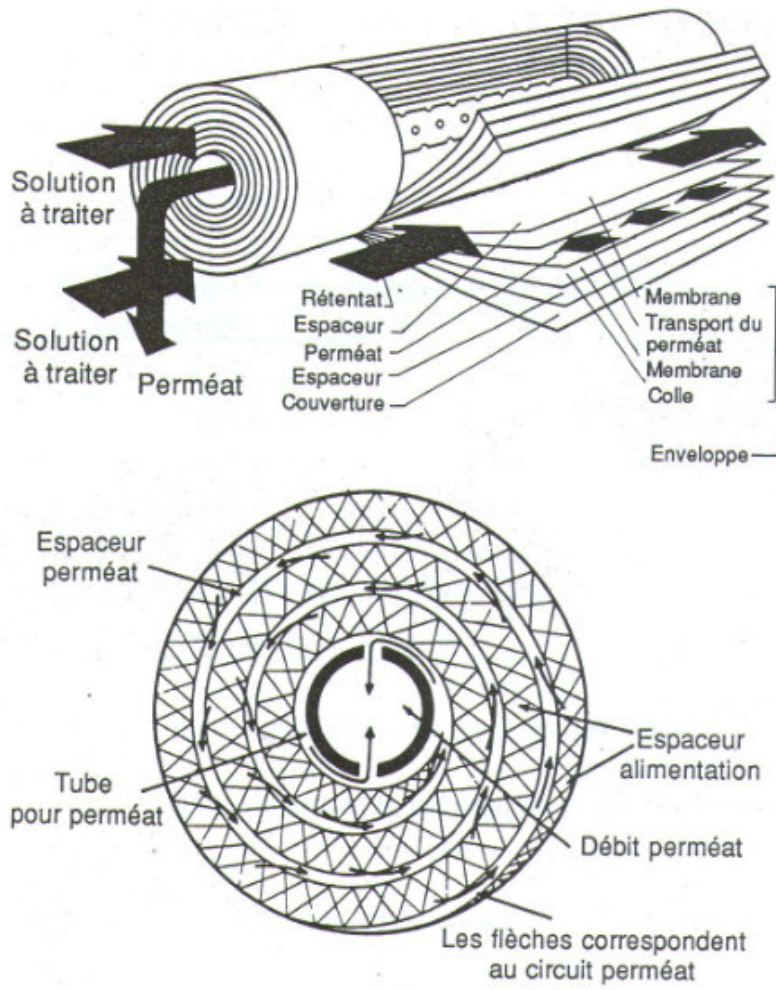


Figure 1.13 : Module spirale

Les tableaux 1 et 2 donnent les caractéristiques comparées des principaux modules d'osmose inverse.

Type de module		Tubulaire	Plan	Spiral	Fibre creuses
Surface de membrane par unité de volume	m ² /m ³ valeur relative	300 1	300 1	1000 3	15000 50
Débit spécifique moyen	L/h/m ²	10-50 1	10-50 1	10-50 1	1-5 0.1
Capacité de production par unité de volume	m ³ /h/m ³ valeur relative	3-15 1	3-15 1	10-50 3	15-75 5
Type de prétraitement nécessaire		Très simple	Très simple	moyen	Très important
Tendance au colmatage		Faible	Faible	moyen	important
Constructeur	Europe	Kalle, PCI Wafilin	DDS, GKSS	–	–
	Etats-Unis	Carre	–	Filmtechyd ranautic, UOP Osmonic	–
	Japon	Daicel, Nitto	Daicel, Nitto	Nitto, Toray	Toyobo

Tableau 1.1 : comparaison des différents modules d'osmose inverse.

Type	Matériau	Fabricant	Appellation commerciale	Module
Asymétrique polymère unique	Acétate de cellulose	UOP (US) Osmonics (US) Envirogenics (US) Nitto (US) Kobe Steel (US)	Roga Sepa — 1500 —	Spirale Spirale Spirale Tubulaire Fibres creuses
	Di/Triacétate De Cellulose	Dow Chem (US) Hydranautics (US) Toyobo (JP) DDS (Danemark) Wafilin(P-Bas)	Dowex Hollosep C-A WFR	Fibres creuses Spirale Fibres creuses Plan Tubulaire
	Polyamide aromatique	Du Pont de Nemours (US) DDS (Danmark)	Permasep HMX	Fibres creuses plan
	Polybenzimidazole	Celanese/ Osmonics (US)	—	—
	Polybenzimidazole	Teijin (JP)	—	Tubulaire
Composite support polysulfone dans la plupart des cas	Polyamide	Filmtec (US)	FT 30	Spirale
	Polyamide	UOP (US)	PA 300	—
	Polyfurane/cyanurate	Toray (US)	PEC 1000	Spirale
	Polyurée Polyether	UOP (US)	RC 100	—
Composite	Autres	Desalination (US) Hydranautics (US) Nitto (JP)	—	—
Dynamique Support Inox	Polyacrylamide Zircon	Carre (US)	Zopa	Tubulaire

Tableau 1.2 : principales membranes d'osmose inverse commercialisées.

C.4. Types de membranes :

-Membranes organiques

La plupart d'entre elles sont actuellement fabriquées à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly sulfones, polyamides, etc.) dont les qualités leurs confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Elles sont souvent utilisées en ultrafiltration et microfiltration.

-Membranes minérales ou inorganiques

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

-Membranes composites

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

-Membranes échangeuses d'ions

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-dé ionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.[11]

C.5. Les caractéristiques des membranes

Les membranes sont caractérisées par :

- qualités de stabilité chimique (pH, oxydants, dichorée ...),
- stabilité thermique (important facteur pour les utilisations biologiques où il y a stérilisation en autoclave),
- de stabilité microbiologique :(Dégradation bactérienne pour les membranes en acétate de cellulose)

- de résistance mécanique.

-Durée de vie des membranes

Il est très difficile de déterminer exactement la durée de vie des membranes d'osmose inverse.

En effet, la durée de vie dépend de la nature de membrane mais aussi des conditions d'utilisation :

- Pression de fonctionnement.
- Température de l'eau.
- pH.
- Qualité du prétraitement.
- Enfin, la notion même de la durée de vie d'une membrane n'est pas très nette. Les performances d'une membrane d'osmose inverse évoluent lentement au cours du temps et en générale on change les membranes lorsque la qualité du perméat dépasse un certain seuil. Mais pour différentes raisons, l'exploitant peut très bien augmenter la durée de vie des membranes en faisant fonctionner l'installation au-delà de ce seuil.
- Une enquête effectuée en Arabie Saoudite en 2000 a mis en évidence les principales causes de baisse des performances des membranes :
 - 1) Dégradation d'origine mécanique.
 - 2) Dégradation d'origine chimique (oxydation ou hydrolyse).
 - 3) Colmatage

Les différents types de dépôts qui sont à l'origine du colmatage sont les suivant :

- Biofouling 33.5%.
 - Colloïdes inorganiques13.8%.
 - Composés organiques11.4%.
 - Silicites/silicates10.0%.
 - Dépôts minéraux (hors silice).....5%.
 - Coagulants.....4%.
- 77.7%

La durée de vie des membranes, qui était, il y a quelque année, 2 à 3 ans, est actuellement supérieure à 5 ans : ce qui traduit par un taux de renouvellement compris entre 10 et 20 % par an[10].

-Le problème du rejet des concentrats d'osmose inverse

Un des principaux problèmes liés à l'osmose inverse est le rejet des concentrats. Une usine de dessalement par osmose inverse a en réalité trois types de rejets : les rejets des eaux de lavage de membrane, les rejets des prétraitements et les rejets de concentrats d'OI.

-Energie consommée en osmose inverse en l'absence de système de récupération

L'énergie est consommée par le groupe électropompe. Le tableau 1.3 nous donne une idée sur les ordres de grandeurs des consommations d'énergie d'une unité de dessalement d'eau de mer pour différentes pressions de fonctionnement (50 60 70 bar), différents taux de conversion (20 40 60 %) et différents rendements du groupe électropompe (30 70 90 %) [10].

Tableau 1.3: consommations d'énergie en KWh/m3 d'une unité de dessalement d'eau de mer par osmose inverse en l'absence de récupération d'énergie [10].

Pression (bar)		50 bar			60 bar			70 bar		
Taux de conversion (%)		20	40	60	20	40	60	20	40	60
Rendement du groupe électropompe	0.3	23.4	11.7	7.8	28.1	14.0	9.4	32.7	16.4	10.9
	0.7	10.0	5.0	3.3	12.0	6.0	4.0	14.0	7.0	4.7
	0.9	7.8	3.9	2.6	9.4	4.7	3.1	10.9	5.5	3.6

Le choix de la pompe haute pression est donc très important. Le tableau 1.4 donne les avantages et les inconvénients des différents types de pompe utilisée en osmose inverse.

Tableau 1.4 : avantages et inconvénients des différents types de pompes utilisées en osmose inverse [10].

	Avantages	Inconvénients
Pompes volumétriques - à pistons - rotatives	- rendement élevé - investissement faible	- limitées en débit - pulsations - entretien coûteux
Pompes centrifuges - multi-étagées (1500 à 3000 tr/min) - mono-étagées à grande vitesses (10000 à 20000 tr/min)	- gamme étendue - pas de pulsations	- valeur élevée du NPSH - fabrication complexe
	- compacité - investissement faible	- mauvais rendement - bruit, vibrations

La figure 1.14 classe les différents types de pompes utilisables en osmose inverse en fonction des débits.

Les pompes hautes pression d'osmose inverse sont dimensionnées pour tenir compte de l'augmentation des pertes de charges dues en particulier au colmatage des membranes. Le réglage de la pression et du débit se fait souvent au moyen d'une vanne de réglage placée au refoulement du groupe électropompe. L'utilisation d'un groupe électropompe équipé d'un moteur avec variateur de vitesse permet une réduction de la consommation d'énergie (12 % par exemple sur l'unité de dessalement d'eau saumâtre à 6 g/l de Zarzis en Tunisie).

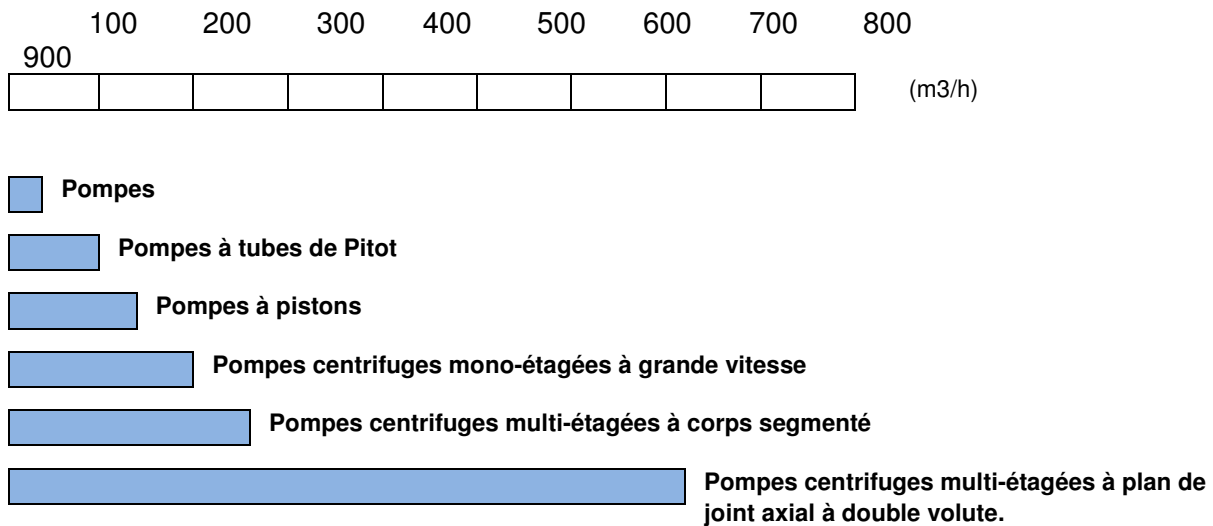


Figure 1.14 : différents types de pompes utilisées en osmose inverse [10].

D. Récupération d'énergie

Dans le cas où le coût de l'énergie est peu élevé, le circuit de concentration est détendu à travers une vanne, ce qui représente une perte d'énergie. On peut aussi envisager de récupérer l'énergie contenue dans le fluide haute pression soit au moyen d'une turbine soit au moyen d'un système à pistons. La figure 32 montre le schéma hydraulique d'une unité de dessalement d'eau de mer par osmose inverse fonctionnant à 65 bars avec un taux de conversion égal à 25 %.

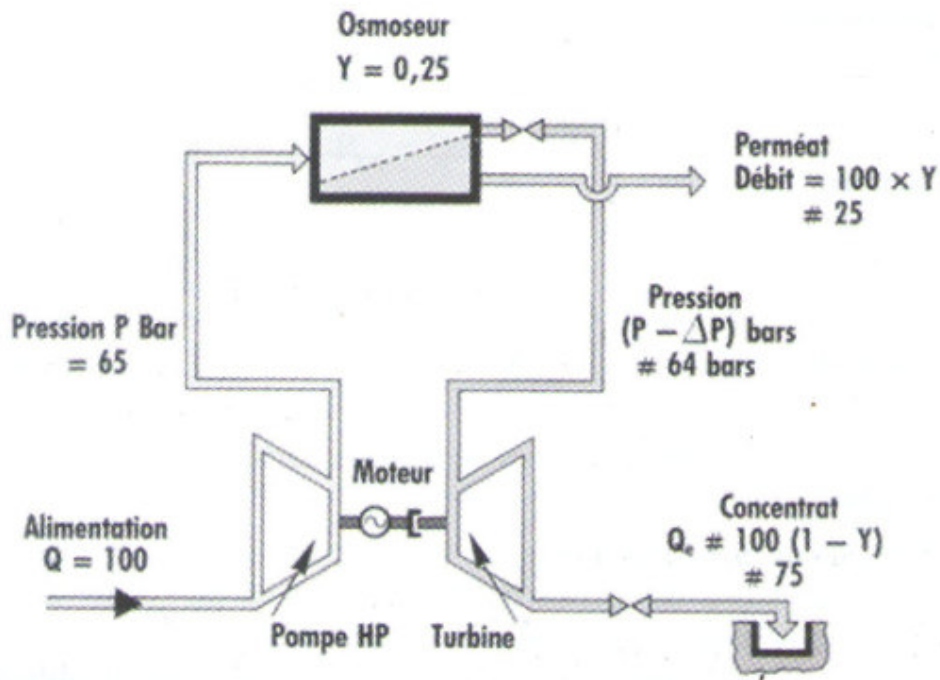


Figure 1.15 récupérations d'énergie par turbine [10].

Le tableau 1.5 donne la consommation d'énergie d'une unité de dessalement d'eau de mer fonctionnant à 60 bar, en supposant que les rendements du groupe électropompe et du système de récupération d'énergie sont identiques et que la perte de charge est de 1 bar.

Tableau 1.5 : énergie consommée par le procédé d'osmose inverse avec récupération d'énergie pour le dessalement de l'eau de mer[10].

Pression		60 bar		
		20%	40%	60%
Rendement $\eta_p = \eta_{turb}$	0.7	7.4 KWh/m ³	4.3 KWh/m ³	3.2 KWh/m ³
	0.8	5.2 KWh/m ³	3.3 KWh/m ³	2.6 KWh/m ³
	0.9	3.4 KWh/m ³	2.5 KWh/m ³	2.1 KWh/m ³

La décision d'adopter un système de récupération d'énergie doit être prise en comparant le coût des annuités financières dues à cet supplémentaire et le coût de l'énergie récupérée. Elle dépend :

- de la taille de l'installation.
- Du coût de l'énergie.

- De la pression de fonctionnement.
- Du taux de conversion.

D.1. Différents système de récupération de l'énergie

Du point de vue technologique trois solutions sont actuellement disponibles : les turbopompes intégrées, les turbines Pelton et les systèmes dits échangeurs de pression.

D.1.1. Les turbopompes intégrées

Le principe de ces machines est de récupérer l'énergie de la saumure dans une turbine hydraulique montrée sur le même arbre que la pompe haute pression. Une telle turbopompe intégrée a été réalisée par la société française Guinard d'Annecy et a été mise en service dès 1981 sur une unité de dessalement d'eau de mer de 20 000 m³/jour sur l'île de Malte. Les caractéristiques de cette machine, qui a été vendue à plus de 70 exemplaires, sont données par les figures 1.16. Des systèmes analogues, mais plus performants, sont commercialisés :

- Système HPB (Hydraulic Pressure Booster) de la société Fedco1 (Fluid Equipment Development Company).
- Système HTC (Hydraulic Turbo Charger) de la société PEI2 (Pump Engineering Inc).

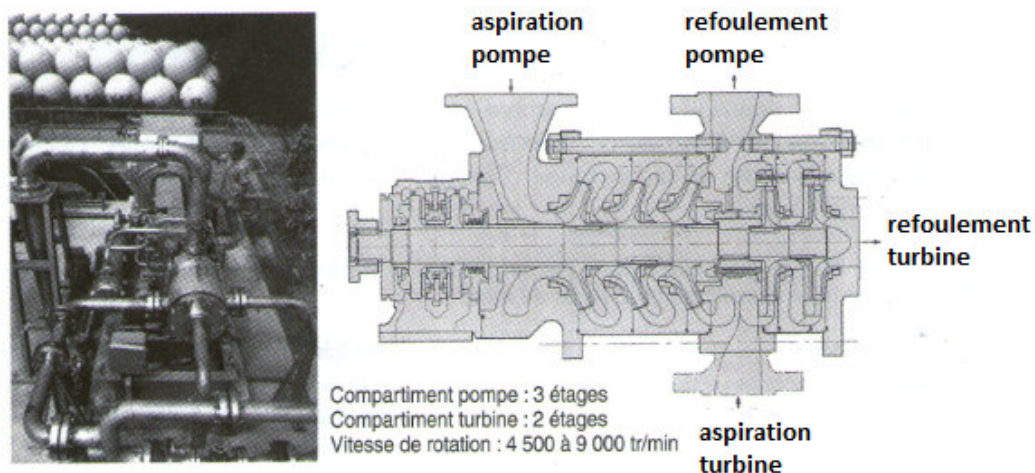


Figure 1.16 Récupération d'énergie en osmose inverse par turbopompe TPMDX Guinard [10].

D.1.2. Les turbines Pelton

Les turbines Pelton sont utilisées depuis très longtemps pour la production d'énergie électrique sur les sites de montagne caractérisés par de faibles débits et de grands dénivelés. Leurs caractéristiques sont relativement des unités de dessalement d'eau de mer par osmose inverse. Dans la turbine Pelton, toute l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique. La vitesse de l'eau à la sortie de la buse ne dépend que de la pression

Des petites turbines Pelton de quelques kilowatts de puissance ont été testées par le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) dans les années 1980 sur des unités d'osmose inverse alimentées en énergie soit par des aérogénérateurs, soit par des photopiles (figure 1.17).

Actuellement, plusieurs industriels, dont le plus connu est Calder, proposent des turbines Pelton pour des débits allant de 10 à 1200 m³/h. bien qu'ayant un bon rendement compris entre 80 et 90 %,

Ces machines présentent quelques inconvénients :

- Corrosion des aubes due à la vitesse élevée du jet (environ 100 m/s),
- Centrage du jet difficile à maintenir[10].

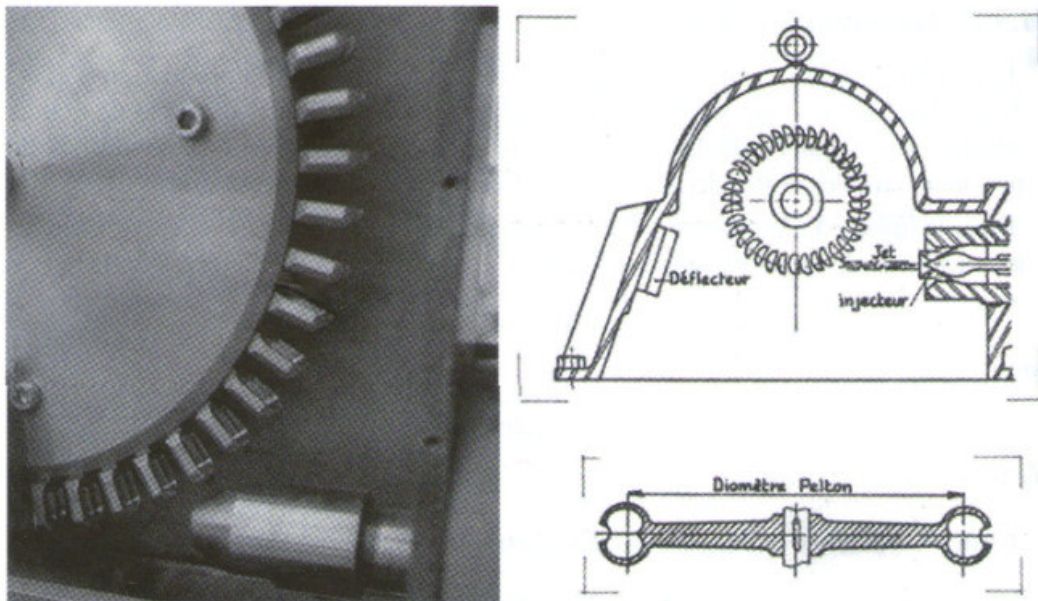


Figure 1.17 La turbine Pelton [10].

D.1.3. Les systèmes dits « échangeur de pression »

De façon schématique, ces systèmes peuvent être considérés comme une pompe à piston qui utilise le rejet de saumure (qui est aux environs de 60-70 bar dans le cas de l'eau de mer) pour « aider » le déplacement du piston (figure 1.18). Cette technologie, que l'on peut appeler de 3e génération, présente l'avantage d'avoir un rendement plus élevé ($\geq 95\%$) et indépendant des variations de débits. Quelques inconvénients doivent être signalés :

- Complexité de la technologie.
- Débits relativement peu élevés actuellement ($\leq 500 \text{ m}^3/\text{h}$) ce qui nécessite pour de grosses unités de dessalement, un nombre élevé de machines.
- Fuites au niveau des pistons entraînant un passage de saumure dans l'eau de mer d'alimentation, pouvant atteindre 3%.

Plusieurs systèmes sont actuellement commercialisés :

- System DWEER (dual work exchanger energy recovery) :

Ce système a été mis sur le marché dès 1990 par la société DweerTechnology Ltd et, est actuellement fabriqué et commercialisé par la société suisse Calder. Les avantages du système, dont le principe est par la figure 19, sont les suivants :

- Rendement de l'ordre de 95%.
- Débit de pompe HP égal au débit de perméat.
- Rendement indépendant du débit et de la pression.

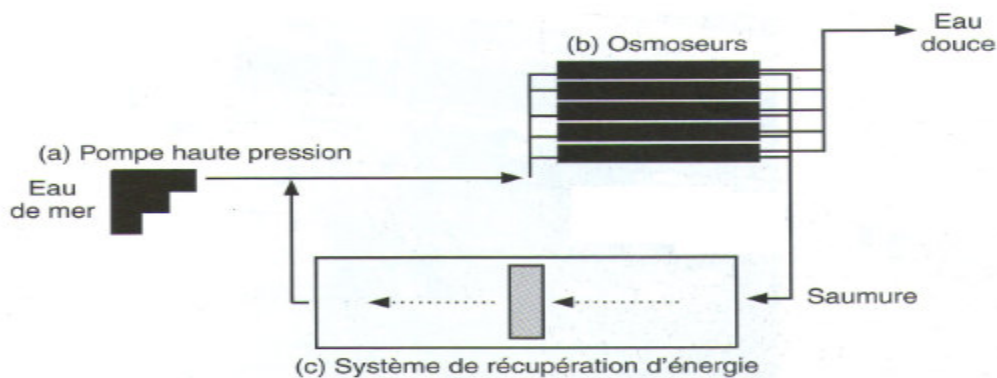


Figure 1.18 : récupérations d'énergie par système à pistons « échangeurs de pression »

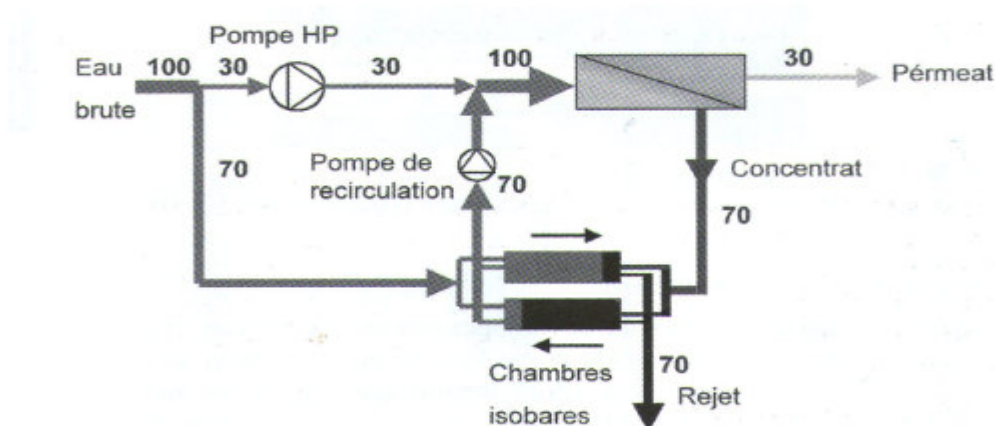


Figure 1.19 principes du système de récupérations d'énergie Dweer[10].

- Système ERI (Energie Recovery Inc) :
Cet échangeur de pression qui est constitué d'un cylindre tournant en céramique percé de trous, fonctionne suivant le principe d'un pistolet à barillet. La vitesse de rotation est de 1500 tr/min. Un tel système a été adapté sur l'installation de dessalement d'eau de mer de 10000 m³/jour de Dhekelia (Chypre) et permet d'obtenir une consommation d'énergie de 2.8 KWh/m³ (procédé d'osmose inverse proprement dit).
- Osmopompe de la société Octave :
Ce système à piston en cours de développement utilise un circuit hydraulique intermédiaire et combine en une seule phase la mise en pression et la récupération d'énergie ce qui devrait lui permettre d'obtenir une consommation énergétique sur eau de mer de 2.5 KWh/m³ (procédé d'osmose seul).
Une comparaison des performances énergétiques sur eau de mer des principaux systèmes existants en 2005 est donnée ci-après :

Système de récupération	Consommation électrique (KWh/m³)
Turbine Pelton	3.5
Système ERI	2.8
Système DWEER	2.6
Osmo-pompe	2.5

tableau 1.6. Une comparaison globale des quatre grands systèmes de récupération d'énergie [10].

-Les avantages et les inconvénients

-Les avantages

Après l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bio électroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles :

- pH légèrement acide de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibre de pH du sang généralement trop toxique).
- Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins.
- L'eau osmoses est antioxydant, alors que l'eau en bouteille est plus oxydée du fait du délai souvent trop long entre la mise en bouteille et la consommation
- L'énergie de l'eau osmoses (7200 unités Bovis) est nettement supérieure à celle de l'eau en bouteille (5000) qui est en outre chargé de tous les rayonnements nocifs qu'elle subit pendant son transport et dans les lieux de stockage.[12]

Les inconvénients

- La faible durée de vie des membranes, qui est de l'ordre de 3 ans.
- L'énergie consommée est énorme.
- Les pertes en eau : le rendement n'est que de 75% et ainsi 25% de saumure (solution aqueuse très concentrée en sel) restent à la fin et sont inutilisables.
- La pureté de l'eau est toujours inférieure à 100%[13].

E. Les stations de dessalement en Algérie

E.1. Etat des lieux

L'Algérie compte plus de 30 millions d'Habitants, et se trouve dans une région semi-aride, souffre actuellement plus que jamais du problème d'insuffisance des ressources en eau. Elle est caractérisée aussi par une irrégularité pluviométrique, sur les 100 milliards de m³ que reçoit annuellement le territoire du pays, il ne s'écoule dans les oueds et cours d'eau que 12,5 milliards de m³, et la quantité mobilisable par les barrages et les puits est d'autant plus faible : 4,5 milliards de m³ environ [14]

En Algérie, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres a connu ces dernières années une avancée remarquable. Aujourd'hui, plusieurs facteurs militent en faveur de la mise en œuvre de cette technologie dans notre pays :

- Un littoral long de 1200 kilomètres;
- Disponibilité de l'eau de mer, ressource inépuisable;
- Une population et une industrie grandes consommatrices d'eau se trouvant à proximité de la mer;
- Disponibilité de la ressource énergétique ou combinaison de sa production.

Les premières installations de dessalement remonte à l'année 1964 (juste après l'indépendance), trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est de type «tubes submergés», travaillant à basse pression. En 1969, une autre installation à Arzew a été installée pour une capacité de production de 4560 m³/j, le procédé utilisé est de type multi-flash (MSF) [15]. Dès lors, de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes industriels. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté, nécessaire aux complexes de production d'électricité (Cap Djènet à l'Est d'Alger) et à l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda). Egalement, quelques installations sont destinées, principalement à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières se trouvant au sud.

L'Algérie s'est engagée dans un important programme d'investissement pour le dessalement d'eau de mer afin de :

- Faire face à la demande domestique (eau potable) de sa population, en sécurisant les besoins des villes côtières (80% de la population) ;
- libérer le pays de la dépendance de la pluviométrie pour l'alimentation en eau potable des populations ;
- Intégrer l'apport de technologies nouvelles qui permettent d'obtenir aujourd'hui une eau potable, de qualité, à des coûts de production maîtrisés ;
- Palier aux contraintes de réalisation des barrages, par exemple un barrage met 15 années à se construire vs une station de dessalement d'eau de mer met 28 mois [16].

Le programme Algérien de dessalement des eaux de mer prévoit la mise en service de 14 stations de dessalement totalisant $2,4 \times 10^6$ m³ de capacité de production journalière d'eau potable. Cette mission a été attribuée à la compagnie Algerian Energie Company (AEC).

43 unités seront opérationnelles d'ici 2019, pour approvisionner les grands centres urbains, en réservant les eaux traitées et les eaux de barrage à l'agriculture et l'usage industriel

(1 000 000 m³/j installés, 2 000 000 m³/j programmés). Le dessalement est ainsi appelé à répondre aux besoins de plus d'un cinquième de la population. « L'eau dessalée, du fait de son coût relativement élevé, ne peut être utilisée que pour la consommation domestique. L'idée est d'approvisionner les grands centres urbains, comme Alger, Oran ou Skikda, en eau dessalée et de réserver les eaux traitées et les eaux de barrage à l'irrigation, l'agriculture et l'usage industriel ». Les citoyens sont sensibilisés à rationaliser la consommation de l'eau et à mettre un terme aux déperditions d'eau qui avoisinent à Alger le taux de 40%. Cependant, le gouvernement a annoncé que malgré le développement des usines de dessalement, le prix de l'eau restera inchangé pour les consommateurs algériens. D'autres unités seront localisées à Mostaganem, Zéralda (Alger-Ouest), à Cap Djinet à l'Est d'Alger), à SidnaOuchaa, Honaïne et AïnTourk dans la wilaya d'Oran, Jijel et El Kala. Et 20 autres petites stations seront réalisées, d'ici 2016, sur le budget de l'Etat et seront confiées à la charge de l'ADE (Algérienne des Eaux). Par ailleurs, un accord de coopération avec la France pour le dessalement nucléaire a été signé en décembre 2007 [17].

Depuis 2003, 21 petites stations ont été installées dans le cadre du programme d'urgence lancé au début de l'année 2002. Conçues par la Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger (SEAAL) et l'entreprise nationale Hydro-traitement [18]. ces stations sont d'une capacité totale de 57500 m³/jour, elles sont toutes implantées dans les régions côtières et sont réparties entre:

- Alger: 12 stations pour un volume journalier de 30.000 m³ ;
- Boumerdes: une station pour un volume journalier de 5000 m³;
- Tipaza: une station pour un volume journalier de 5000 m³ ;
- Skikda: 04 stations pour un volume journalier de 10.000 m³ ;
- Tlemcen: 02 stations pour un volume journalier de 5000 m³ ;
- TiziOuzou: 01 station pour un volume journalier de 2500 m³ ;
- Treize projets de dessalement d'eau de mer, d'une capacité globale de 2,260 millionsde mètres cubes, soit 2,26 milliards de litres par jour, sont opérationnels dès 2010 ;
- Une usine de dessalement d'eau de mer à Magtaa (commune de Mers El Hadjadj, wilaya d'Oran) dans l'ouest de l'Algérie. Cette station est implantée sur 18 hectare set aura une capacité de production par osmose inverse, de 500 000 m³/jour à l'horizon 2011. Destinée à répondre aux besoins en eau potable de la wilaya d'Oran, cettercapacité est la plus importante en Algérie et même dans le monde [19].

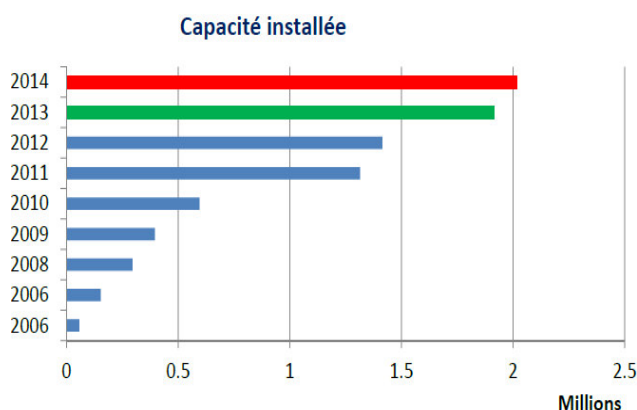


Figure 1.20. Evolution de la capacité installée de systèmes de dessalement en Algérieentre 2006 et 2014[16]

De 2006 à 2011, la capacité de dessalement d'eau de mer en Algérie est passée de 152 500 à 1,2 MM³/J. En fin de 2012, la capacité de production était de 1,3 MM³/J. L'Algérie prévoit au troisième trimestre 2014, une capacité totale de 2,1 MM³/J [16]

Tableau 1.7. Les stations de dessalement en Algérie[16]

Projets	Capacité(M ³)	Population à servir	Mise en service	Partenaires	Banques (Chef de fil)
Kharama	96 000	540 000	Depuis 2006	Black & Veatch "Afrique de Sud" : 0,5%	SH/SG
Hamma	200 000	Algérois	Depuis 2008	GE Ionics "Etats-Unis" : 70%	OPIC
Skikda	100 000	666 660	Depuis 2009	Geida (Befesa/Sadyt) "Espagne" : 51%	BNA
Beni Saf	200 000	1 333 320	Depuis 2010	Cobra "Espagne" : 51%	BEA
Souk Tlata	200 000	1 333 320	Depuis 2011	TDIC (Hyflux/Malakoff) "Singapour" : 51%	BNA
Fouka	120 000	---	Depuis 2011	AWI (Snclavalin/Acciona) : 51%	CPA
Mostaganem	200 000	1 333 320	Depuis 2011	Inima/Aqualia "Espagne" : 51%	BEA
Honaïne	200 000	1 333 320	Depuis 2011	Geida (Befesa/Sadyt "Espagne" : 51%	CPA
Cap Djinet	100 000	666 660	Depuis 2012	Inima/Aqualia "Espagne" : 51%	BNA

Magtaa	500 000	1 333 320	2013	Hyflux"Singapour" : ADE"10%	47%, BNA
Ténès	200 000	999 990	3ème trimestre 2014	Befesa"Espagne" : 51%	CPA
Oued Sebt	100 000	---			
El Tarf	100 000	333 330	En cours de développement		
Bejaia	100 000	---			

- Mis à part la première station de dessalement de Kahrama (Arzew), toutes les autres grandes stations de dessalement utilisent le procédé de l'osmose inverse.

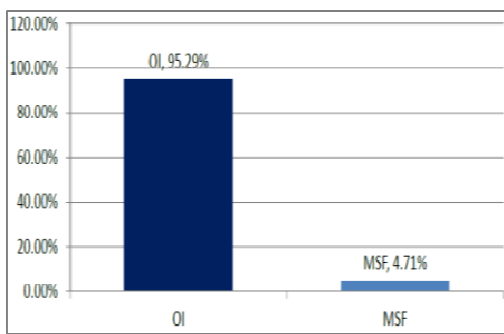


Figure1.21.Procédés des stations de dessalement en Algérie[16].

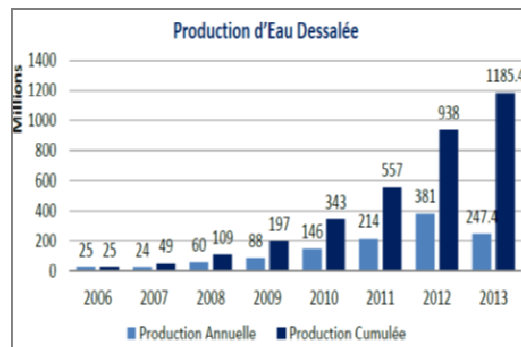


Figure1.22.Production d'eau dessalée en Algérie [16]

D'après les résultats représentés sur la figure (1.22), nous remarquons que la production annuelle d'eau dessalée était 25 MM3 en 2006. En 2012, la production annuelle est passée à 381 MM3. Au 31 aout 2013, le cumul de production d'eau dessalée a atteint 1 185 MM3 [16].

CHAPITRE 2

MODELISATION DU SYSTEME OSMOSE INVERSE PHOTOVOLTAÏQUE (OI/PV)

II.1. Introduction

Le dessalement par le procédé osmose inverse (OI) couplé à un système photovoltaïque (PV), et qui est l'objet de notre étude, a pour but de transformer l'eau de mer en eau douce en utilisant l'énergie solaire incidente qui se transforme en énergie électrique par le PV. Le but de ce chapitre est de développer un modèle mathématique global pour la prédiction des performances d'un système de dessalement solaire basé sur le principe OI, comme indique la figure 2.1.

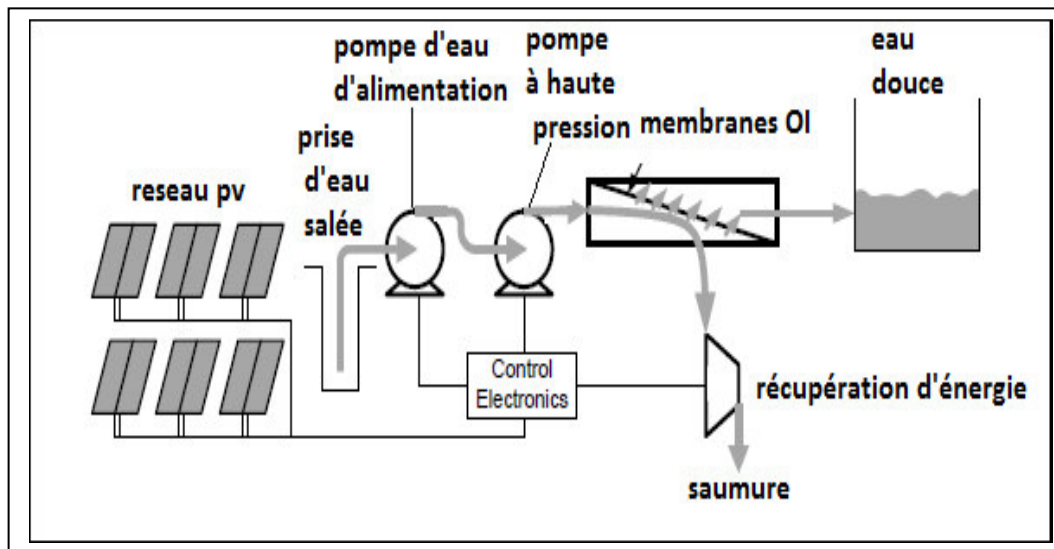


Figure2.1 : Schéma simplifié du système d'osmose inverse photovoltaïque considéré dans notre étude [20]

Nous présenterons d'abord un modèle permettant d'estimer l'éclairement solaire global par la sommation du diffus et direct, ensuite un autre du générateur PV, puis un modèle décrivant le processus Osmose Inverse. L'objectif final est de disposer des modèles suffisamment fiables afin d'étudier d'une manière détaillée et correcte la chaîne de transformation depuis l'eau de mer jusqu'à l'eau douce réalisée par un système OI-PV en calculant ses performances globales telle que la quantité d'eau produite ainsi que la quantité d'énergie consommé par le système étudié.

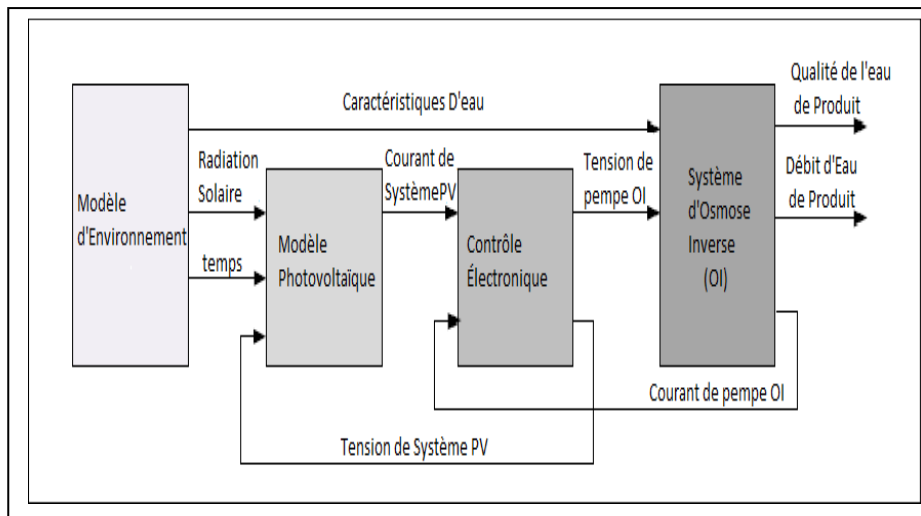


Figure 2.2: Schéma détaillé du système PV_RO considéré [20]

II.2. Modalisation mathématique du système étudié

II.2.1. Hypothèses principales

- Le sel, l'eau douce et l'eau salée sont des substances incompressibles.
- Les flux d'énergie cinétiques et potentiels sont négligeables.
- L'eau salée est considérée comme une solution diluée et est traitée comme une solution idéale.
- Les propriétés à l'état de référence sont $T_0 = 298.15 \text{ K}$, $P_0 = 1 \text{ atm}$
- , et $sel_0 = 2450 \text{ ppm}$.
- L'efficacité isentropique des pompes est fixée à 85 %.[24]

II.2.2. Sous-modèle du rayonnement

Le rayonnement solaire hors atmosphère suit une ligne directe du soleil vers la terre. En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire ne subit aucune modification (rayonnement direct), l'autre partie est diffusée par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (rayonnement diffus). La somme du rayonnement direct et diffus est le rayonnement global. Contrairement aux systèmes à concentration qui utilisent le rayonnement direct normal, les panneaux photovoltaïques utilisent le global ou le diffus pour produire de l'électricité.

Il est utile à noter que le rayonnement global est mesuré par des appareils s'appellent les pyromètres et le direct normal par des pyréliomètre ou calculé par des modèles numériques. Actuellement, plusieurs bases de données sont disponibles pour l'acquisition des données climatiques tels que, METEONORM et BSRN. Egalement, Il existe une autre méthode dite satellitaire qui consiste à prendre des images par satellite à une résolution spatiale de 2,5 km x 2,5 km et temporaire de 1 heure sur les différentes régions du monde afin de les traiter et de fournir des cartes d'ensoleillement.

-Estimation du rayonnement par ciel clair par le modèle de Perrin de Brichambaut :

Dans cette étude, on utilise la formule de Perrin de Brichambaut qui propose l'estimation du rayonnement direct et diffus, comme suit [Brichambaut, 1982]:

$$I_b = A \cdot \sin h \cdot \exp \left\{ - \left[C \sin \frac{(h+4\pi)}{180} \right] - 1 \right\} \quad (2.1)$$

$$I_d = B \cdot (\sin h)^{0.4} \quad (2.2)$$

Avec h : la hauteur de soleil

La hauteur de soleil est l'angle entre la direction du centre géométrique du disque apparent du soleil et un plan horizontal contenant l'observateur. Il est donné par :

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

Le global est estimé par sommation ou directement par :

$$I_g = D \cdot (\sin h)^E \quad (2.3)$$

Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel (voir tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.

Ciel	A W/m ²	B W/m ²	C	D W/m ²	E
Très pur	1300	87	6	1150	1.15
Moyen	1230	125	4	1080	1.22
Pollué	1200	187	2.5	990	1.25

II.2.3. Modèle du système photovoltaïque

Pour les panneaux PV, chaque cellule solaire est représentée individuellement en utilisant le modèle à deux diodes classique [16]:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Où :

I_{cell} est le courant cellulaire,

I_{ph} Représente la lumière du courant produit,

I_{D1} et I_{D2} Représentent les pertes en raison de la recombinaison (qui est la raison de la chaleur dégagée),

V est la tension d'exploitation de la cellule solaire,

R_s est la résistance de série cellulaire solaire en Ohm,

et R_{sh} Est la résistance de la cellule solaire shuntent en Ohm.

Le courant électrique est donné par :

$$I_{ph} = A_c (C_0 + C_1 \cdot T_{cell}) G_{mod,tot} \quad (2.5)$$

Où :

A_c Est la surface de la cellule en m²,

C_0 et C_1 Sont des constants spécifique à la cellule solaire,

T_{cell} Est la température de la cellule en Kelvins,

$G_{mod,tot}$ Est la radiation solaire entrante en W/m².

La température de la cellule en fonction de l'éclairement solaire est donnée par la relation suivant :

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G_{mod,tot}(NOCT - 20)}{800} \quad (2.6)$$

Où :

T_{amb} est la température ambiante en °C,

NOCT Est la température cellulaire normale d'exploitation en °C (Normal Operating Cell Temperature),

et $G_{mod,tot}$ est l'incident total d'insolation solaire sur le module en W/m².

Le modèle de panneau solaire a été développé en connectant les modèles des cellules solaires individuels montées en série, et ensuite en parallèle, dans ce modèle, toutes les cellules sont supposées identiques.

- Pour les montages en série, le courant par toutes les cellules est le même et la tension est sommée, La tension V_{string} et le courant I_{string} pour des cellules connectées en série est donnée comme suit :

$$V_{string} = n_{cell} \cdot V_{cell} \quad (2.7)$$

$$I_{string} = I_{cell} \quad (2.8)$$

Où n_{cell} est le nombre de cellules connectées.

- Pour les montages en parallèles, la tension est le même et les courants par sommation. Cette relation est exprimée comme suit :

$$I_{module} = n_{string} \cdot I_{string} \quad (2.9)$$

$$V_{module} = V_{string} \quad (2.10)$$

Où :

I_{module} est le courant du module,

V_{module} est la tension de module, n_{string} est le nombre de lignes connectées en parallèle.

Le nombre total des modules requis (N_{PVM}) pour faire fonctionner un tel système d'osmose inverse ainsi que la surface totale de PV (A_{PV}) est calculé par les équations suivantes :

$$N_{PVM} = \frac{1}{\frac{t_{hd}}{24} + (1 - \frac{t_{hd}}{24}) \alpha_{BCH} \alpha_{BDCH}} \cdot \frac{P_{DES}}{P_{PVM}} \quad (2.11)$$

Et

$$A_{PV} = N_{PVM} \cdot A_{PVC} \quad (2.12)$$

Où :

t_{hd} : Est l'heure moyenne de lumière du jour dans une région (h/jour).

P_{PVM} : Est la moyenne quotidiennement PV la production d'énergie de module.

P_{DES} : Est l'énergie exigée par l'unité de dessalement (KWh/jour).

α_{BCH} : Est l'efficacité d'imputation de la batterie.

α_{BDCH} : Est l'efficacité se déchargeant de la batterie.[20]

II.2.4. Contrôle Électronique

L'électronique de contrôle et l'ordinateur prennent la puissance étant produite par le panneau solaire et le conditionnent pour l'utilisation par les moteurs de système d'osmose inverses et les pompes. Dans cette partie des algorithmes de contrôle modèles, différents peut être mis en œuvre pour contrôler le point d'exploitation du système PV OI.

Puisque les systèmes considérés n'utilisent pas ici de batteries et la conversion de puissance n'est pas parfaite, la relation suivante est utilisée :

$$V_{\text{motor}} \cdot I_{\text{motor}} = \eta_{\text{mppt}} \cdot V_{\text{module}} \cdot I_{\text{module}} \quad (2.13)$$

Où :

V_{moteur} est la tension du moteur,

I_{moteur} est le courant du moteur et

η_{mppt} est l'efficacité de conversion de puissance du module solaire au moteur,

V_{module} et I_{module} sont la tension et le courant du module solaire calculé par les équations (2.9) et (2.10).

II.3. Moteur

Un modèle statique simple du moteur, avec la résistance du moteur supposée constante, a été utilisé pour évaluer la performance du système. Le moment de torsion de puits τ Peut être exprimé utilisant l'équation suivante :

$$\tau = \frac{(I_{\text{moteur}} - i_0)}{K_T} \quad (2.14)$$

Où :

I_{moteur} est le courant du moteur,

i_0 est la perte lié au courant

K_T sont le moment de torsion constant.

L'interne en-arrière-EMF v_m est supposé proportionnel à la vitesse du rotor Ω Via la vitesse du moteur K_V constant comme indiqué :

$$v_m = \frac{\Omega}{K_V} \quad (2.15)$$

La tension terminale du moteur v_{moteur} peut être calculée en ajoutant la perte de tension résistive à arrière-EMF v_m , comme indiqué :

$$v_{\text{moteur}} = v_m + I_{\text{moteur}} R_m = \frac{\Omega}{K_V} + I_{\text{moteur}} R_m \quad (2.16)$$

Où R_m est la résistance du moteur en Ohm.

II.4.Pompe

En raison des pressions et des débits impliqués dans le système d'osmose inverse, des pompes de déplacement positives sont généralement utilisées. Le débit produit par un déplacement positif pompe Q est trouvé utilisant :

$$Q = Dn - C_s \frac{D \Delta P}{2\pi \mu} - Q_R \quad (2.17)$$

Où n est la vitesse de pompe dans des tours par minute, D est le déplacement de la pompe volumétrique par révolution, C_s est le coefficient de glissement pompe, μ est la viscosité dynamique de l'eau, ΔP est la différence de pression à travers la pompe, Q_R est la perte de flux en raison de restriction d'écoulement d'entrée.

On peut donner le moment de torsion exigé par une pompe de déplacement positive :

$$\tau = \frac{\Delta P D}{2\pi} + C_a D \mu n + C_f \frac{D}{2\pi} + T_c \quad (2.18)$$

Où C_a est le coefficient de traînée visqueuse, C_f est le coefficient de frottement de la géométrie de la pompe, et T_c est le moment de torsion de pompe constant. Puisque le moteur et la pompe partagent le même puits, le moment de torsion du moteur et le moment de torsion de pompe sont égaux. [20]

II.5. Récupération d'énergie

Il existe plusieurs types et dispositifs de récupération d'énergie d'osmose inverses. Dans ce qui suit, seulement deux types sont présentés.

II.5.1 Pompe de clark

La Pompe de clark est un échangeur de pression de ratio fixe consistant de deux pistons connectés avec une tige, comme représenté sur la Figure 2.3. Lorsque le piston arrive en fin de déplacement, Une valve faisant marche arrière commute des rapports d'échappement et la saumure, Et le piston renverse la direction. La zone de

la tige change les zones effectives de chaque côté du piston, Et le dispositif ajoute l'énergie dans l'alimentation de pression moyenne à l'énergie dans le concentré, Production d'eau à une pression plus haute que le concentré.

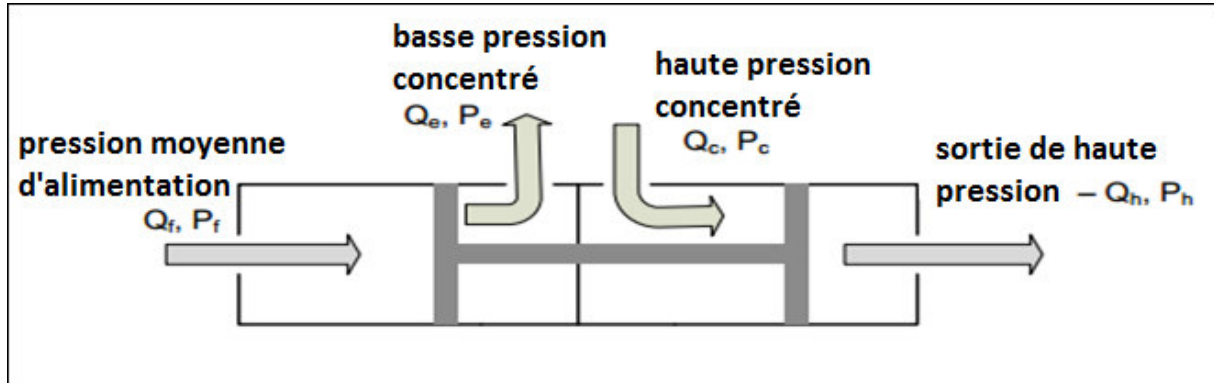


Figure 2.3: Base Mécanique de pompe de Clark.

R_t : est le taux de récupération d'un système d'osmose inverse utilisant la pompe de Clark est défini comme [22] :

$$R_t = \frac{A_r}{A_p} = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.19)$$

Où : A_p est la surface du piston,

A_r : est la surface de la tige de liaison,

Q_p : est le débit de l'eau douce,

et Q_f est le débit d'alimentation de pression moyen.

En utilisant le taux de récupération, les relations pour le débit d'eau douce Q_p et le débit de saumure Q_E , respectivement, sont [22] :

$$Q_p = R_t Q_f - Q_L \quad (2.20)$$

$$Q_E = Q_f (1 - R_t) + Q_L \quad (2.21)$$

Où Q_L est les débits de fuite dans la pompe de Clark, trouvée empiriquement l'utilisation [19] :

$$Q_L = 1.78 \times 10^{-4} Q_F P_H + 1.56 \times 10^{-5} \quad (2.22)$$

Où P_H : est la pression de l'eau d'alimentation d'entrée dans l'équipement sous pression Ol.

$$P_H = P_F + P_C(1 - R_c) - P_E(1 - R_c) - P_L \quad (2.23)$$

Où : P_F : est la pression de l'eau d'alimentation l'entrée dans la pompe de Clark,

P_C : est la pression de la saumure entrant dans la pompe,

P_E est la pression de la saumure quittant la pompe

et P_L est les chutes de pression dans la pompe. Les chutes de pression sont définies empiriquement utilisant [23] :

$$P_L = 49.2 Q_F^2 + 7.09 \times 10^{-2} \Delta P + 0.528 \quad (2.24)$$

Où : Q_F est le débit d'alimentation en L/s et $\Delta P = P_H - P_C$ en bar.

II.5.2. Les turbines Pelton

Les turbines Pelton sont utilisées depuis très longtemps pour la production d'énergie électrique sur les sites de montagne caractérisées par de faibles débits et de grands dénivelés. Leurs caractéristiques sont relativement des unités de dessalement d'eau de mer par osmose inverse.

Dans la turbine Pelton, toute l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique. La vitesse de l'eau à la sortie de la buse V_j ne dépend que de la pression H :

Soit :

$$mgH = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_j^2 \quad (2.25)$$

$$V_j = \sqrt{2g * H} \quad (2.26)$$

V_j en m/s, H en mètres.

Le diamètre de la roue D_p est la caractéristique principale :

$$D_p = \frac{V_p \cdot 60}{N \cdot \pi} = \frac{0.48 \cdot V_j \cdot 60}{N \cdot \pi} = 9.17 \frac{V_j}{N} \quad (2.27)$$

Avec :

V_p : vitesse périphérique de la roue en m/s ($V_p = 0.48V_j$).

N : vitesse de rotation en tr/min. [10]

II.6.Membrane d'Osmose Inverse

Vu la complication des stations d'osmose inverse, nous avons opté pour un modèle mathématique simplifié. Il est basé sur la solution diffusion et permet de calculer le débit des perméats (Débit du solvant et du soluté) connaissant certains paramètres : propriétés du soluté et du Solvant, salinité, surface d'échange et la pression exercée sur la membrane.

II.6.1. Equations de transport

Le modèle de transfert de masse utilisé est le modèle de solution-diffusion. Le flux du solvant J_w , qui est généralement l'eau, peut être exprimé par la première loi de Fick's. Il dépend de la pression transmembranaire et de la pression osmotique des deux côtés de la membrane (côté alimentation et côté perméats [24] :

$$J_w = A_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.28)$$

A_w est la constante de perméabilité de l'eau.

$\Delta \pi$ Représente la différence de la pression osmotique des deux côtés de la membrane. Elle est exprimée comme suit :

$$\Delta \pi = \pi_F - \pi_P \quad (2.30)$$

L'indice F est utilisé pour l'alimentation (Feed) et l'indice P pour le perméat. Pour des solutions de concentration moyennes, la pression osmotique peut être exprimée par une relation linéaire de la concentration du soluté [25]

$$\pi = k \times C \quad (2.31)$$

Où κ est un coefficient de proportionnalité [25]-[26]

La substitution de l'équation (2.31) dans l'équation (2.28) donne :

$$J_w = A_w(\Delta P - k\Delta C) \quad (2.32)$$

ΔC est la différence de concentration du soluté à travers la membrane. Elle est exprimée comme suit :

$$\Delta C = C_F - C_P \quad (2.33)$$

C_F et C_P Sont les concentrations du soluté dans l'alimentation et le perméat respectivement : Le débit volumique est exprimé de la manière suivante :

$$Q_w = \frac{J_w S_a}{\rho_w} \quad (2.34)$$

S_a : est la surface d'échange de la membrane et ρ_w est la masse volumique de l'eau. Pour le flux massique du soluté, la différence du potentiel chimique due à la pression est négligeable. Ainsi, la force motrice est exprimée entièrement par la différence de concentration.

En utilisant la loi de Fick, le flux massique du soluté est :

$$J_s = B_s(\Delta C) \quad (2.35)$$

Où B_s est le coefficient de perméabilité du soluté. Il est fonction de la composition du soluté et de la structure de la membrane.

Le débit massique du soluté est exprimé comme suit :

$$\dot{Q}_s = J_s S_a = B_s S_a (C_F - C_P) \quad (2.36)$$

Le taux de rejet de la membrane a été défini dans le chapitre II par la fraction du soluté présente dans la solution qui est stoppée par la membrane.

$$S_R = \frac{C_F - C_P}{C_F} = 1 - \frac{C_P}{C_F} \quad (2.37)$$

En utilisant les relations développées ci-dessus, le taux de rejet du soluté est exprimé comme suite :

$$\frac{1}{s_R} = 1 + \frac{B_s P_w}{A_w} \left(\frac{1}{\Delta P - \Delta \pi} \right) \quad (2.38)$$

Reprenons l'équation (2.32) et remplaçons ΔC par son expression (équation 2.33) :

$$J_w = A_w (\Delta P - k(C_F - C_P)) \quad (2.39)$$

J_w Est le flux massique du perméat (solvant). L'expression du débit volumique peut être obtenue en multipliant le flux massique par la surface d'échange et en le divisant par la masse volumique.

$$Q_w = \frac{A_w}{\rho_w} S \alpha (\Delta P - k(C_F - C_P)) \quad (2.40)$$

C_F est connue, c'est la concentration du soluté dans la charge. C_P est la concentration massique volumique du produit obtenu (eau dessalée). Elle peut être exprimée par le rapport du débit du solvant sur le débit du soluté (équation 2.36).

$$Q_w = \frac{A_w}{\rho_w} S \alpha \left(\Delta P - k \left(C_F - \frac{Q_s}{Q_w} \right) \right) \quad (2.41)$$

De la même manière, on réécrit l'équation du débit massique du soluté :

$$\dot{Q}_s = B_s S \alpha k \left(C_F - \frac{Q_s}{Q_w} \right) \quad (2.42)$$

On obtient alors le débit volumique total du perméat (eau + soluté) :

$$Q_p = \frac{Q_w \rho_w + Q_s}{\rho_w} \quad (2.43)$$

L'équation du bilan de matière global permet d'écrire :

$$Q_B = Q_F - Q_p \quad (2.44)$$

Q_B : débit volumique du retentât.

Q_F : débit volumique de l'alimentation.

Les équations (2.1 à 2.44) sont un ensemble complexe d'équations statiques dont la solution a été mise en œuvre dans Matlab.

CHAPITRE 3 :

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la méthodologie que nous avons suivie pour résoudre l'ensemble d'équations développées dans le chapitre précédent. Nous allons présenter les différents résultats obtenus pour chaque sous-modèle développé ainsi que pour le modèle global, tels que l'irradiation solaire, le rendement de système photovoltaïque et la quantité d'eau produite par le système de dessalement basé sur le principe d'osmose inverse.

2. Méthodologie

Pour chaque sous-modèle mathématique que nous avons exposé dans le chapitre II, nous avons réalisé son algorithme correspondant. Pour l'éclaircissement global, l'algorithme réalisé est évoqué ci-dessous :

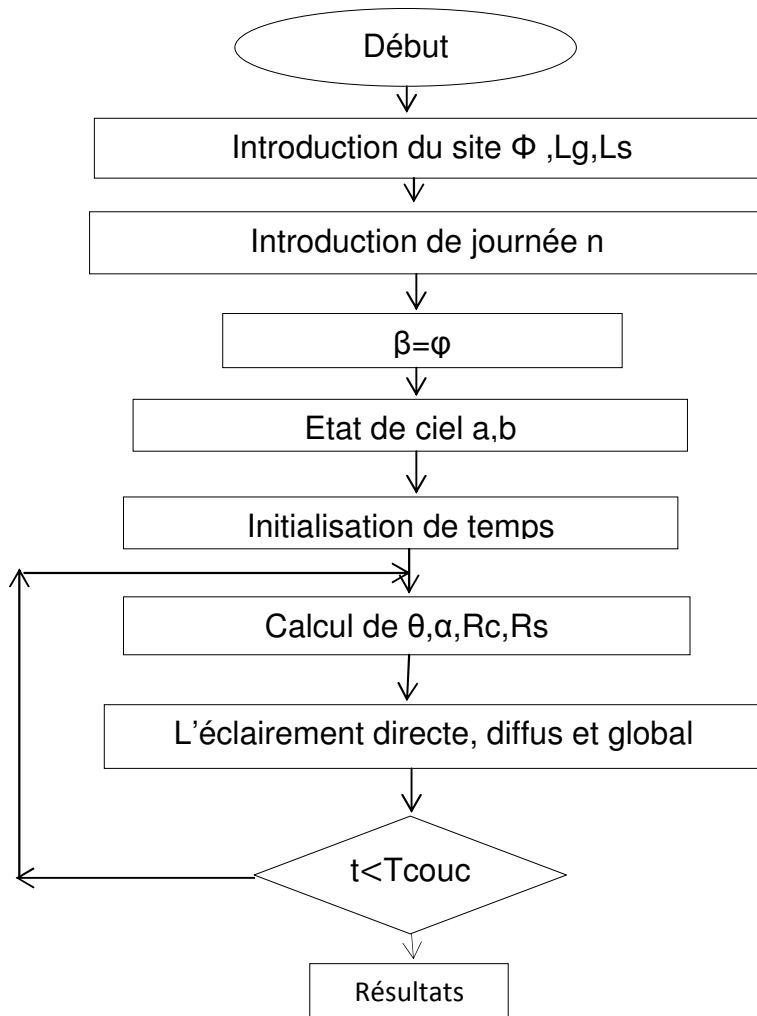


Figure 3.1 : Algorithme de l'éclairement

L'algorithme utilisé pour la simulation des performances des deux autres sous-modèles du système photovoltaïque et osmose inverse est représenté ci-dessous :

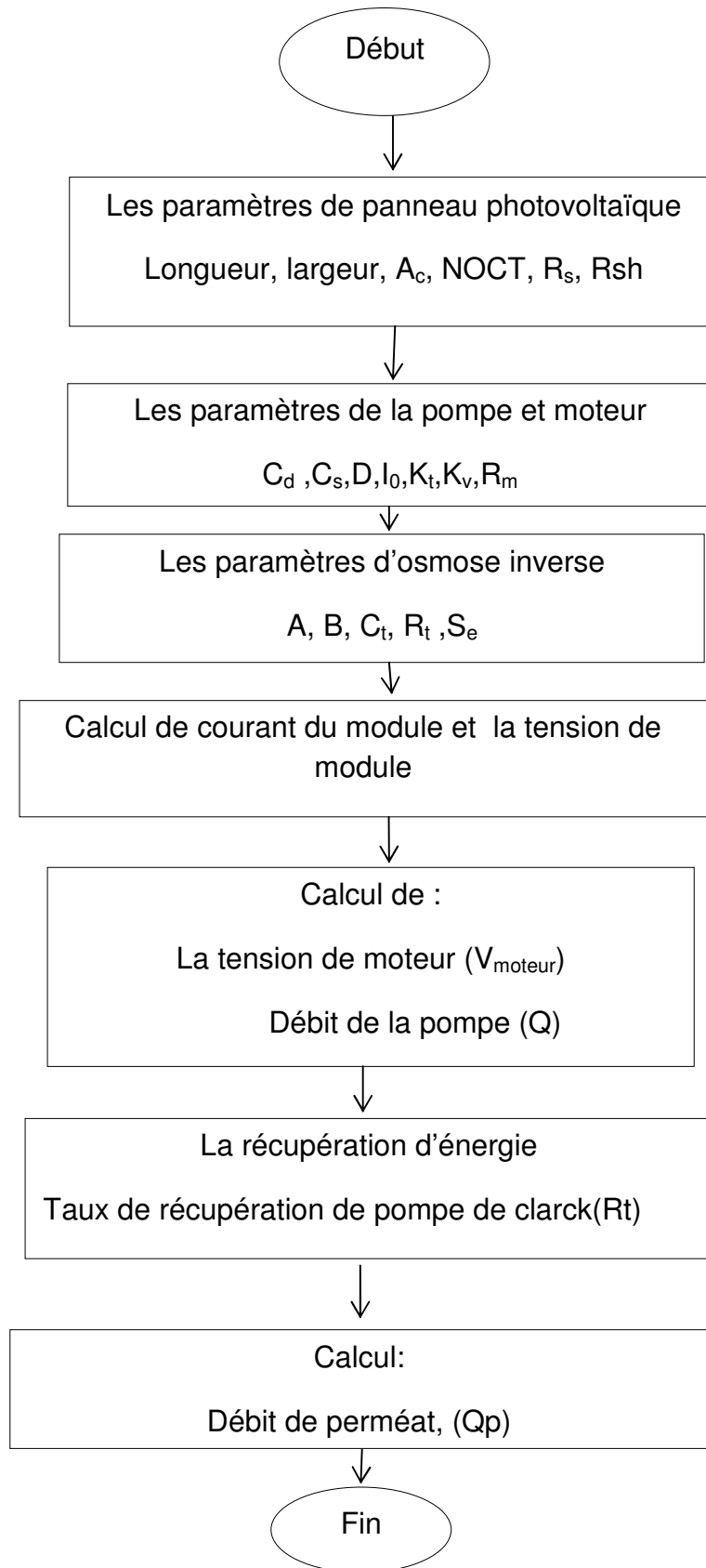


Figure 3.2 : Algorithme de système PV-OI

2.1. Description de la station de dessalement référence

La première partie consiste en présenter les résultats de notre model élaboré. A cet effet, une petite station de dessalement en osmose inverse a été choisie comme référence dont les caractéristiques géométriques et techniques sont illustrées par le tableau suivant :

2.1.1. Station de dessalement choisie comme référence

Le système choisi comme référence dans cette étude est conçu pour produire 1500L/J l'eau potable. Il est composé d'un system solaire photovoltaïque d'une pompe d'un moteur et de membrane d'osmose inverse. Le tableau suivant présente les caractéristiques principales de la station étudiée.

Composant	Caractéristiques	Valeur
Panneaux solaire	A_c Surface de cellule PV, C_0 la lumière actuel constant NOCT La température cellulaire normale d'exploitation n_{cell} numéro du cellules connecté en série n_{string} numéro des séries du cellules connecté en parallèle R_s résistance de série cellulaire solaire R_{sh} résistance de dérivation de cellules solaires	1.489×10^{-3} 3.318 (A/W) 45°C 72 1 1.911×10^{-3} (Ω) 1296 (Ω)
Pompe et moteur	C_d coefficient de traînée visqueuse C_f Coefficient de frottement de pompe C_s Coefficient d'erreur de pompe D le déplacement volumétrique par révolution de la pompe K_t Moment de torsion du moteur constant K_v la vitesse de moteur	3.803×10^{-4} (N.m/bar.L) 4.033 (N.m/bar.L) 3.361×10^{-10} 2.60×10^{-3} (L/rev) 2.252 (A/N.m) 1.824 (rev/V.s)

	R_m résistance de moteur	0.1546 (Ω)
	T_c moment de torsion de pompe	0.05 Nm
Membrane d'osmose inverse	A perméabilité de l'eau dans la membrane	3.111×10^{-4} (L/m ² .bar.s)
	B perméabilité de cel dans la membrane	1.9481×10^{-5} (L/m ² .s)
	S_E surface de la membrane	2.8 m ²
Autre caractéristique	C_f concentration de cel dans l'eau d'alimentation	35000 mg/L
	R_t taux de récupération de pompe de clarck	0.090

Tableau 3.1 : Caractéristiques de la station OI étudiée

3. Résultats et discussions

3.1. Résultats du model d'éclairement

Nous avons choisi la région de de Bouismail(w. de Tipaza) pour étudier la variation de l'éclairement direct et global en utilisant le model de Brichambaut. Les résultats sont donnés par les figures ci-dessous.

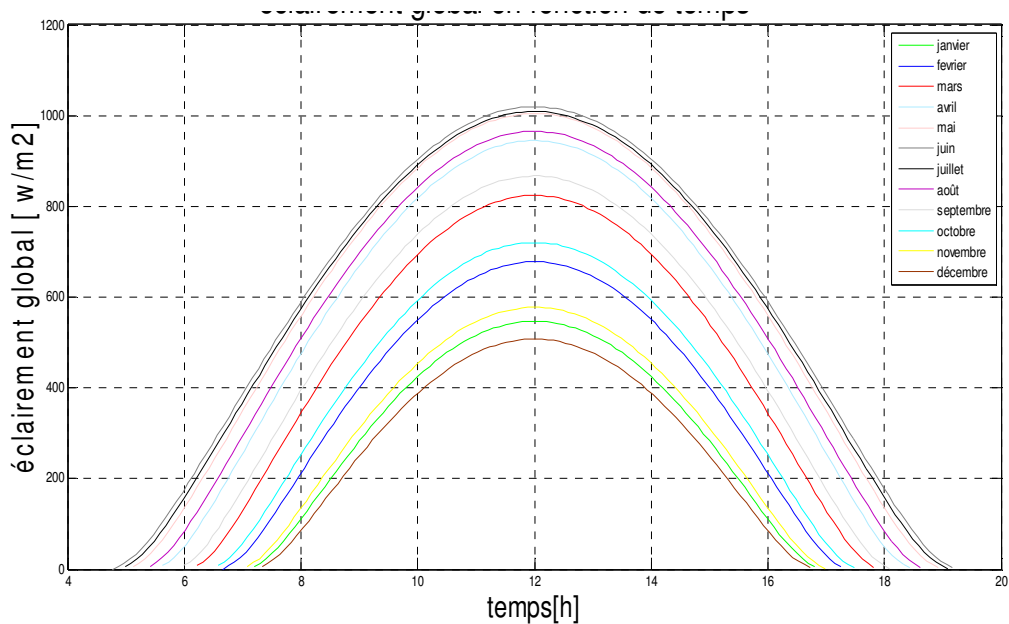


Figure 3.1: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site de Bousmail

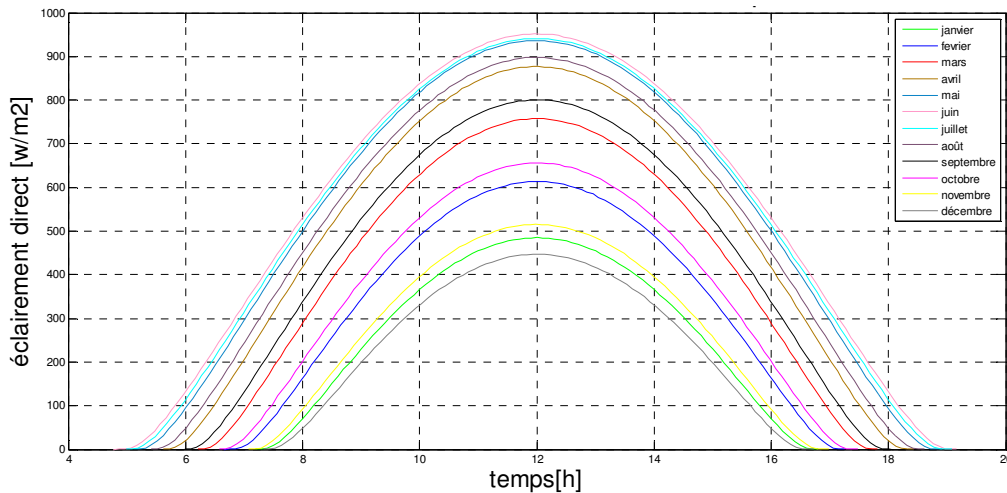


Figure 3.2: Eclairement direct en fonction du temps pour le site de Bousmail.

On remarque que les graphes de l'éclairement direct et l'éclairement global ont une forme en cloche pour tous les jours de l'année. On constate aussi que l'éclairement est minimal au mois de décembre et maximal au mois de juin, tandis qu'il est moyen au printemps et en automne.

1.1. Résultats du model photovoltaïque

Le graphe caractéristique des panneaux photovoltaïque est celui de (I-V), l'intensité du courant en fonction de la tension ainsi que la puissance produite en fonction de la tension, comme indiquent les figures 3.3 et 3.4.

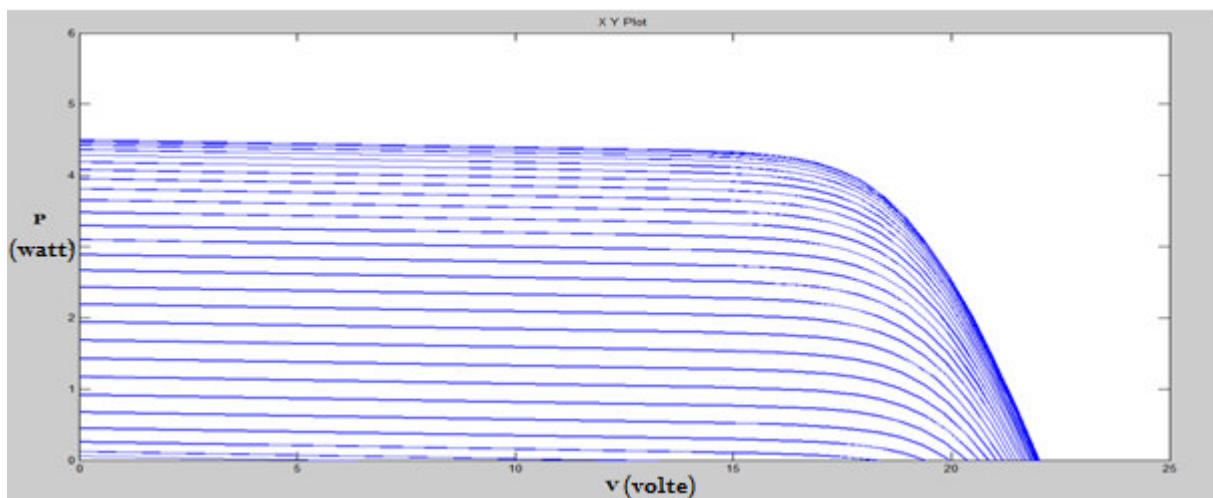


Figure 3.3 : graphe caractéristique du panneau photovoltaïque étudié

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

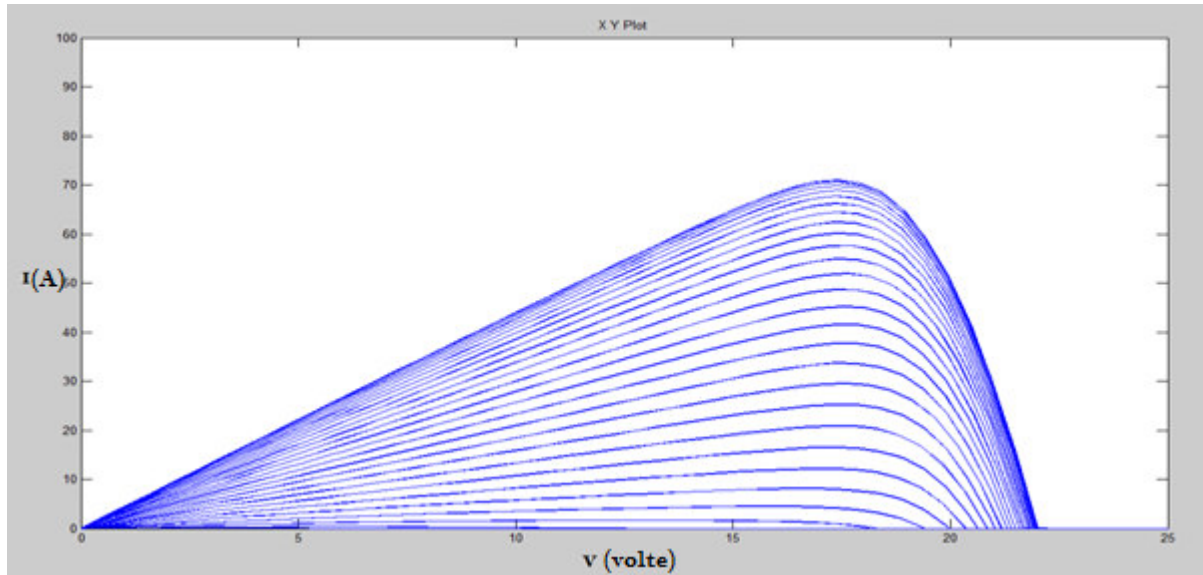


Figure 3.4 : Le courant produite par les panneaux photovoltaïque en fonction de la tension

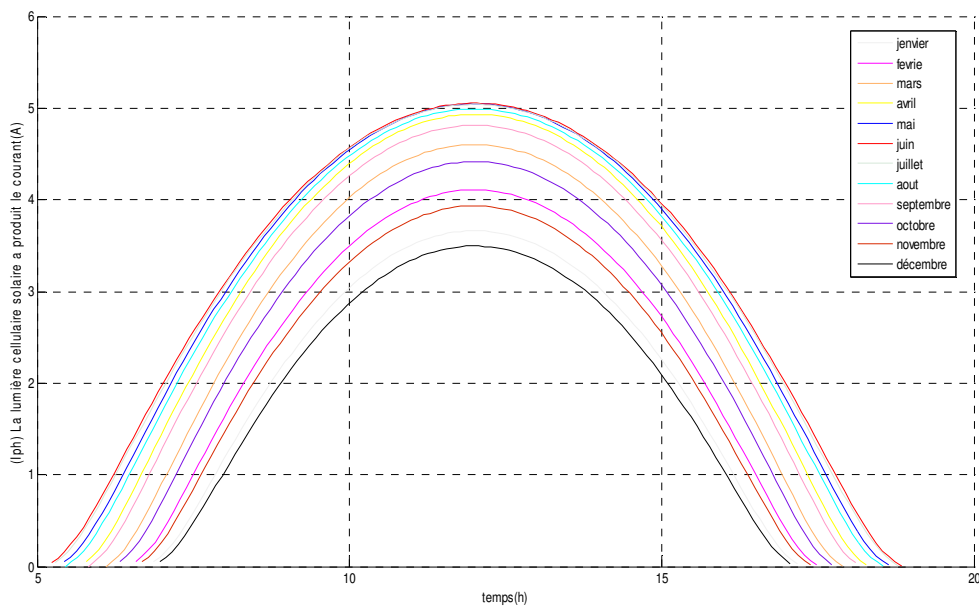


Figure 3.5 : La lumière cellulaire solaire produit le courant en fonction de temps

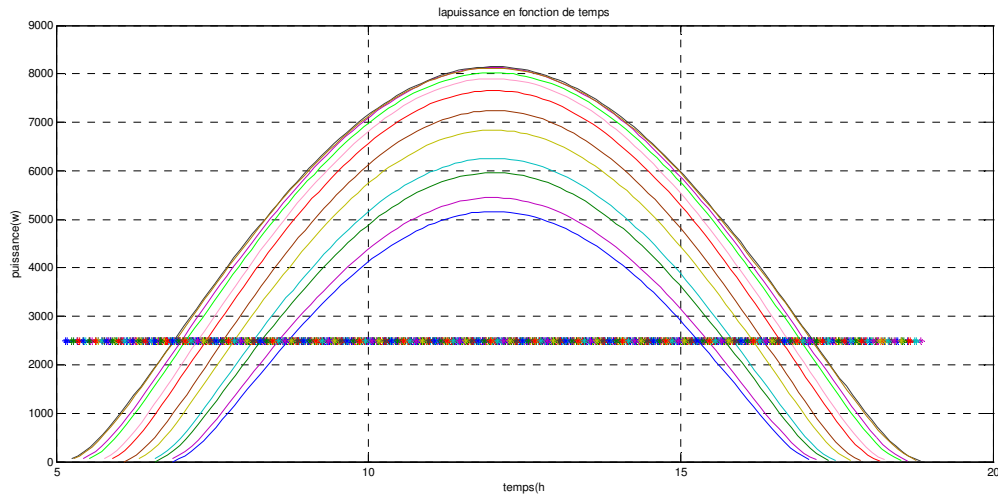


Figure 3.5: Graphe de la puissance de system PV en fonction du temps pour le site de Bousmail.

On remarque que les graphes de la puissance ont une forme en cloche pour tous les jours de l'année. On constate aussi que la puissance est minimal au mois de décembre et maximal au mois de juin, tandis qu'il est moyen au printemps et en automne et Cette ligne représente la moyenne de la puissance dans le mois au cours duquel un éclairage minimal, ce qu'il faut prendre en considération lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque (Nombre de panneaux requis)

En ce qui concerne le système osmose inverse considéré dans notre étude, les graphes 3.6 jusqu'au 3.14 présentent les performances de ce dernier au niveau de la membrane ainsi que le récupérateur d'énergie (pompe de clark)

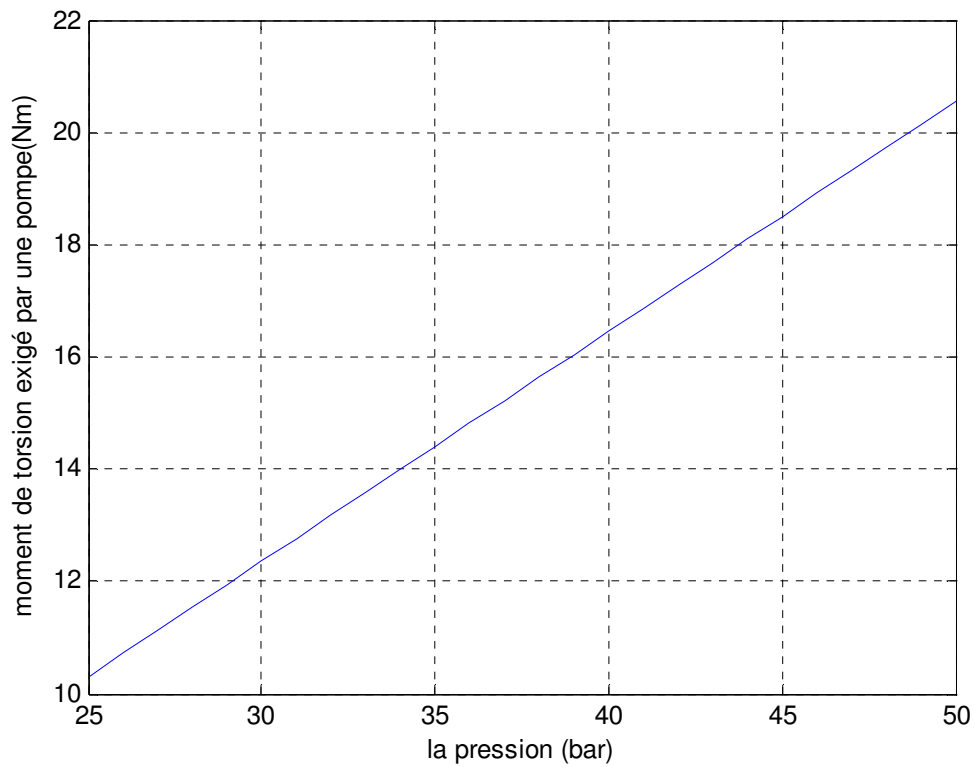


Figure 3.6 :Moment de torsion exigé par une pompe on fonction de pression

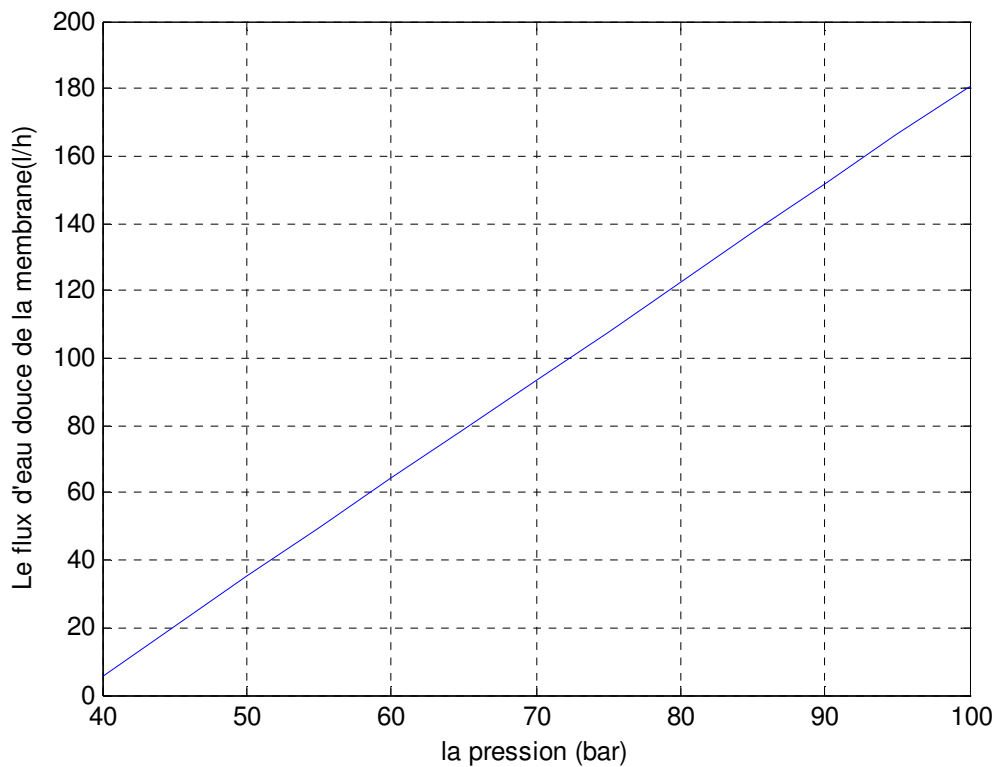


Figure 3.7 : Le flux d'eau douce de la membrane en fonction de la pression.

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

Les figures 3.6 et 3.7 présentent l'influence de la pression de fonctionnement sur la torsion de la pompe haute pression ainsi que sur le flux d'eau douce produite par la membrane. On remarque que le moment de torsion exigé par une pompe et le flux d'eau douce de la membrane augmente linéairement avec l'augmentation de la pression.

Le choix de la pression de fonctionnement doit être basé sur ces deux figures. Ce qui influe sur la consommation énergétique et par la suite sur le coût de l'eau produite

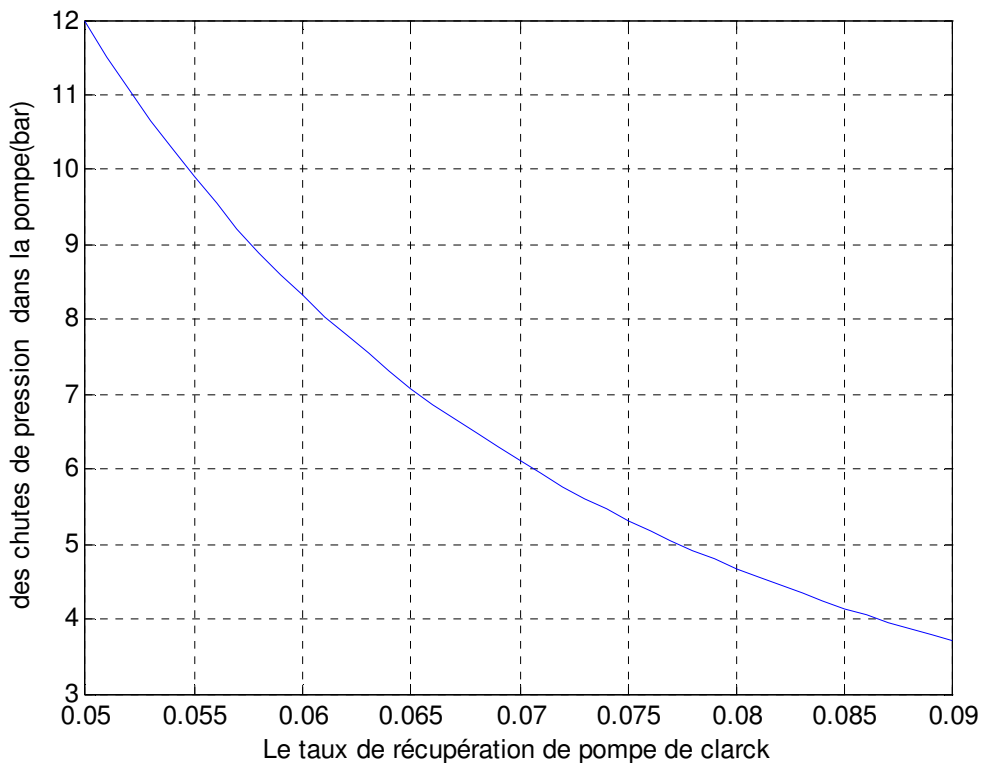


Figure 3.8 : Perte de pression dans la pompe en fonction de taux de récupération de la pompe de Clark.

Les pertes de charge au niveau des pompes haute pression est un paramètre important, ce qui est présenté en fonction du taux de récupération par la figure 3.8. On constate que les chutes de pression diminuent si le taux de récupération augmente

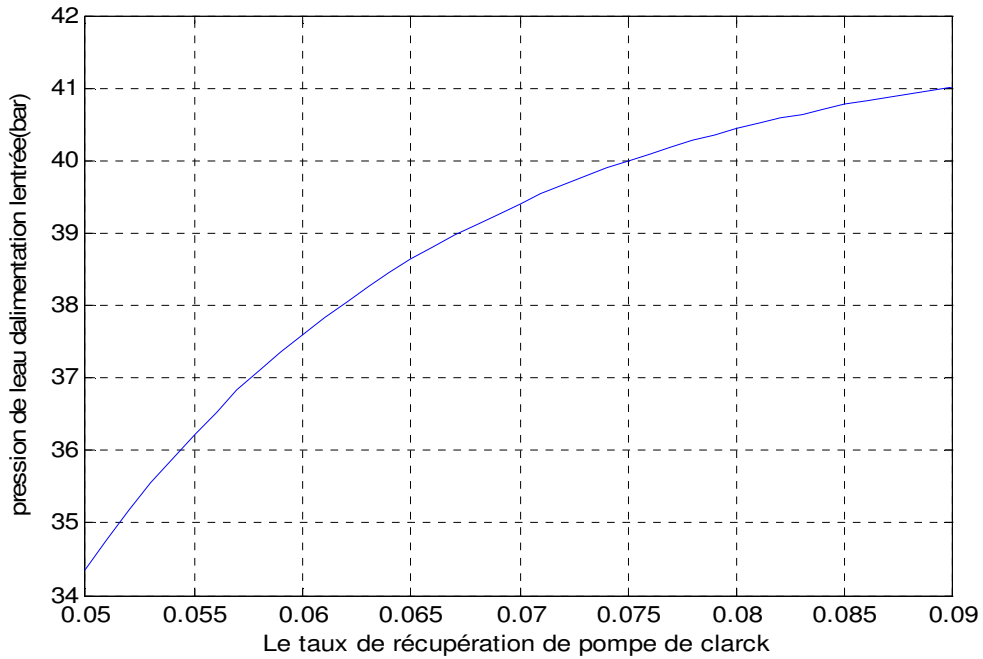
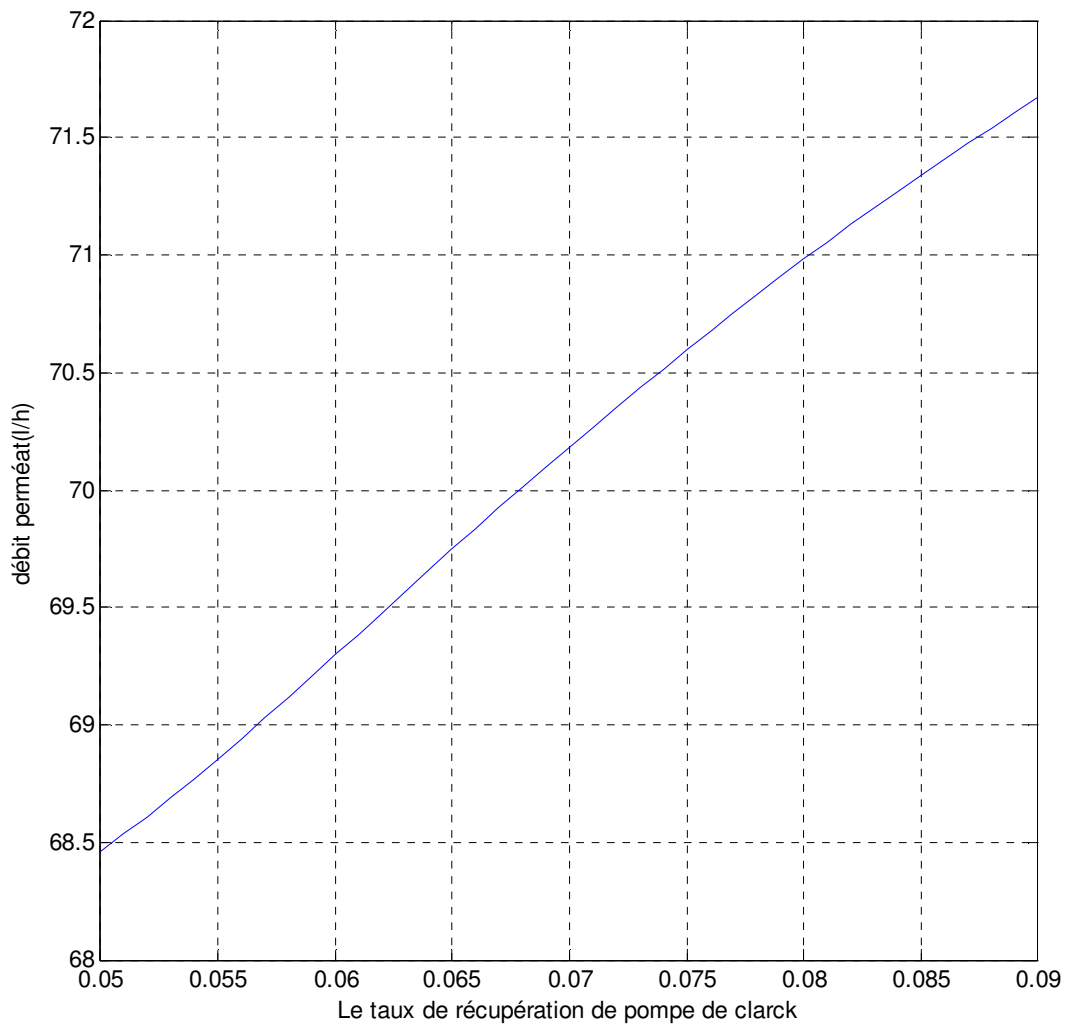


Figure 3.9 : La pression de l'eau d'alimentation d'entrée en fonction de taux de récupération de pompe de clarck.

La pression de l'eau d'alimentation est un paramètre décisif. La figure 3.9 le présente en fonction du taux de récupération. On constate que la pression de l'eau d'alimentation d'entrée augmenté si le taux de récupération augmente



3.10 : Le débit du perméat en fonction de taux de récupération de pompe de clark.

On ne constate que le débit de perméat augment presque linéairement avec l'augmentation de taux de récupération de pompe de clark.

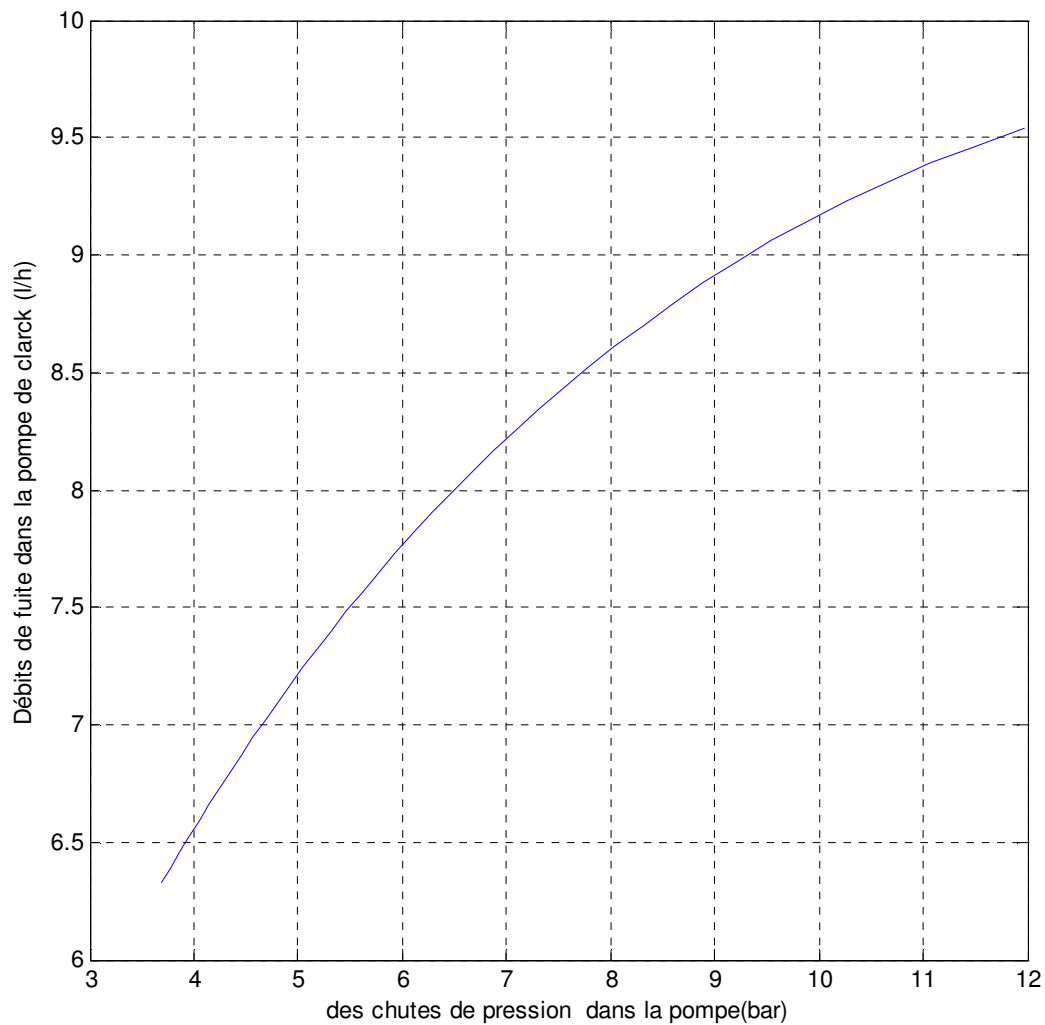


Figure 3.11 : le Débits de fuite dans la pompe de clarck en fonction des chutes de pression dans la pompe

On constate que le Débits de fuite dans le pompe de clarck est augmenté en fonction des chutes de pression.

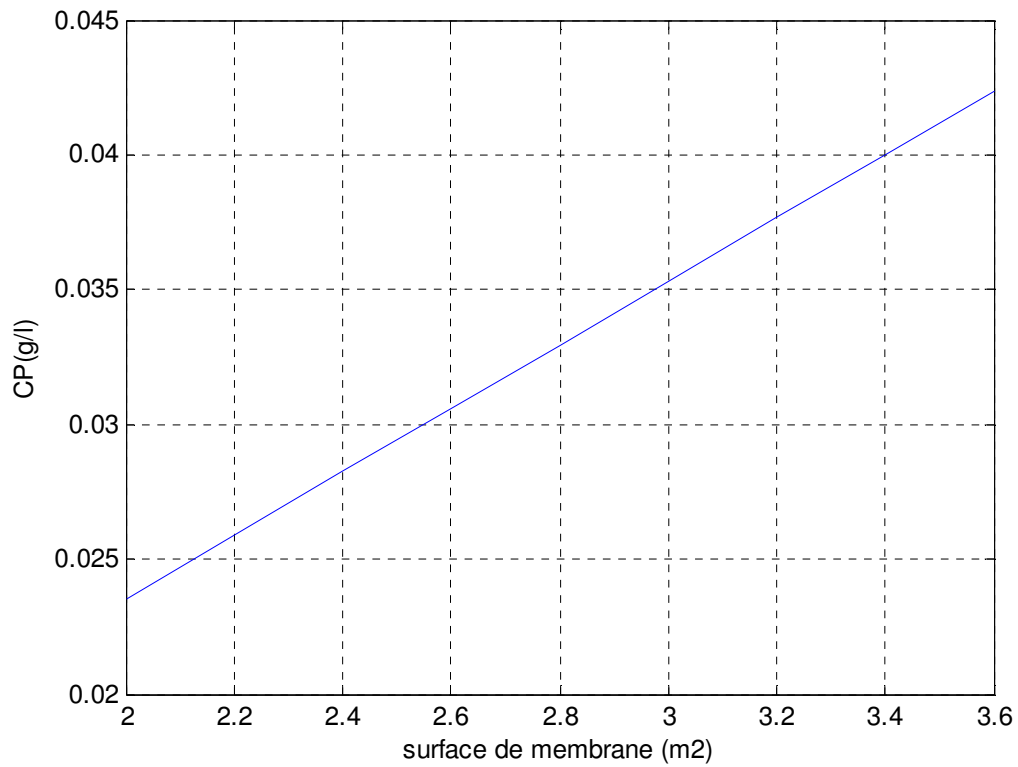


Figure 3.12 : le CP (la concentration de sel dans l'eau douce) en fonction de surface de la membrane.

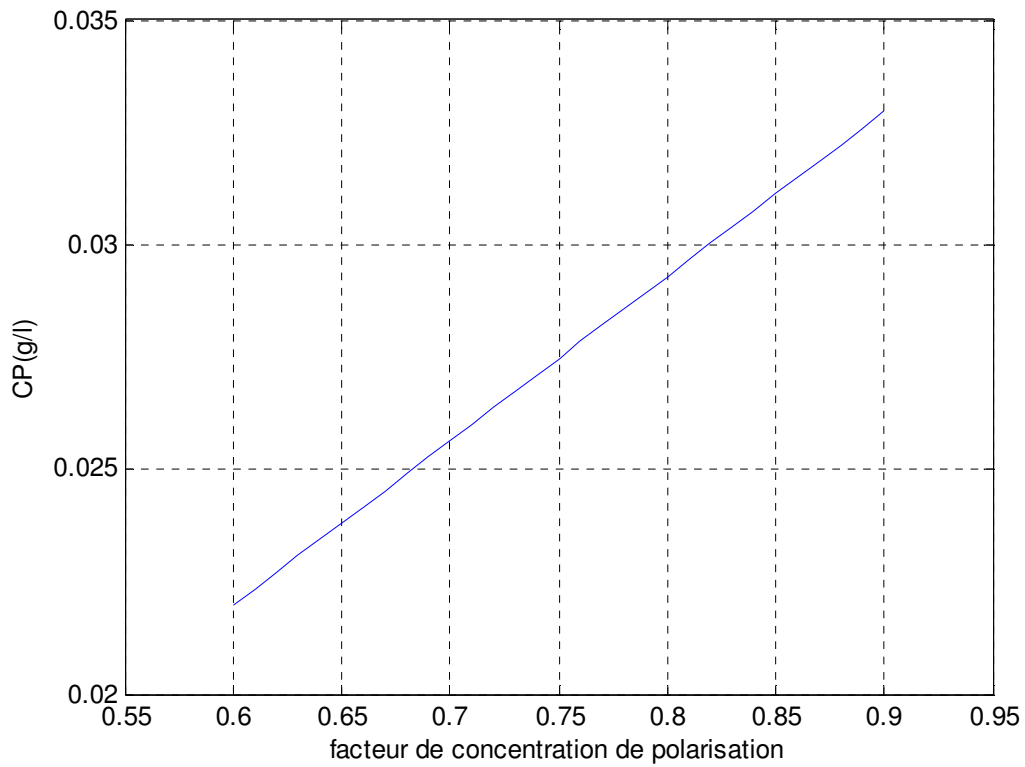


Figure 3.13 : le CP (la concentration de sel dans l'eau douce) en fonction de facteur de concentration de polarisation

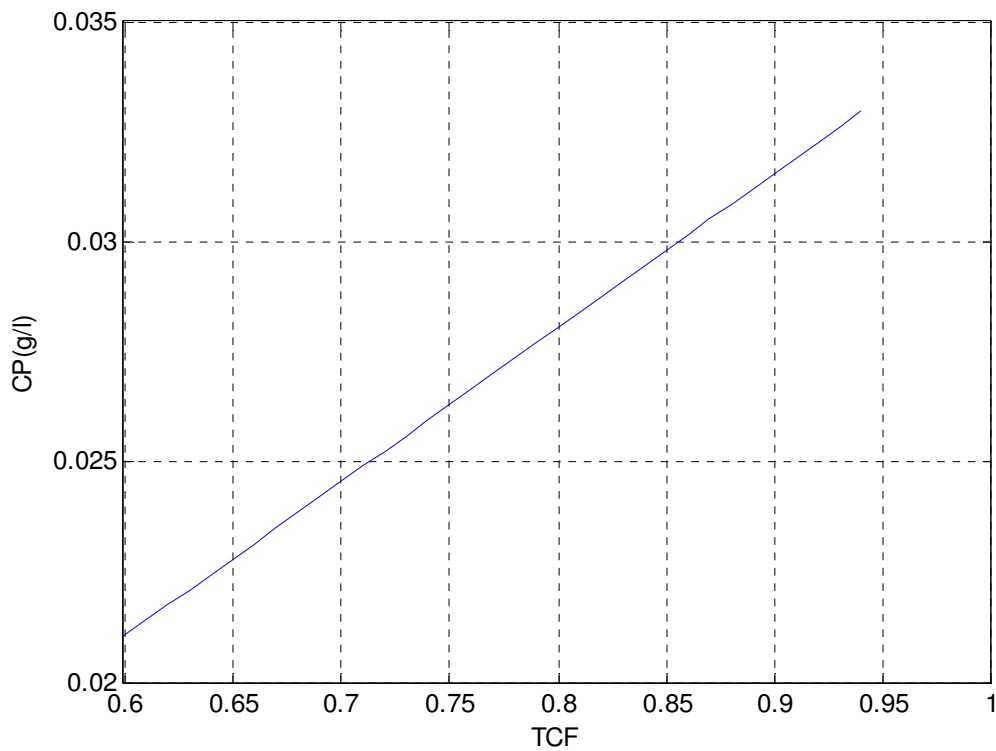


Figure 3.14 : Le CP (la concentration de sel dans l'eau douce) en fonction de TCF

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

Dans les figures (3.12/3.13/3.14) le CP augmente linéairement avec l'augmentation de la surface de la membrane, le facteur de concentration de polarisation et le TCF respectivement.

Conclusion générale

Le but de ce travail était de développer un modèle mathématique décrivant le procédé d'osmose inverse fonctionnant en énergie solaire et plus précisément un système photovoltaïque. Pour ce faire trois sous-modèles ont été élaborés, chacun représente un composant de la station étudiée.

Il est utile de noter que le sous- modèle du système osmose inverse photovoltaïque comporte trois sous-modèles pour chacun de ses composants essentiels (récupération, pompe et membrane). Un programme en MATLAB a été développé afin d'estimer les différentes performances du système considéré dans cette étude.

Une petite station a été choisie pour valider notre programme de calcul. La difficulté que nous avons rencontré est la validation de nos résultats car la station de dessalement de l'UDES n'est pas encore prête pour mener l'étude expérimentale comme prévue.

Dans ce travail, un ensemble de tâches ont été exécutées et de conclusions tirées :

- La modélisation mathématique suivie par une simulation numérique d'une variation annuelle d'éclairement direct et global.
- La modélisation mathématique suivie par une simulation d'un générateur photovoltaïque.
- La modélisation mathématique suivie par une simulation dynamique d'un système osmose inverse: on obtient, comme résultat la variation de la consommation énergétique et la production journalière de cette station ainsi que quelques autres paramètres importants.

- [1] Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B., Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie, février (2004).
- [2] [Farid TATA-DUCRU Janvier 2009 : « Dessalement de l'eau de mer bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes » Agence Française de Développement]
- [3] [« larbaouikarima»universitéhassiba ben bouali-chlef : analyse de la condensation de vapeur d'eau en présence de gaz non condensable dans un système de dessalement intégré]
- [4] [http://www.swim-sm.eu/files/BAT_on_Desalination_Final_FR.pdf
Version RÉVISÉE du Rapport final Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le Dessalement en zones rurales/locales]
- [5] [<http://www.lycee-kerichen.org/dossiers/ProjetInde/page5.html>]
- [6] [Jean-Pierre Méricqle 9 décembre 2009 : « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire » THÈSE En vue de l'obtention du Doctorat de l'université de Toulouse ; Génie des Procédés et de l'Environnement.]
- [7] [<http://www.lenntech.fr/procedes/pesticide/nanofiltration/nanofiltration-fr.htm>]
- [8] Les cours de professeur monsieur CHIBOUB FELALH de la licence 2012.
- [9] <http://www.lenntech.fr/procedes/dessalement/osmoseinverse/dessalement/osmoseinverse/procede-de-dessalement.htm#ixzz2xlj4eYjy> consulté le 08/04/2014.
- [10] <Alain Maurel> dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtre et autre procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce <2eme édition>
- [11] [<http://www.hydranet.net> Traitement des eaux potables Osmose inverse]
- [12] <http://www.lenntech.fr/francais/membrane-technologie.htm>
- [13] (<https://dessalement.wordpress.com/losmose-inverse/>)
- [14] A.KettabandM.Metaiche, Dessalement en Algérie : Situation actuelle et programme de développement, conference (2004).
- [15] H.LuganandK.Fethi, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres par osmose inverse: les bonnes pratiques d'ingénierie (workshope), MEDRC (27-3)(2008).
- [16] Station de dessalement d'eau de mer : benisaf Algérie 200.000 m3/j, Conférence WEX NorthAfrica2013, <http://www.cuniv-aintemouchent.dz/files/eau42014.pdf>
- [17] H.Boyé, Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée, Plan Bleu(2008)
- [18] S.Kehal, Rétrospective et perspectives du dessalement en Algérie, Desalination 136 (2001) (35- 42)

- [19] S. Moussaoui, L'Algérie investit gros dans le dessalement de l'eau de mer(2008).
- [20] [photovoltaic reverse osmosis- Feasibility and a pathway to develop technology / Amy M. Biltona*, Leah C. Kelley, Steven Dubowsky].
- [21] [thermodynamic analysis of a reverse osmosis desalination unit with energy recovery system / A. AL-Zahrani, J. Orfi*, Z. AL-Suhaibani, B. Salim and H. AL-Anasry].
- [22] [Thomson AM. Reverse-osmosis desalination of seawater powered by photovoltaics without batteries. Ph.D. thesis, Loughborough University; 2003].
- [23] (C. Koroneos, G. Roubas, A. Dompros / renewable energy driven desalination systems modelling. / journal of cleaner production 15 (2007) 449_464)
- [24] N.M. Al-Bastaki and A. Abbas, Predicting the performance of RO membranes, Desalination, 132, 181–187, 2000
- [25] N. Al-Bastaki and A. Abbas, Long-term Performance of an Industrial Water Desalination Plant, Chemical Engineering and Processing, 43(4), 555-558, 2004
- [26] [/ A. Abbas, Simulation and Analysis of an Industrial Water Desalination Plant, Chemical Engineering and Processing, 44 (9), 999-1004, 2005.].