

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des sciences de la technologie

Département génie mécanique



جامعة عبد الحميد بن باديس - ماستغانم
ABDELHAMID IBN BADIS UNIVERSITY OF MOSTAGANEM

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie mécanique

Par

MONSIEUR : ZIANE BERROUDJA MOHAMMED EL AMINE

Thème :

**Développement d'un nouveau système intégré de dessalement
membranaire à énergie solaire**

RETIEL NOUREDDINE	Professeur	Université de Mostaganem	Président
MOUDJEBER DJAMEL-EDDINE	MCA	Université de Chlef	Directeur de thèse
DJENNAD M'HAMED	Professeur	Université de Mostaganem	Co-Directeur de thèse
BENACHOUR DJAAFAR	Professeur	Université De Sétif	Examineur
SPAHIS NAWEL	Professeur	Université de Chlef	Examineur
GHEZZAR REDOUNE	Professeur	Université de Mostaganem	Examineur

*À ma très chère Maman,
À mon très cher Papa,
Je leur dédie mon travail !
À ma femme
À mes enfants :
IBRAHIM, IYLAF, IYAD
À toute ma famille !*

REMERCIEMENTS

Dans le registre des remerciements, comment ne pas commencer par celui :

- qui a fait germer en moi l'idée de préparer ce doctorat ;*
- qui m'a proposé ce thème très intéressant qu'est le dessalement de l'eau de mer ;*
- qui m'a accompagné, encouragé, boosté tout au long de ces années ;*
- qui m'a fait partager sa perspicacité, sa rigueur scientifique et sa compétence ;*
- qui a cru en moi...*

Il s'agit, évidemment, de mon ex-directeur de thèse, mon ami, le Pr MAHMOUDI Hacène que je ne remercierais jamais assez, qu'il trouve ici, l'expression de ma parfaite reconnaissance et de ma grande gratitude.

Mes remerciements vont également à mon directeur de thèse qui a accepté de m'encadrer et m'a encouragé, le Dr MOUDJEBER DJAMEL EDDINE, qu'il trouve ci, l'expression de toute ma reconnaissance.

Merci également à mon co-directeur de thèse, le Professeur Djennad M'hamed de l'université de Mostaganem pour son assistance et ses encouragements.

Un grand Merci au Dr Retiel Noredine de l'Université de Mostaganem qui m'a grandement facilité mes inscriptions et qui, lui aussi, a cru en moi. De plus, il me fait l'honneur de présider mon jury : quel bonheur, merci pour tout !

Mes remerciements vont également au Professeur Spahis Nawel de l'Université de Chlef, au Professeur GHEZZAR REDWAN de l'Université de MOSTAGANEM ainsi qu'au Professeur BENACHOUR DJAAFAR de l'université de SETIF, pour les efforts qu'ils ont consentis pour examiner notre travail.

Sommaire

Nomenclature.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
Abstract	
Résumé	
Introduction générale.....	3

Chapitre I : Techniques membranaire

I .Introduction.....	6
I.1.Membrane technologie.....	7
I.2.Classification des membranes.....	9
I.2.1. Selon leur nature.....	9
I.2.2 Selon leur fabrication.....	17
I.2.3 Selon leur porosité.....	18
I.3 Procédés baromembranaires.....	19
I.3.1 L'osmose inverse.....	20
I.3.2 L'ultrafiltration.....	21
I.3.3 La nanofiltration.....	21
I.3.4 La Microfiltration (MF).....	21
I.4 Préparation des membranes.....	24
I.5 Développement de l'unité de distillation membranaire (MD).....	30
I.6 Cristallisation.....	33
I.7 Le prétraitement dans l'osmose inverse.....	34
I. 8 Avenir de la technologie membranaire.....	40

Chapitre II : Techniques de dessalement

II .Le dessalement de l'eau de mer.....	42
II.1 Problématique.....	42
II.1.1 Origine de l'eau sur la terre.....	43
II.2 Propriétés de l'eau.....	44
II.3 Procédés de dessalement.....	45
II.3.1 Les Procédés de distillation.....	46
II.3.2Les Procédés membranaire.....	50
II.3.3 Procédé de congélation.....	53

Chapitre III : Dessalement et énergie renouvelable ; un choix stratégique.

III. INTRODUCTION.....	55
III.1 Association des procédés à distillation avec l'énergie solaire.....	57
III.2 Les procédés à membranes associée à l'énergie solaire.....	59
III.3 Dessalement solaire.....	60
III.4 Coûts du dessalement.....	70
III.5 Le dessalement en Algérie.....	73

Chapitre IV : Système intégré de dessalement membranaire à énergie solaire: étude de cas au Sud Algérien.

IV.1 Introduction:.....	78
IV.2 Applications des systèmes intégrés :... ..	78
IV.3 Technologies émergentes de dessalement :.....	79
IV.4 Membrane de distillation:.....	80
IV.5 Humidification-déshumidification dans une serre de Dessalement.....	82
IV.6 Couplage de l'humidification de l'eau saumâtre - déshumidification dessalement en serre avec distillation membranaire pour le Sud de l'Algérie : une étude de cas :.....	83
IV.7 Préoccupations environnementales, potentiel du marché et facteurs réglementaires:.....	85
IV.8 Conclusion :.....	86

Chapitre V :

Présentation et exploitation du logiciel REtScreen

V.1 Introduction	88
V.2 Condition de référence du site.....	88
V.3 Interprétation des résultats.....	92

Chapitre VI : Présentation et exploitation de la serre

VI .Exploitation de la serre.....	95
VI.1 Technologie existante de refroidissement et déshumidification.....	95
VI.2 Éolienne.....	100
VI.3 Modules photovoltaïques.....	101

Chapitre VII : Résultats & Discussions

VII.Résultats et discussions.....	103
VII.1.Modèle énergétique (Production).....	103
VII.2 Le taux de déshumidification.....	109
VII.2.1La condensation	109
VII.2.2 Horaires.....	112
VII.3 Modèle énergétique (consommation).....	112
VII.4 Système de production d'électricité.....	113
VII.4.1 Éolienne.....	113
VII.5 Émission de gaz à effet de serre	116

CONCLUSION GENERALE

Conclusions et recommandations.....	119
-------------------------------------	-----

Référence bibliographique.....	121
--------------------------------	-----

Annexes.....	132
--------------	-----

Nomenclature

A : la surface effective. m^2

CAP : charbon actif en poudre

COP : Coefficient de Performance

CH₄ : méthane.

CO₂ : dioxyde de carbone

FC : thin film composite avec substrat nanocomposite.

Ha : L'enthalpie de l'air kJ/kg d'air sec.

HPB : booster de pression hydraulique

k_m : une constante de diffusion pour la membrane,

k_{ms} : une constante de diffusion à travers l'interface membrane-solution,

k_{sm} : une constante de diffusion à travers l'interface solution-membrane,

m : une constante liée à l'épaisseur de la membrane.

M : la masse molaire.

MCr : cristallisation membranaire.

MD : Distillation Membranaire.

MF : la microfiltration.

MSF : distillation multi-Flash

NF : nanofiltration.

NTC : nanotubes de carbone

N₂O : protoxyde d'azote

OG : oxyde de graphène

OI : osmose inverse

P : La perméabilité.

P_{niveau} : représente la pression atmosphérique au niveau de la mer (c.-à-d. 101.3 kPa)

PE : polyéthylène

PP : polypropylène

PVDF : fluorure de polyvinylidène

Q : le poids total du perméat traversant la membrane,

q_{ma} : le débit massique de l'air (en kg d'air sec/s)

q_{me} : le débit massique de l'eau (en kg d'eau/s)

q_{va} : le débit volumique de l'air (en m³/s)

R : la résistance thermique effective globale. [m². °C/W].

s : section transversale de la conduite m²

SDI : limon densité indice.

SWG : Serre solaire de dessalement.

t : période de temps spécifique (s)

TFN : thin film nano composite

TDS : solutions de salinité totale dissoute (ppm).

Tr : La température de rosée °C.

Ts : La température sèche °C

Th : La température humide °C

U : la conductance thermique effective globale. W/ m²/°C

v : vitesse air moyenne dans la conduite (m/s)

wa : L'humidité absolue (g/kg d'air sec)

wb : L'humidité absolue est de (g/kg d'air sec.)

x : l'humidité absolue de l'air avant humidification (en gr d'eau/kg d'air sec).

α_{ij} : La sélectivité

β_{ij} : Le facteur de séparation

ΔP : gradient de pression

Δf : gradient de potentiel électrique.

$\Delta \mu_i$: gradient de potentiel chimique.

λ : la distance minimale entre les positions équivalentes.

ρ : la masse volumique de l'air (en première approximation : 1,2 kg/m³).

Φ : L'humidité relative (l'hygrométrie). (%)

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Gamme de température et de pH d'utilisation de quelques types de membranes organiques.....	11
Tableau I.2 : Procédés membranaires classés selon la taille des pores.....	20
Tableau III.1 : Puissance produite pour chaque type d'éolienne.....	69
Tableau III .2 : Ordre de grandeur des investissements pour les différents procédés de dessalement.....	72
Tableau V.1 : température et humidité relative et vitesse de vents, en fonction des mois d'une année.....	91
Tableaux VII.1 : énergie produite par la pompe à chaleur.....	103
Tableau VII .2 : rendement saisonnier de système de production de chaleur	104
Tableaux VII 3 : facteurs de performance énergétique influencent sur la serre.....	104
Tableau VII.4 : caractéristique ventilateur.....	107
Tableau VII.5 : caractéristique éclairage.....	107
Tableau VII.6 : caractéristique pompe.....	108
Tableau VII.7 : températures à l'intérieur de la serre.....	112
Tableau VII.8 : consommation énergie.....	113
Tableau VII.9 : vitesse du vent, puissance, énergie.....	114
Tableau VII.10 : émission des effets de serre.....	117

Liste des figures :

Figure I.1 : Schéma explicatif du principe de filtration membranaire (en mode tangentiel).....	8
Figure I.2 : Classification des membranes.....	17
Figure I.3 : La classification des membranes selon la nature des matériaux des membranes..	20
Figure I.4 : Types de membranes nanocomposites.....	13
Figure I.5 : Préparation des revêtements par méthode sol-gel.....	14
Figure I.6 : Trois méthodes typiques de fabrication de membranes composites : (a) la méthode de mélange physique ; (b) la méthode sol-gel ; et (c) la méthode d'infiltration	15
Figure I.7 : Description des différents types de membrane	19
Figure I. 8. Représentation des différents types de procédés membranaires.....	19
Figure I.9 : Mise en évidence de l'osmose inverse.....	20
Figure I.10 : Principe de l'ultrafiltration (d'après site Internet relatif au génie alimentaire).....	21
Figure I. 11 : Module tubulaire.....	22
Figure I. 12 : Modules à fibres creuses.....	22
Figure I.13 : Schéma du module plan Ray-Flow X100.....	23
Figure I.14 : Schéma du module spiral.....	24
Figure I.15 : Préparation des plaques plates et des membranes à fibres creuses par inversion de phase.....	25
Figure I. 16 : opération inversion de phase.....	27
Figure I. 17 : Développement de membranes autoportantes en oxyde de graphène (GO).....	29
Figure I.18 : Configurations de processus MD: (a) DCMD et DCMD avec espace liquide; (b) VMD; c) SGMD et thermostatique SGMD; (d) AGMD.....	32
Figure II .1 : pénuries d'eau dans le monde en 2040.....	42
Figure II.2 : Procédés de dessalement conventionnels industrialisés.....	45
Figure II.3 : distillation à simple effet.....	47
Figure II.4 : Distillation à multiples effets.....	49
Figure II.5 : Distillation par compression de vapeur (VC).....	49

Figure II.6 : Distillation Flash.....	50
Figure II.7 : Echangeur de pression.....	51
Figure II.8 : Echangeur de pression.....	52
Figure II.9 : principe de fonctionnement de l'électrodialyse.....	53
Figure III.1 : Principe de la distillation membranaire.....	56
Figure III.2 : Schéma d'une installation de dessalement par multiple-effets accouplés à des capteurs solaires.....	57
Figure III.3 : distillateur solaire à effet de serre.....	58
Figure III.4 : Schéma de principe d'un distillateur solaire sphérique.....	58
Figure III.5 : Carte solaire de l'Algérie.....	60
Figure III.6 : Effet de serre.....	61
Figure III.7 : Schéma d'un distillateur solaire simple.....	62
Figure III.8 : Schéma d'un distillateur solaire plan à deux pentes.....	62
Figure III .09 : distillateur solaire sphérique.....	63
Figure III. 10 : Schéma d'un distillateur solaire à cascade.....	63
Figure III .11 : Schéma d'un distillateur solaire à mèche.....	64
Figure III .12 : Installation solaire de dessalement à étages multiples.....	65
Figure III .13 : Principe de la serre avec système de dessalement solaire intégré.....	66
Figure III .14 : Schéma de dessalement par humidification déshumidification en cycle ouvert.....	67
Figure III .15 : Schéma descriptif de la serre solaire à Mascate.....	68
Figure III .16 : Principe du dessalement par l'énergie des vagues.....	69
Figure IV 1 : Combinaisons possibles des systèmes intégrés, SER avec des procédés de dessalement classiques et innovants.....	79
Figure IV 02 : Vue d'ensemble des technologies liées aux énergies renouvelables avec OR, MD et ED.....	80
Figure IV3: Nombre de publications sur la distillation membranaire de 2000 à 2020 (Scopus).....	81
FigureIV 04 : Mécanisme de dessalement par distillation directe sur membrane (DCMD)....	82
FigureIV 5. Schéma de procédé pour la serre d'eau de mer.....	82

FigureIV 6 : Schéma de procédé pour batterie de distillation à membrane couplée à une serre d'eau saumâtre d'humidification-déshumidification.....	85
Figure V .01 : humidité relative et température de l'air en fonction des mois d'une année....	92
Figure V. 02 : vitesse du vent en fonction des mois d'une année.....	92
Figure VI. 1. Rideau thermique déployé à 50 % dans une serre.....	95
Figure VI. 2 : Installation des coussinets d'évaporation.....	96
Figure VI. 3 : Schéma représentant le fonctionnement des panneaux humides de refroidissement.....	97
Figure VI. 4. Méthode de R/D par ventilation naturelle (aération-chauffage) au toit.....	98
Figure VI. 5 : Échangeur de chaleur eau air.....	99
Figure VI. 6. Représentation générale de la méthode de R/D par rideau d'eau.....	100
Figure VII. 1. Diagramme de l'air humide.....	110
Figure VII. 2. courbe de puissance et énergie	115

Résumé :

Le but de cette étude était d'évaluer les technologies émergentes de dessalement qui peuvent être intégrées avec des systèmes d'énergie renouvelable. L'accent a été mis sur la distillation membranaire et le dessalement en serre par humidification-déshumidification. Une étude de cas a été présentée sur la faisabilité de coupler le dessalement d'eau saumâtre en serre avec la distillation membranaire pour la région de Adrar (Algérie). Le logiciel « RETSreen plus » nous a permis d'évaluer le potentiel « éolien » dans la région d'Adrar. Cela nous permis de constater la faisabilité pour piloter la serre objet de cette étude. Enfin, les préoccupations environnementales, le potentiel du marché et les facteurs réglementaires des systèmes sont discutés

Mots clé : énergie renouvelable, dessalement, membrane, serre.

Abstract:

The aim of this study was to evaluate emerging desalination technologies that can be integrated with renewable energy systems. Emphasis was placed on membrane distillation and humidification–dehumidification greenhouse desalination. A case study was presented on the feasibility of coupling brackish water greenhouse desalination with membrane distillation for Southern Algeria. The “RETSreen plus” software allowed us to assess the “wind” potential in the Adrar region. This allows us to see the remuneration for managing the greenhouse that is the subject of this study. Finally, the environmental concerns, market potential, and regulatory factors of integrated systems are discussed. Keywords: Integrated systems; Greenhouse desalination; Humidification–dehumidification; Membrane distillation; Market potential; Environmental concerns; Regulatory factor

ملخص:

كان الغرض من هذه الدراسة هو تقييم تقنيات تحلية المياه الناشئة التي يمكن دمجها مع أنظمة الطاقة المتجددة. تم التركيز على التقطير بالأغشية وتحلية الدفيئة عن طريق الترطيب وإزالة الرطوبة. تم تقديم دراسة حالة حول جدوى اقتران تحلية المياه المالحة في البيوت بتقييم إمكانات "الرياح" في منطقة أدرار. "RETSreen plus" المحمية بالتقطير الغشائي لمنطقة أدرار (الجزائر). سمح لنا برنامج سمح لنا ذلك برؤية جدوى تجربة الدفيئة التي هي موضوع هذه الدراسة. أخيراً، تمت مناقشة المخاوف البيئية وإمكانات السوق والعوامل التنظيمية للأنظمة

Introduction générale

Introduction générale :

L'eau est une nécessité de base pour toutes les espèces vivantes. Son importance s'est considérablement accrue avec l'augmentation des besoins de l'humanité. Depuis les temps les plus reculés, l'homme s'est concentré autour des rivières, des lacs et des réservoirs d'eau souterraine pour couvrir ses besoins hydriques à des fins domestique, agricole et industrielle. Ainsi, le secteur de l'agriculture compte pour environ 70% de l'ensemble d'eau douce consommée dans le monde entier.

En Algérie, l'eau consommée se répartit dans trois secteurs dont l'agriculture occupe une place importante dans la consommation d'eau qui représente 62 % de la demande totale du pays. La demande en eau potable, qui a considérablement augmenté depuis les années 1970, représente quant à elle 35 % de la demande totale. La part des besoins en eau du secteur industriel ne s'élève qu'à 3%. Dans les prochaines années, la population devrait croître et, par conséquent, les besoins domestiques, agricoles, industriels et énergétiques sur les ressources en eau continueront de croître, de plus, les changements climatiques, qui provoquent de longue période de sécheresse, viennent augmenter la pression due au déficit en ressource en eaux.

Les ressources existantes en eau ont besoin de protection et de nouvelles ressources doivent être développées afin de répondre à la demande croissante en eau. Cela nécessitera une meilleure technologie de traitement de l'eau.

Pour la résolution de cette problématique, en supposant qu'au préalable les réflexes parcimonieux quand à l'utilisation du potentiel existant sont acquis (en évitant le gaspillage, les fuites et la pollution), l'Algérie, comme beaucoup d'autres pays de la région MENA, a eu recours, depuis une quinzaine d'années, à des ressources en eaux dites non conventionnelles. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est une alternative intéressante pour la production d'eau potable, d'eau pour l'industrie ou d'eau pour l'agriculture.

Le sud algérien bénéficie généralement d'un grand potentiel d'énergie solaire dont l'exploitation peut fournir une solution durable à l'approvisionnement en eau douce.

La serre de dessalement est un nouveau développement d'un procédé qui produit de l'eau douce à partir de l'humidification/déshumidifications, et le refroidissement progressive du milieu ambiant (air atmosphérique). Le recours à des serres, diminue les besoins en eau des cultures par la réduction de l'évapotranspiration tout en créant les conditions optimales pour le développement des cultures tempérées. Ainsi, l'évapotranspiration est réduite de 60 à 85% par rapport à l'extérieur de la serre. Les énergies renouvelables et le dessalement sont des technologies qui peuvent être fusionnés de différentes manières pour aider à atténuer les problèmes de stress hydrique dans le monde. Cependant, les limitations technologiques et économiques entravent les applications à grande échelle. À ce jour, la fusion la plus populaire est l'intégration du photovoltaïque avec inverse osmose. La Membrane d'osmose inverse (OI) industrielle ne peut physiquement supporter les hautes pressions nécessaires pour dessaler les solutions hyper salines avec des solutions de salinité totale dissoute (TDS) > 50 000 ppm (>80 bar). La Distillation Membranaire (MD) devient alors une option intéressante car l'énergie consommée ne dépend pas sur la salinité de l'alimentation. L'un des principaux avantages de la MD, par rapport aux procédés thermiques conventionnels tels que la distillation flash multi-

étapes et multi-effets, repose dont le fait que la MD nécessite un faible besoin en chauffage. La distillation membranaire (MD) est une distillation thermique. Elle utilise une membrane microporeuse hydrophobe comme contacteur pour atteindre la séparation par liquide-vapeur équilibre. La force motrice du processus MD est la variation de pression de vapeur partielle maintenue aux deux côtés d'une membrane microporeuse hydrophobe. Après avoir été chauffée, la solution d'alimentation est mise en contact avec la membrane qui ne laisse passer que la vapeur à travers les pores secs pour qu'il se condense sur le perméat côté (liquide de refroidissement).

Une différence de 7°C à 10°C entre l'eau est théoriquement suffisante pour produire de l'eau douce. Ce processus fonctionne donc à des températures relativement basses, entre 50°C et 90°C. Cela convient très bien au traitement de saumures thermiques déjà préchauffées. L'évaporateur humidifie l'air jusqu'à son point de saturation. L'air saturé passe sur le condenseur, où il est condensé. La résultante d'eau douce est acheminée vers un réservoir pour l'irrigation. Cette étude a montré que les technologies émergentes de dessalement peuvent être intégrées aux systèmes d'énergie renouvelable tels que la mise en place d'une distillation à membrane couplée à un dessalement par serre d'humidification-déshumidification.

Nous avons planifiés notre travail comme suit :

Chapitre I : Généralités sur les techniques de dessalement : Bien que la technique RO soit utilisée dans plus de 60% des installations, nous présentons ici l'ensemble des techniques de Dessalement, qu'elles soient membranaires, par distillation ou autres.

Chapitre II : Techniques de dessalement, on a détaillé les divers procédés de dessalement existants pour dessaler l'eau de mer et les eaux saumâtres.

Chapitre III : Dessalement et énergie renouvelable : un choix stratégique. Techniques de dessalement, Quelques possibilités de couplage entre les installations de dessalement et des dispositifs de récupération des énergies renouvelables sont présentées.

Chapitre IV : Intégration de dessalement membranaire avec l'énergie solaire dans une serre ; cas sud d'Algérie

Chapitre V : Présentation et exploitation du logiciel RETScreen.

Chapitre VI : Utilisation des énergies renouvelables, cas d'Adrar : Dans ce chapitre, nous avons étudié la possibilité d'alimenter les serres installées à Adrar par les énergies renouvelables dont le potentiel est énorme dans le sud Algérien : l'éolien. Grâce au logiciel « RETScreen » nous pourrions d'une part, chiffrer ces potentiels et d'autre part, esquisser une étude technico-environnementale pour voir la faisabilité de la chose et chiffrer les investissements.

Chapitre VII : Résultats & Discussions

CONCLUSION

Chapitre I : Techniques membranaires

I .Introduction :

L'Algérie est classée parmi les pays les plus déficitaires en eau. De part son appartenance à la zone géographique du "Middle-East and North Africa (MENA)" et la quasi-totalité de son territoire (87%) classé en zone désertique, sa pluviométrie moyenne annuelle varie de 1600 mm dans l'extrême nord-est à 12 mm à l'extrême sud-ouest. Néanmoins, la pluviométrie moyenne du territoire, toutes zones confondues n'est que de l'ordre de 89 mm. De ce fait, l'Algérie est classée parmi les 13 pays africains qui souffrent le plus du manque d'eau. Les conditions climatiques difficiles, particulièrement le manque de précipitations et leur mauvaise répartition dans l'espace et dans le temps font que les cultures pluviales ne peuvent se pratiquer sans grands problèmes que dans les zones recevant un minimum de 450 mm de pluie/an et qui représentent 4,8 millions d'ha seulement. Le reste, soit 3,6 millions d'ha nécessitent une irrigation intégrale ou à défaut une irrigation de complément. [1]

Selon l'Organisation mondiale de la santé, près de 700 millions de personnes, soit une personne sur dix, n'ont toujours pas accès à de l'eau potable [2]. Plus inquiétant, un rapport des Nations Unies estimait en 2006 que 60% de la population mondiale sera confrontée à des problèmes d'eau à l'horizon 2025 [3]

Les technologies des membranes et leurs applications dans le domaine du dessalement ont un avenir prometteur. Ces technologies trouvent aussi de nombreuses applications physiques dans le domaine de l'industrie telle que les processus de séparation [4].

La recherche fondamentale sur les propriétés des membranes et les phénomènes de transport dans les diverses opérations membranaires devient inévitable.

Dans le sens le plus général, une membrane pourrait être définie comme une phase qui agit comme une barrière pour empêcher le mouvement de masse tout en permettant le passage restreint et/ou régulé d'une ou plusieurs espèces à travers sa surface [5]. Dans le cas du dessalement, sous l'effet d'une pression générée, la membrane laisse passer les molécules d'eau et arrête les molécules des différents sels dissouts dans l'eau. Les membranes peuvent également modifier physiquement ou chimiquement les espèces qui pénètrent ou réguler le taux de séparation des molécules suivant leurs tailles (perméation). Ainsi, la membrane peut être passive ou réactive, selon sa capacité à modifier la nature chimique des espèces qui y pénètrent. [6].

Les procédés membranaires utilisés pour la production d'eau potable utilisent généralement la pression comme force motrice. Les quatre catégories de processus membranaires entraînés par pression comprennent l'osmose (RO), la microfiltration (MF), la nanofiltration (NF) et l'ultrafiltration (UF). RO et NF fonctionnent généralement à des pressions nettement plus élevées que les procédés MF et UF et sont généralement déployés pour l'élimination des constituants inorganiques et organiques dissouts. Les procédés membranaires à basse pression (c.-à-d. MF et UF) sont généralement appliqués pour éliminer les contaminants particuliers et microbiens et peuvent être mis en œuvre sous pression positive ou négative (c.-à-d. Sous vide). [7]

Du fait des réserves limitées en combustibles fossiles et des rejets des gaz à effets de serre engendrés par l'usage de ces combustibles, de plus en plus de projets, se tournant vers un dessalement durable, sont basés sur le concept de dessalement par voie hybride. Le principe des procédés hybrides est de combiner deux ou trois techniques afin de satisfaire les demandes en eau et en électricité, à moindre coût. On peut associer par exemple :

- une unité de distillation.
- une unité d'osmose inverse.
- une centrale électrique.

Le concept de dessalement par voie hybride s'adapte à la demande en eau et en électricité en réduisant au maximum la consommation d'énergie. En effet, lorsque la demande est faible, l'unité d'osmose inverse consomme l'énergie électrique. Les vapeurs d'échappement des turbines sont utilisées pour alimenter les unités de dessalement [8].

Par exemple, Cherif et al. proposent une solution de couplage d'un champ photovoltaïque, d'une éolienne avec une unité de dessalement par osmose inverse [9]

I.1 Membrane technologie :

Du principe général la sélectivité permanente des membranes a été découverte dès le XVIII^e siècle Abbé Jean-Antoine Nollet, 1735. Quelques années supplémentaires de recherche ont conduit à l'apparition du premier concept de membrane de dessalement, amorcé par Hassler en 1950. Les dix années suivantes ont été marquées par le développement de la conception technique et des matériaux membranaires, à l'origine des installations industrielles et de recherche majoritairement représentées aujourd'hui. Les travaux de recherche de Lonsdale pour l'élaboration de membranes composites en 1960, ainsi que l'invention des membranes asymétriques deux ans plus tard par le duo de chercheurs [10]. En représentent les principales avancées. À partir de cette période, les efforts de recherches se sont consacrés à la compréhension des phénomènes régissant les procédés membranaires et le développement de matériaux adéquats. La première classification des filtrations membranaires sous contrainte de pression appliquée voit le jour en 1975 Porter, 1975. On distingue depuis : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nano filtration, l'osmose inverse et la séparation de gaz, en fonction de la taille des espèces chimiques à séparer, leur état et le principe de fonctionnement de la filtration. Les procédés membranaires hybrides se développent dans les années 1990 et confirment le potentiel croissant de l'implantation de la technologie membranaire au sein du domaine industriel. Les applications majeures des procédés membranaires dans leur globalité consistent alors en, la séparation, l'extraction (contacteurs membranaires), l'immobilisation ou encore la libération contrôlée d'entités (bio) chimiques diverses et variées. Chimie, médecine, pharmaceutique, agroalimentaire, traitement de l'air et de l'eau et biotechnologies constituent les principaux domaines d'application à l'heure actuelle [11].

Une membrane peut être définie comme une barrière physique permettant, sous l'action d'une force motrice qu'est la pression transmembranaire, le passage ou l'arrêt sélectif

de substances dissoutes ou en suspension. Selon la sélectivité souhaitée, plusieurs catégories de membranes peuvent être utilisées et se différencient par la taille de leurs pores [12].

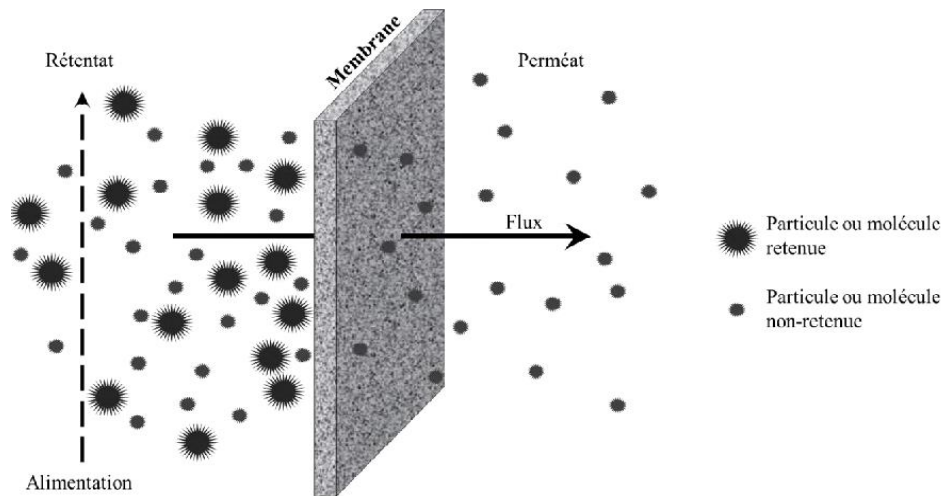


Figure I.1: Schéma explicatif du principe de filtration membranaire (en mode tangentiel).

Dans la filtration membranaire, la qualité de l'eau filtrée par procédé traditionnel dépend grandement de l'eau brute traitée.

À l'issue d'une opération de filtration membranaire, deux phases sont obtenues :

- Le retentât (ou concentrât) dans lequel se concentrent les molécules et/ou particules retenues par la membrane et ;
- Le perméat, exempt des molécules et/ou particules retenues [13]. Les forces motrices permettant la perméation à travers la membrane, peuvent être la diffusion d'une des deux phases (transport actif), mais également des différentiels de pressions, de concentrations, ou de potentiels électriques (transport passif). [14].

Le transfert de matière d'une phase à l'autre va dépendre de l'intensité de la contrainte appliquée de part et d'autre de cette interface. Cette contrainte a pour but d'accélérer le processus de séparation. Elle peut être :

- Un gradient de pression (ΔP) ;
- Un gradient de potentiel électrique (Δf) ;
- Un gradient de potentiel chimique ($\Delta \mu_i$) [14].

Dans le cas des techniques à membrane, l'écoulement du fluide à filtrer est continu et frontal lorsque la qualité de l'eau le permet, sinon, tangentiel. Pour synthétiser, on peut affirmer que les techniques séparatives à membranes sont des procédés physiques de séparation qui utilisent les propriétés de tamisage moléculaire d'une membrane poreuse balayée par le liquide contenant les constituants à séparer.

Lors d'une filtration classique, la suspension à traiter est amenée perpendiculairement au média filtrant. Une accumulation de matières se produit formant une couche qui diminue la porosité et, par la même, le débit de filtration [15].

L'objectif de l'écoulement tangentiel est d'éviter l'accumulation continue sur la membrane des espèces (particules, molécules, ions) retenues par cette dernière. [14].

I.2 Classification des membranes :

Les membranes peuvent être classées en fonction de leur structure, de leur matériau d'origine, de leur phase, de leur fonction, etc (figure I.2). Elles peuvent être largement classées comme naturelles ou synthétiques en fonction de leur source, de leur mode de fabrication. Les principaux matériaux utilisés pour la préparation des membranes synthétiques sont la céramique, le polymère et le verre.

En fonction de leur mécanisme d'action, les membranes peuvent être classées comme membranes absorbantes, diffusives, échangeuses d'ions ou osmotiques [16].

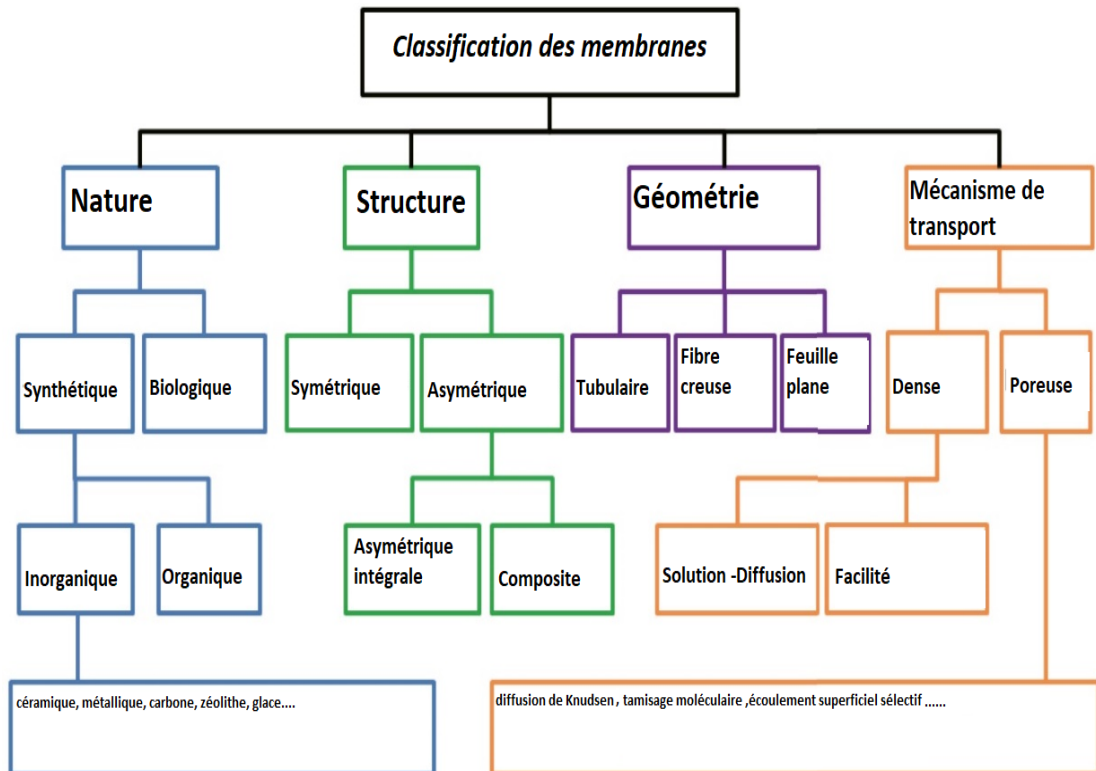


Figure I.2 : Classification des membranes [17].

I.2.1 Selon leur nature :

La classification basée sur la nature de la membrane les distingue en deux catégories : les biologiques et les synthétiques, qui se distinguent totalement par leur fonctionnalité et leur structure. Les membranes biologiques sont faciles à fabriquer, mais elles présentent de nombreux inconvénients, tels que la limitation de la température de fonctionnement qui est, en générale inférieure à 100 °C. D'autres inconvénients sont à signaler tels que la plage de pH des solutions traitées et, les problèmes liés au nettoyage et la susceptibilité aux attaques microbiennes en raison de leur origine naturelle [18].

Les membranes synthétiques peuvent être subdivisées en organique (polymère) et inorganique (céramique, métallique) figure I.3. Les membranes polymères fonctionnent entre 100 et 300 °C, les membranes inorganiques au-dessus de 200 °C [19].

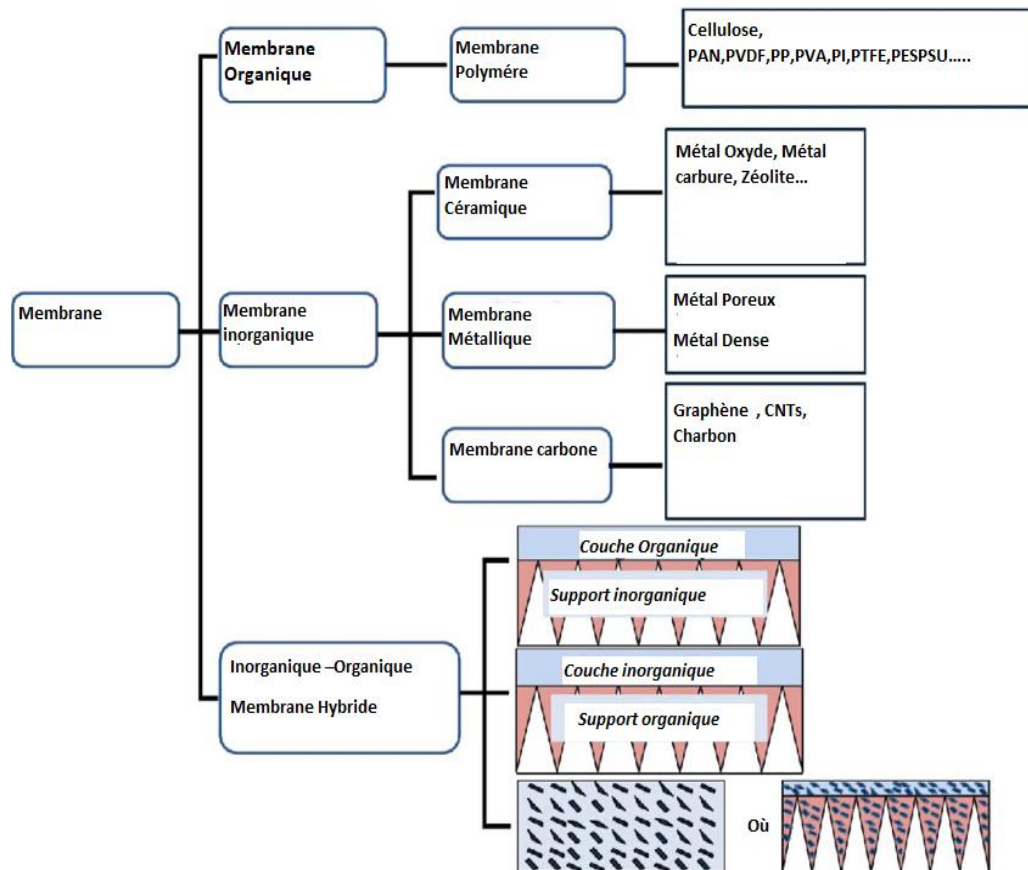


Figure I. 3 : La classification des membranes selon la nature des matériaux des membranes [20].

a. Les membranes organiques :

Les procédés de filtration membranaire peuvent être de nature organique ou minérale (figure I. 3). Les membranes dites de première génération sont à base d'acétate de cellulose, [21]. Ces derniers sont des matériaux possédant de bonnes propriétés de perméabilité mais qui souffrent de conditions limites d'utilisation relativement contraignantes en raison de leur faible résistance chimique (plage de pH limitée) et thermique (température maximale d'utilisation voisine de 50 °C).

Les membranes dites de deuxième génération sont constituées de polymères de synthèse, parmi les polymères les plus utilisés on rencontre, entre autres, les polysulfones, polyamides aromatiques, polyamides, polyethersulfones, polycarbonates, ainsi que les polymères fluorés [22]. Ces membranes résistent mieux aux températures élevées et ont une plus grande plage d'utilisation de pH comme le montre le tableau 1.

Matériaux	Température (°C)	pH
Acétate de cellulose	30-50	3-8
Polyamide aromatique	60-80	2-11
Polysulfone	60-150	1-13
Polyacrylonitrile	60	1-10
Polyfluorurevinylidène	130-150	1-13

Tableau I.1 : Gamme de température et de pH d'utilisation de quelques types de membranes organiques [23]

b. Les membranes inorganiques :

Différents matériaux minéraux peuvent être utilisés pour la fabrication de membranes de filtration. Si les céramiques composent la majorité de membranes minérales, on trouve également du carbone poreux, des métaux ou du verre (figure I.3). Bien souvent, il s'agit de membranes composites où le matériau composant le support est différent de la couche active. Les avantages reconnus des membranes minérales sont une grande résistance thermique avec des températures d'utilisation pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés, une grande résistance chimique (elles sont, la plupart du temps, adaptées à la filtration de solvants organiques ou de fluides agressifs comme les acides, bases, oxydants...), et une grande résistance mécanique qui autorise des pressions élevées (10 à 100 bar), pressions qui sont cependant peu utilisées en Filtration [24]. Ces membranes présentent une structure à la fois composite et asymétrique : elles sont composées d'un support macroporeux à base d'alumine ou de carbone sur lequel sont déposées un nombre variable de couches d'oxydes minéraux (aluminium, ZrO_2 , TiO_2 ...). Le rôle de ces couches filtrantes de faible épaisseur est d'assurer la séparation des solutés grâce à un rayon de pore adapté, alors que le support assure la résistance mécanique. Ces membranes peuvent travailler dans des conditions plus sévères que les membranes organiques grâce à leur résistance mécanique, chimique et thermique (jusqu'à $P=40$ bar, $T=120^\circ C$ et $pH=14$). Ceci justifie leur utilisation dans des applications mettant en jeu des milieux « agressifs » et/ou non aqueux. D'une manière générale les membranes minérales sont essentiellement sous forme tubulaire. Elles présentent l'avantage d'une bonne résistance chimique, mais leur inconvénient majeur est leur faible compacité (surface filtrante par rapport au volume occupé). [25].

c. Les membranes hybrides

Les matériaux hybrides organiques-inorganiques (figure I.3) offrent des avantages spécifiques pour la préparation de membranes exigeant une sélectivité importante et des débits élevés, ou une résistance chimique et thermique considérables [26]. On les range en deux catégories :

- Premier type : seules les forces de Van Der Waals ou les liaisons hydrogène existent entre les parties organiques et inorganiques. Ces matériaux hybrides peuvent être comparés avec des micros ou nano composites dans lesquels une partie (organique ou inorganique) est dispersée et l'autre partie agissant comme la matrice hôte. [27].
- Second type : les liaisons covalentes entre les phases organiques et inorganiques sont présentes dans ces modèles. Il en résulte soit un matériau hybride homogène au niveau moléculaire, soit une grande aire de surface inorganique greffée de groupes organiques. [27].

Il existe trois mécanismes de séparation en fonction de propriétés des composants [28].

- séparation basée sur les interactions molécules / surface de la membrane ;
- séparation basée sur la différence de diffusivité et de solubilité des substances dans la membrane ;
- séparation due à la différence de charge des espèces à séparer : c'est l'effet électrochimique.

c. Les nanocomposites :

Les membranes nano composites sont un groupe de nouveaux matériaux de filtration qui comprennent des nano charges et elles sont intégrées dans une matrice d'oxyde polymère ou inorganique qui fonctionnalise la membrane. [29].

Le développement de la membrane nano composite est la principale application de recherche dans les technologies MF, UF, NF, RO et FO pour le traitement et le dessalement de l'eau. Par rapport à la membrane typique, il a été largement rapporté que l'incorporation de nanomatériaux modifie de manière significative les propriétés physicochimiques de la membrane (hydrophilie, porosité, densité de charge, durabilité de la membrane, stabilité thermique, chimique et mécanique). Une telle membrane a un grand potentiel pour résoudre le problème du compromis entre perméabilité et sélectivité. [30].

-La classification des nano composites

a) Selon la matrice

- Composites à matrice métallique : La température peut atteindre jusqu'à 600°C pour certains procédés de fabrication. Ces composites sont développés grâce à la matrice des procédés de fabrication et leur faible coût ;
- Composites à matrice céramique : La température peut aller plus que 1000°C. L'utilisation de ce type de composite est limitée par la résistance aux chocs thermiques ;
- Composite à matrice polymère : La température ne dépasse pas 200°C à 300°C, ils sont les plus développés grâce à leur grande importance commerciale.

b) Selon le type de renfort ou nano charge

- Les nanoparticules : elles sont utilisées depuis plus de cent ans, de nouvelles méthodes sont visées afin d'obtenir un bon contrôle de la morphologie et de propriétés de surface ;

- Les nanofibres et nanotubes : Ils ont un diamètre inférieur à 100 nm, ils peuvent être utilisés avec une grande variété de polymères (polycarbonate, polyamide, polyester...);
- Les feuillets/plaques/lamelles : parmi ce type de matériaux les argiles, elles sont naturelles donc faciles à extraire, et possèdent des couches d'épaisseur de l'ordre du nanomètre. [31].
 - Sur la base de la méthode de fabrication et de l'emplacement des nanomatériaux, une membrane en nano composite avec une structure et des performances différentes peut être obtenue. Généralement, les membranes nanocomposites sont divisées en quatre catégories (figure I. 4) :
- nanocomposite conventionnel (intégralement asymétrique) :
- TFN; Thin film nano composite.
- TFC ; Thin film composite avec substrat nanocomposite ;
- un nanocomposite localisé en surface [32].

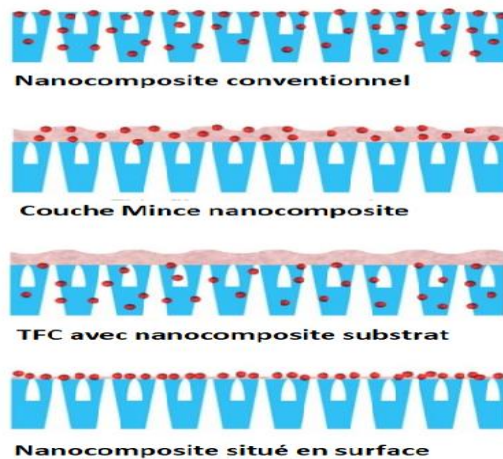


Figure I.4 : Types de membranes nanocomposites [32].

-Méthodes de fabrication de membranes nanocomposites :

Parmi une variété d'approches appliquées pour incorporer des charges inorganiques dans une matrice ionomère, le mélange, l'infiltration (également appelée " méthode in situ ") et l'approche sol-gel ont reçu une grande attention en raison de leur grande disponibilité. [33].

a. Méthode de mélange :

La méthode la plus simple pour la fabrication de polymère / inorganique nanocomposites est un mélange direct des nanoparticules dans la matrice polymère. Le mélange peut être effectué par mélange à l'état fondu ou mélange en solution. L'agglomération est la principale difficulté rencontrée dans la méthode de mélange qui doit être surmonté par la modification de la surface des particules inorganiques (Figure 6 a). [34]. Dans la technique du mélange, les nanoparticules sont dispersées dans les matrices

membranaires par ex situ : mélange fondu et solvant, et mélange sol-gel in situ. Cependant, l'obtention d'une structure composite uniforme est un défi majeur lors de l'utilisation de l'approche de mélange [35].

b.Méthode sol-gel :

La méthode sol-gel est une méthode de synthèse à basse température et a été largement utilisée pour synthétiser des nanocomposites organiques-inorganiques depuis les années 80 (figure I.5). Ce processus se fait généralement par hydrolyse et réactions de condensation des alcoolate métalliques, à l'intérieur d'un polymère dissous dans une solution non aqueuse ou aqueuse. [36].

La méthode sol-gel convient pour obtenir des films de haute qualité jusqu'à une épaisseur du micron de plus, elle est complémentaire des techniques de dépôt physique (figure I.6c) Cependant, il existe des limites d'application sol-gel au revêtement sur les soustrats métalliques. Cette méthode présente plusieurs inconvénients impliquant des limites de fissurabilité et d'épaisseur. Parfois aussi, le traitement thermique peut être critique. Des contraintes de traction se développent pendant le séchage et peuvent conduire à la formation de fissures si le film est plus épais qu'une valeur critique. [37]

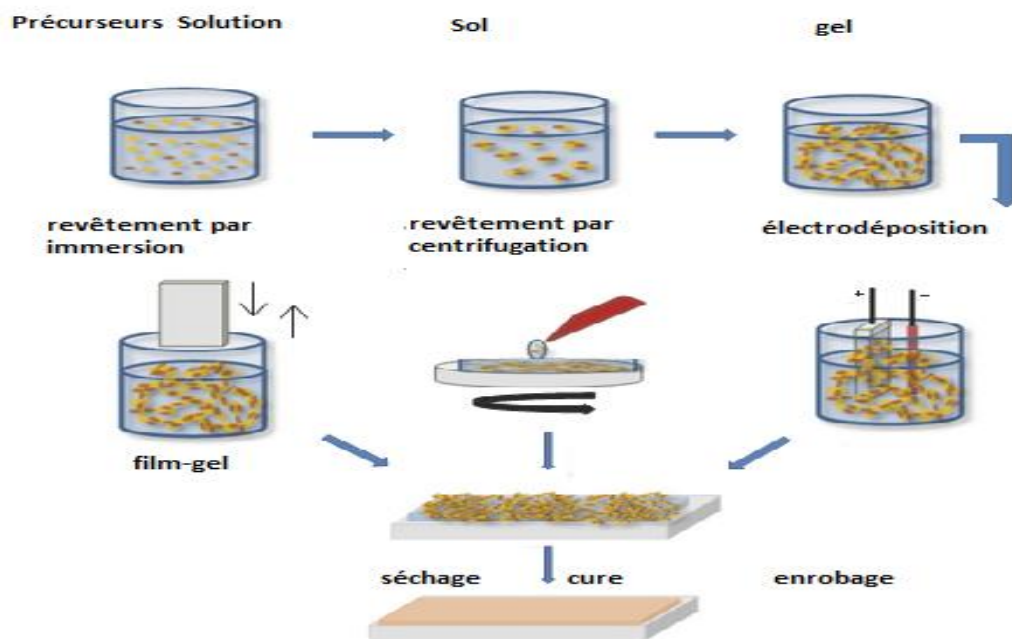


Figure I.5 : Préparation des revêtements par méthode sol-gel [38]

c.Méthode de polymérisation in situ (d'infiltration)

Des méthodes in situ ou d'infiltration ont également été utilisées pour préparer des nanocomposites organiques et inorganiques, dans lesquels les précurseurs de charges inorganiques s'infiltrent dans une matrice polymère gonflée ou de type hydrogel (pour augmenter la porosité ou volume vide avant infiltration), puis les membranes nanocomposites

sont obtenues par croissance de charge, élimination des impuretés et polymère, durcissement. Pendant ce temps, l'effet d'isolement causé par le réseau de polymères peut gêner l'agglomération indésirable des nanoparticules et, simultanément, conduire à une taille contrôlée des particules et à une distribution uniforme (Figure. I. 6c) [39].

Cette méthode a été utilisée pour fabriquer les revêtements nanocomposites avec des matrices organiques, qui étaient des polymères conducteurs, ou d'autres monomères avec des initiateurs. [40]. Les nanocharges étaient des métaux ou des oxydes métalliques. La polymérisation a lieu en utilisant de l'énergie électrique (électrodéposition). [41].

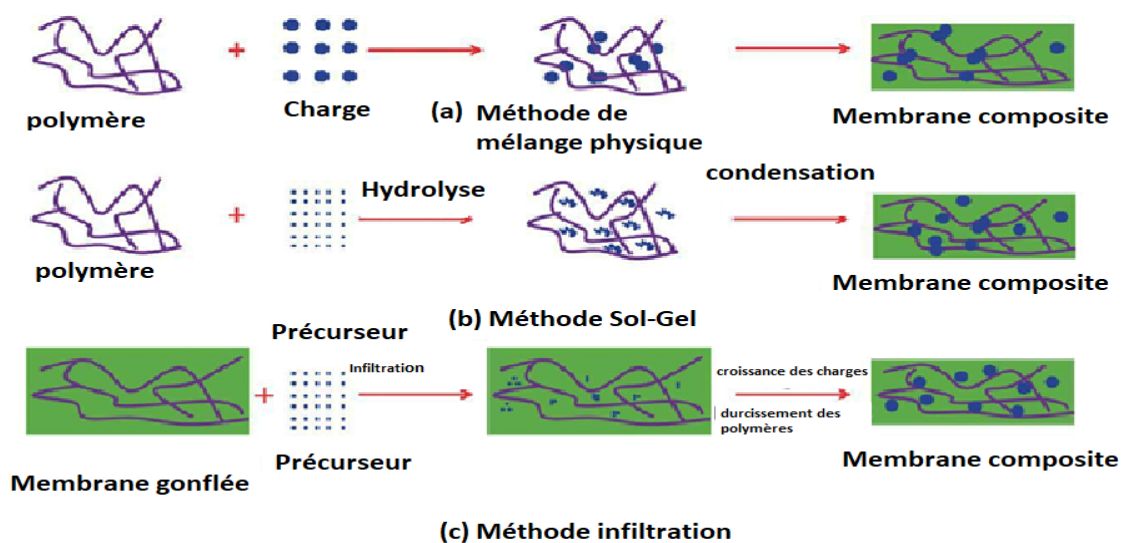


Figure I.6 : Trois méthodes typiques de fabrication de membranes composites : (a) la méthode de mélange physique ; (b) la méthode sol-gel ; et (c) la méthode d'infiltration [42].

d. Mélange de solvants

La technologie de mélange de solvants est la méthode couramment utilisée pour la fabrication de nanocomposites pour les matériaux polymères qui sont difficiles à faire fondre. Dans la technologie de mélange de solvants, le polymère est d'abord dissous dans un solvant, puis les nanoparticules sont ajoutées au mélange, en utilisant des ultrasons, pour garantir une solution homogène [43]. Après homogénéisation du mélange, la solution est normalement coulée sur une plaque de verre et immergée dans un bain de coagulation. Ce processus est référencé comme technique d'inversion de phase. Phase riche en polymère et phase pauvre en polymère, et la membrane est alors obtenue.

e. Mélange fondu

La technologie de mélange à l'état fondu est la méthode la plus répandue pour la préparation de membranes nanocomposites car aucun solvant organique n'est utilisé, ce qui la rend écologique. Dans cette méthode, les nanoparticules sont directement mélangées avec le polymère sélectionné, un nanocomposite uniforme peut être obtenu. Cette approche souffre de

l'inconvénient de l'agglomération des particules qui peut être surmontée en modifiant la surface des particules [44].

f.Méthode de revêtement (Enrobage)

La technologie de revêtement est une méthode courante qui a été largement utilisée pour différentes applications.

Il existe plusieurs techniques de revêtement telles qu'un revêtement chimique (adsorption en solution et sol gel) et un revêtement par pulvérisation plasma. Les pulvérisations cvd, pvd et plasma présentent certains inconvénients qui limitent leur application dans la fabrication de membranes polymères, elles sont chères car elles nécessitent un vide poussé, une consommation d'énergie élevée, doivent être réalisées à hautes température et pression. [45].

Dans la voie du revêtement chimique, les nanoparticules commerciales sont dispersées dans un solvant puis déposées à la surface de la membrane par différentes approches de revêtement qui incluent la filtration sous vide, le revêtement par immersion et le revêtement par rotation [46].

La technique d'immersion consiste à tremper un substrat dans une solution de nanocomposites et à l'arracher à une vitesse constante et contrôlée. Les substrats sont ensuite recouverts de nanocomposites lors de son retrait de la solution. En raison du taux d'arrachement imposé, la quantité de nanocomposites à la surface du substrat est également contrôlée. [47]

g.Méthode de pulvérisation à froid :

Contrairement à la projection thermique traditionnelle (projection de gaz, flamme, plasma et détonation), la projection à froid permet la fabrication de revêtements à des températures plus basses que les points de fusion des matériaux projetés. La technique de pulvérisation à froid a été réalisée à basses températures, de sorte que cette méthode évite le phénomène de détérioration des matériaux tels que l'oxydation et la décomposition ainsi que la transition de phase pendant le processus [48].

h.Méthode CVD

Cette méthode est généralement utilisée pour la fabrication des revêtements nanocomposites, qui comprennent la matrice inorganique et les nanocharges inorganiques [49].

i.Méthode de projection thermique

Cette méthode est souvent utilisée pour réaliser des revêtements nanocomposites avec une matrice de métal ou d'alliage. Le matériau de pulvérisation est une poudre d'alliage nanométrique (formée par broyage à boulets) [50]. La poudre peut être dispersée dans une solution de suspension à l'aide de suspensions de pulvérisation thermique [51].

g.Méthode d'électrodéposition

Cette méthode pourrait être utilisée pour la fabrication de revêtements nanocomposites, qui contiennent des nanocharges organiques [52]. Ou des matrices inorganiques [53]. Ou des matrices organiques [54].

k.Dispersion de solution

Cette méthode est principalement appliquée pour la préparation de revêtements de nanocomposites polymères, renforcés avec des nanocharges telles que des oxydes métalliques, des nanoargiles et des nanotubes de carbone (CNT). Dans cette méthode, outre l'utilisation des méthodes d'agitation magnétiques / mécaniques traditionnelles, l'agitation assistée par ultrasons (sonication) a été utilisée pour une meilleure dispersion des nanocharges dans les matrices polymères. [55].

I.2.2 Selon leur fabrication

Pour obtenir une perméabilité sélective élevée, compatible avec un usage industriel, il est nécessaire que la barrière soit la plus mince possible. Il en résulte une certaine fragilité qui a été palliée par la consolidation de la barrière mince par différents moyens que ce soit, un support à pores de même nature ou de nature différente, un support tissé [56].

En outre, les membranes se présentent sous deux configurations structurelles typiques : leur structure peut être microporeuse ou asymétrique.

a.Les membranes symétriques :

Les membranes symétriques sont composées d'un même matériau ayant une porosité sensiblement uniforme dans toute l'épaisseur. Elles peuvent être denses (absence de pores) ou poreuses. Dans ce cas la membrane, dans toute son épaisseur, forme la couche sélective. Les membranes de microfiltration / haute ultrafiltration fabriquées par irradiation de particules chargées ou par étirement sont des membranes symétriques poreuses. Les membranes de microfiltration fabriquées par inversion de phase sont symétriques ou faiblement asymétriques. On peut également considérer les couches sélectives des membranes d'osmose inverse comme des membranes symétriques denses. [24]

b. Les membranes asymétriques ou anisotropes :

Ce sont des membranes préparées en une seule étape à partir du même matériau mais dans lesquelles la couche perméable est une très fine pellicule (quelques 100 ou 1000 Å) appelée peau. Celle-ci repose sur une couche support beaucoup plus épaisse et beaucoup plus poreuse dont le rôle est d'assurer à l'ensemble de bonnes propriétés mécaniques. Celles-ci sont encore améliorées par l'incorporation d'un support textile. La peau peut être dense ou mésoporeuse selon l'application visée. Les membranes asymétriques ont un intérêt évident dans tous les procédés de filtration ou de perméation, puisque la résistance au transfert de matière est proportionnelle à l'épaisseur [57].

c. Les membranes composites :

-Membrane composite à couche mince (TFC) :

Les membranes composites (parfois dénommées TFC – Thin Film Composite) sont constituées d'un assemblage de deux ou plusieurs couches de matériaux de différentes porosités et de différentes compositions chimiques. Elles ont été développées afin d'augmenter la perméabilité des membranes en diminuant l'épaisseur de la couche active sélective. Des épaisseurs de l'ordre de 10 à 100 nm sont utilisées. Les autres couches ont une porosité croissante et permettent de garantir la tenue mécanique de la couche active. Les membranes composites sont essentiellement des membranes planes ou tubulaires de nanofiltration ou d'osmose inverse (à l'exception près d'une fibre creuse de nanofiltration). [24].

-Nanocomposite à couche mince :

La membrane TFN est une classe émergente de membranes TFC qui sont préparées par incorporer des nanomatériaux au sein de la couche dense active dans le but de modifier les propriétés de la couche mince de surface. Par exemple, pour améliorer l'hydrophilie et / ou la densité de charge de surface, sans diminuer la réjection du soluté. [58]

I.2.3 Selon leur porosité :

-Membranes poreuses :

Ce type de membrane est similaire par sa structure au filtre conventionnel (de diamètre de pore supérieur au micron), mais elle diffère par la taille de ses pores 0,01 à 1 micron [59]. Pour les particules plus grosses que les pores, elles sont toutes retenues, celle de taille comprise entre les plus gros pores et les plus petits sont partiellement retenus. [60]. Les particules de plus petites tailles passent en totalité. La séparation de soluté par des membranes poreuses est donc principalement une fonction de taille moléculaire et de distribution de taille de pores. En général, seulement les molécules qui diffèrent largement de taille peuvent être séparées par des membranes poreuses, par exemple en microfiltration ou ultrafiltration.

Généralement, en vue d'une meilleure sélectivité, une membrane poreuse est confectionnée de façon à comporter une distribution des diamètres des pores centrée autour d'une seule valeur :

- Soit un diamètre inférieur à 2 nm environ dans le cas de micropores ;
- Soit un diamètre compris entre 2 et 50 nm dans le cas des mésopores ;
- Soit une taille supérieure à 50 nm dans le cas des macropores. [60]

-Membranes denses :

Cette membrane consiste en un film dense à travers lequel le perméat est transporté par diffusion sous l'effet d'une force de pression (figure I.7), de concentration ou de gradient de potentiel électrique. La séparation des composés d'un mélange est directement reliée à leur diffusivité et leur solubilité à travers la membrane .Ainsi, une membrane dense peut séparer

des composés de taille voisine si leur solubilité (concentration dans la membrane) diffère. Dans une membrane dense, lorsque les pores se réduisent aux espaces libres situés entre les chaînes de polymères, leur taille est voisine de celles des molécules organiques simples ou des ions hydratés. L'effet tamis devient donc négligeable. [61].

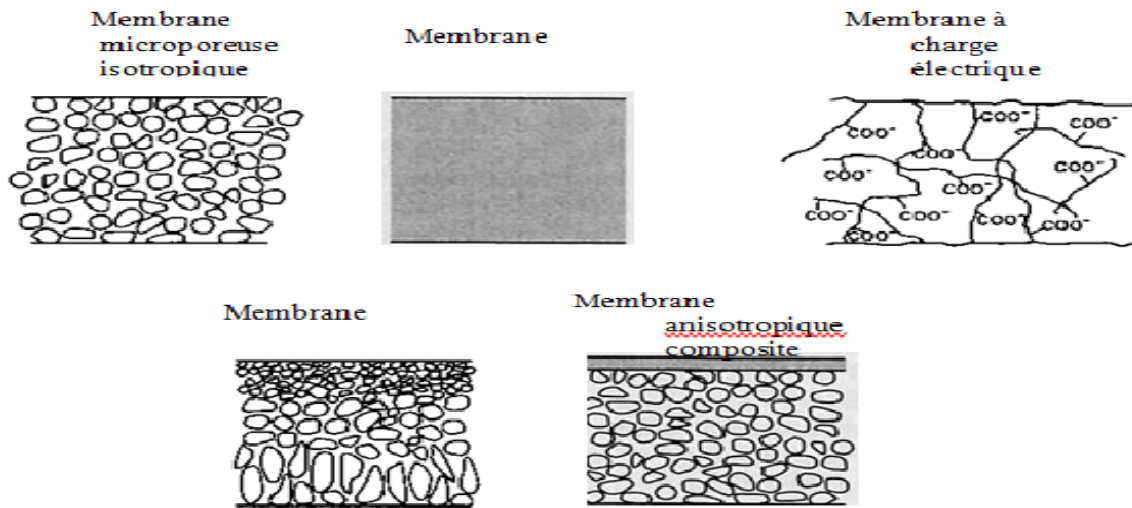


Figure I.7 : Description des différents types de membrane [62].

I.3 Procédés baromembranaires :

Les procédés baromembranaires sont des procédés de filtration membranaire qui utilisent un gradient de pression comme force motrice (figure I. 8). Chaque procédé baromembranaire est caractérisé par une plage de pression transmembranaire précise et se distingue également par la taille des espèces pouvant être retenues par la membrane comme le présente le tableau I.2. [63].

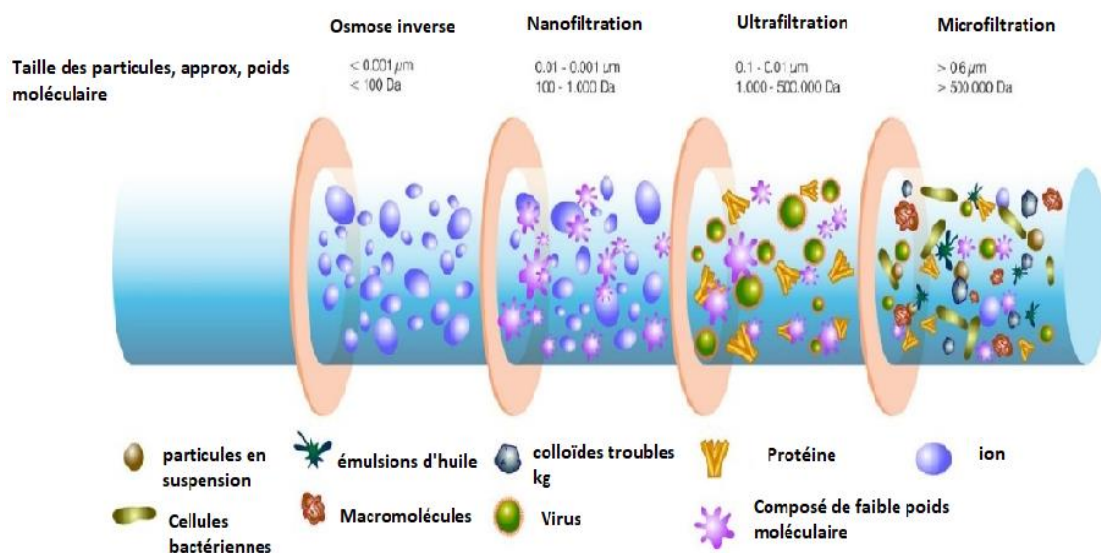


Figure I. 8. Représentation des différents types de procédés membranaires [64].

Procédé de séparation	<i>Osmose inverse (OI)</i>	<i>Nanofiltration (NF)</i>	<i>Ultrafiltration (UF)</i>	<i>Microfiltration (MF)</i>
Taille des pores	Membrane dense	0,5 – 2 nm	2 – 100 nm	0,1 – 10 µm
Nature des plus petites espèces retenues	Ions monovalents	Ions et petites molécules	Macromolécules	Microorganismes, colloïdes, particules solides
Pression de service (bar)	30 – 100	5 – 30	1 – 5	0,5 – 2

Tableau I.2 : Procédés membranaires classés selon la taille des pores.

I.3.1 L'osmose inverse

Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est réalisé en appliquant à la solution à dessaler, une pression supérieure à la pression osmotique de cette solution sous l'effet de laquelle l'eau s'écoule à travers une membrane semi-perméable dans la direction inverse, c'est-à-dire, du compartiment contenant l'eau salée vers le compartiment d'eau douce (Figure I.9). Ce procédé est simple, mais pose un vrai problème au niveau de l'encrassement des membranes, qui nécessite un prétraitement poussé de l'eau de mer. [65].

Avant le prétraitement chimique, l'eau de mer d'alimentation est filtrée pour retirer les solides en suspension et les particules supérieures à 10 microns. Le prétraitement chimique inclut l'addition d'hypochlorite de sodium pour la prévention contre la croissance des microorganismes, de chlorure ferrique comme flocculant, d'acide sulfurique pour l'ajustement du pH, et enfin de bisulfite de sodium pour la réduction du chlore [67].

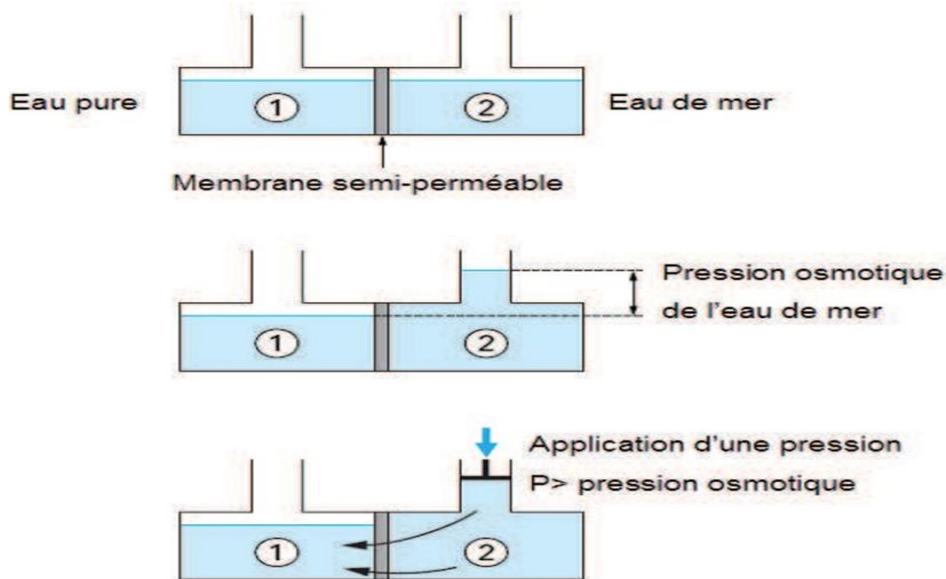


Figure I.9 : Mise en évidence de l'osmose inverse [66].

I.3.2 L'ultrafiltration :

L'ultrafiltration utilise des membranes microporeuses dont les diamètres des pores sont compris entre 1 et 100 nm (figure I.10). De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes) [68]. Pour cette raison, cette technique est utilisée pour l'élimination de macrosolutés présents dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel (électronique) ou médical. [69].

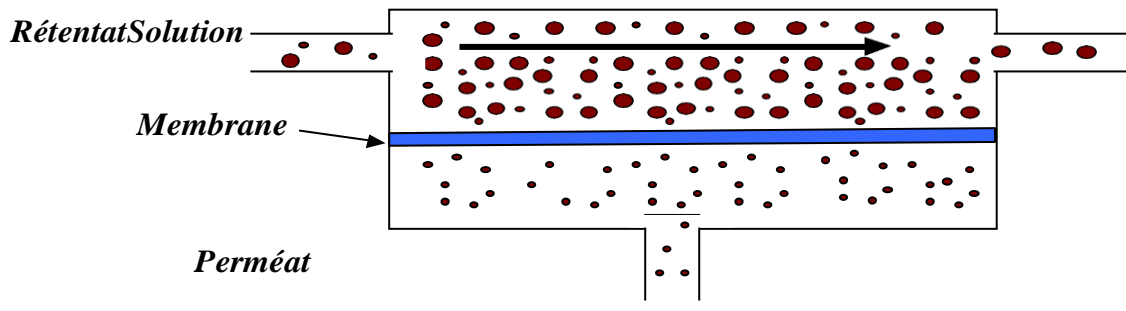


Figure I.10 : Principe de l'ultrafiltration (d'après site Internet relatif au génie alimentaire[70].

I.3.3 La nanofiltration :

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane. Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus [71].

I.3.4 La Microfiltration (MF) :

Les membranes de MF permettent l'élimination de particules en suspension (séparation solide / liquide) de rayon hydrodynamique minimal compris entre 75 nm et 10 µm. [72].

Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexation, précipitation ou floculation. [73].

-Les modules :

Les modules supportent les membranes, 4 grands types de modules sont commercialisés :

- Les modules tubulaires ;
- Les modules fibres creuses ;
- Les modules plans ;
- Les modules spiraux.

a. Les modules tubulaires :

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle (figure I.11). L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes [74]. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent, voire très turbulent [75]. À cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations.

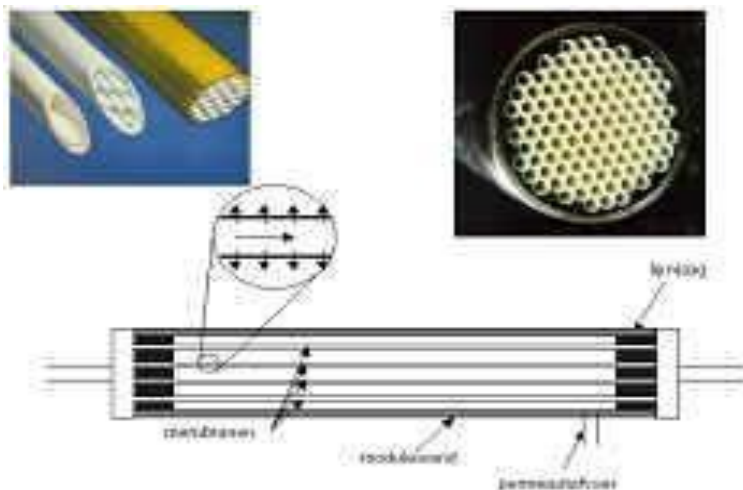


Figure I. 11 : Module tubulaire

b. Modules à fibres creuses :

La plupart des modules à fibres creuses utilisés dans les applications de traitement de l'eau potable sont fabriqués pour les membranes MF ou UF pour filtrer les particules. Ces modules sont constitués de fibres creuses qui sont des tubes longs et très étroits. Les fibres peuvent être regroupées en plusieurs arrangements.

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- Configuration « Int-Ext » (figure I. 12-a) : comme c'est le cas pour les modules tubulaires, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres ;
- Configuration « Ext-Int » (figures I. 12-b et I.12-c) : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre. [73].

c. Module plan :

Cette configuration dérivée des filtres-presses est constituée d'un empilement de membranes sous forme de feuilles. Les membranes sont disposées parallèlement les unes aux autres et sont séparées par des grilles ou support. Le module plan est un assemblage de type filtre-presse. Dans le cas du module Ray-Flow la membrane est disposée à plat sur un support permettant l'écoulement et la collecte du perméat. L'écoulement de l'alimentation est tangentiel à la membrane et l'épaisseur de la veine liquide est assurée par l'épaisseur du joint qui rend étanche le montage (Figure I.13). Ce type de module est peu compact, mais facilement démontable pour le changement d'une ou plusieurs membranes. [76].

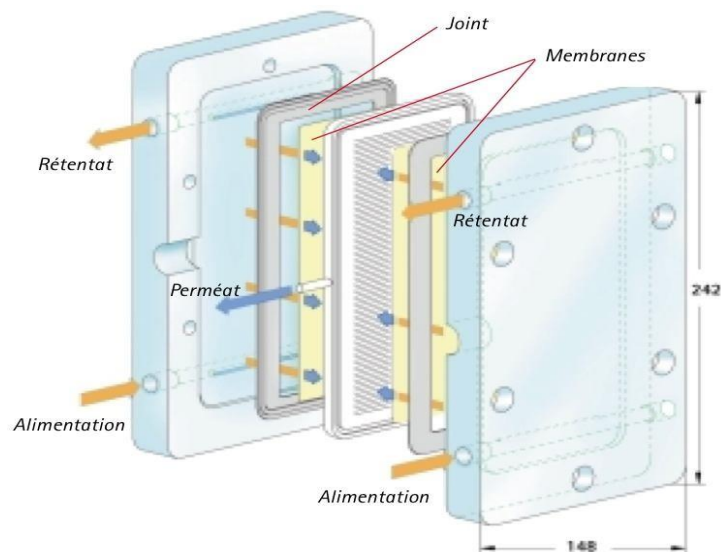


Figure I.13 : Schéma du module plan Ray-Flow X 100.

d. Le module spiralé :

Il est constitué d'un tube creux percé de trou afin de collecter le perméat. Un assemblage élémentaire est enroulé autour de ce tube figure I.14. Un assemblage est constitué d'un espace d'alimentation, d'une membrane, d'un espace perméat et d'une seconde membrane. La solution à traiter entre par le côté du module enroulé et le rétentat ressort de l'autre. Quant au perméat, il est collecté dans les espaces perméats, circule de manière spiralée et ressort par le tube central. Les membranes utilisées pour ces modules sont organiques, elles ont l'avantage d'être assez flexibles pour être enroulées [24].

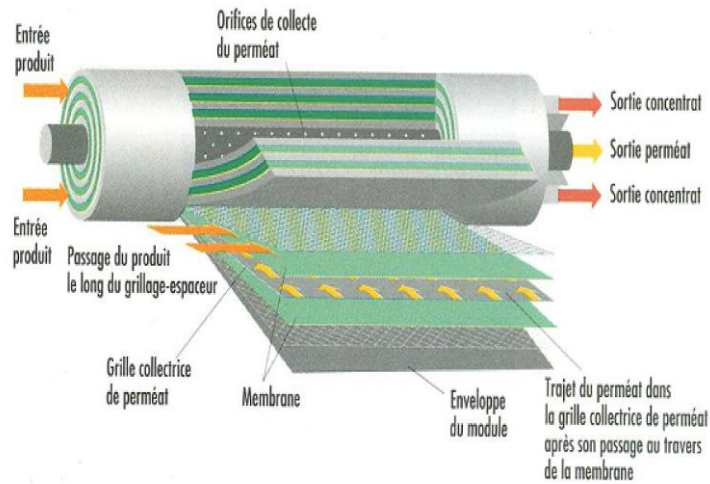


Figure I.14 : Schéma du module spiral.

I.4 Préparation des membranes :

-Frittage :

Le frittage est une technique qui permet de préparer des membranes à partir de poudres de polymère des matériaux tels que le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) ou des matériaux inorganiques tels que l'acier inoxydable, les oxydes métalliques, le graphite ou le verre. Cette technique est basée sur la compression des particules du matériau sélectionné, cette opération est suivie d'un chauffage à une température inférieure au point de fusion pour induire un collage des particules. Entre les particules collées, des pores se forment de la taille qui dépend strictement de la dimension des particules : plus la taille des particules est petite, plus la taille des pores est petite.

-Étirement :

La technique d'étirement est utilisée pour préparer des membranes poreuses à partir de denses et extrudés films de polymères semi-cristallins tels que le PE, le PP et le PTFE. La formation des pores est obtenue en étirant le film perpendiculairement à la direction d'extrusion jusqu'à ce que de petites ruptures se produisent dans la structure du film dense. La taille des pores des membranes préparées par cette technique est de l'ordre de 0,1 à 3 mm, ce qui les rend adaptés pour les applications de microfiltration.

-Revêtements en solution :

Cette technique permet la préparation des membranes composites dont l'utilisation est souhaitable lors de la séparation accomplie est contrôlée par la diffusion plutôt que par la taille des espèces à séparer. Les membranes préparées avec cette technique sont formées par deux matériaux différents, le premier est un film mince et dense fait de polymère déposé sur un second polymère qui agit simplement comme un support poreux.

Il existe deux méthodes : humide et sèche. Dans l'ancienne méthode, les membranes polymères au niveau du laboratoire sont faites en versant des solutions de coulée sur un applicateur pour chromatographe en couche mince, dessinant une lame sur une plaque de verre, permettant au solvant de s'évaporer à une certaine température pendant une période

prescrite. On procède par la suite à une immersion de la plaque de verre, avec la membrane, dans un milieu de gélification qui est, généralement, de l'eau (H₂O). Après s'être reposé dans le milieu de gélification pendant une durée souhaitée, les membranes sont retirées de la plaque de verre et chauffées. Un traitement sous pression leur est appliqué selon les besoins. Les membranes résultant de cette méthode dite « humide » sont des structures asymétriques composées de couches de peau minces et denses et d'un support rugueux et poreux.

En revanche, étant donné qu'aucun milieu de gélification n'est utilisé et que le solvant de coulée est complètement évaporé par voie dite « sèche », les membranes obtenues ont une structure symétrique dense et sont réversibles dans le cycle de membrane humide-sec. Les membranes polymères préparées par la méthode humide et sèche ont été appliquées à une variété d'applications industrielles, telles que la microfiltration, l'ultrafiltration, la nano filtration et l'osmose inverse.

-Inversion de phases :

L'inversion de phases est historiquement la technique de référence pour la fabrication de membranes organiques en acétate de cellulose (figure I.16). De nos jours, c'est la méthode choisie par les industriels pour fabriquer la majorité des membranes planes et des fibres creuses car elle permet d'élaborer des membranes qui couvrent toute la gamme de filtration, de la MF à l'UF. Elle est également une méthode industrielle de fabrication des membranes d'Osмосe Inverse. L'inversion de phase est un processus de transformation contrôlé du polymère d'une phase liquide à une phase solide. La précipitation par immersion est la technique la plus utilisée pour préparer des membranes polymères (figure I.15)

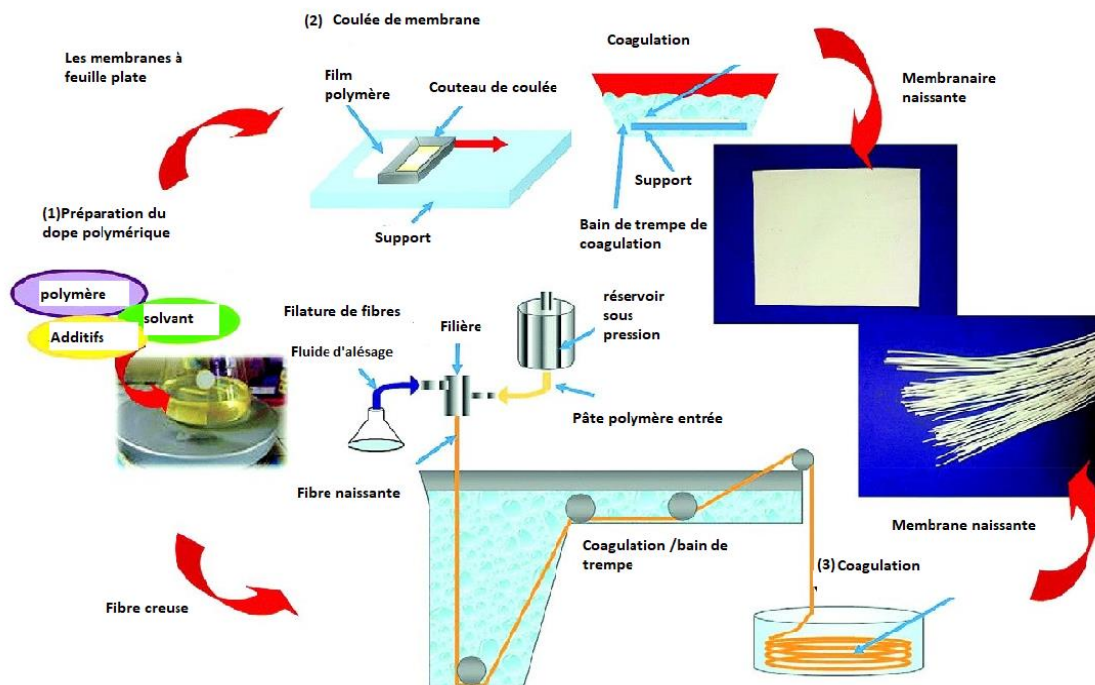


Figure I.15 : Préparation des plaques plates et des membranes à fibres creuses par inversion de phase. [76].

-Précipitation de la phase vapeur :

Une fois qu'un mélange solvant-polymère est coulé sur le film, il est placé dans une atmosphère de vapeur qui contient un non-solvant saturé avec le même solvant. En raison de la forte concentration du solvant dans l'atmosphère de vapeur, le solvant du film coulé reste au lieu de s'évaporer dans l'atmosphère. La membrane se forme par diffusion de non-solvant dans le film coulé. Ce processus nous permet d'avoir une membrane poreuse. [77].

-Précipitation par évaporation contrôlée :

Pour cette méthode, le polymère est dissous dans un mélange qui contient un solvant et un non solvant, le mélange agit comme solvant pour le polymère. Comme le solvant est plus volatil que le non-solvant, son évaporation provoque une augmentation de la concentration en non-solvant et en polymère dans le film, ce qui conduit à la précipitation du polymère et à la formation de la membrane recherchée. [78].

-Précipitation par évaporation du solvant :

Cette méthode consiste à dissoudre un polymère dans un solvant et l'étaler sur un support approprié. Le solvant est évaporé dans un milieu inerte (azote gazeux) pour éviter la vapeur d'eau (humidité de l'air) permettant d'obtenir des membranes homogènes et denses. [79].

-Séparation de phase induite thermiquement (TIPS en anglais) :

Dans ce procédé, la solution de polymère est maintenue à une température élevée de sorte qu'une phase unique reste formée. Cette opération est suivie d'un refroidissement rapide pour séparer la solution en une phase riche en polymère et une phase riche en solvant. Cela se traduit par une gélification du polymère et sa structure peut alors être fixée par refroidissement en dessous du point de congélation du solvant. La vitesse de refroidissement est habituellement gardée lente pour obtenir une structure plus homogène constituée de micro-agrégats de polymères. Enfin, un non solvant peut être utilisé pour nettoyer le solvant. [80].

-Précipitation par immersion :

Cette technique consiste en immersion de la solution polymérique, étalée sur un support approprié, dans un bain contenant le non solvant (coagulant). La séparation de phase (formation de membrane) est due à l'échange diffusif entre le solvant et le non solvant. La structure de la membrane dépend de la vitesse d'échange (transfert de masse) et de la séparation de phase (figure I. 16). [81].

Plus la précipitation du polymère est importante et plus la structure est poreuse [82].

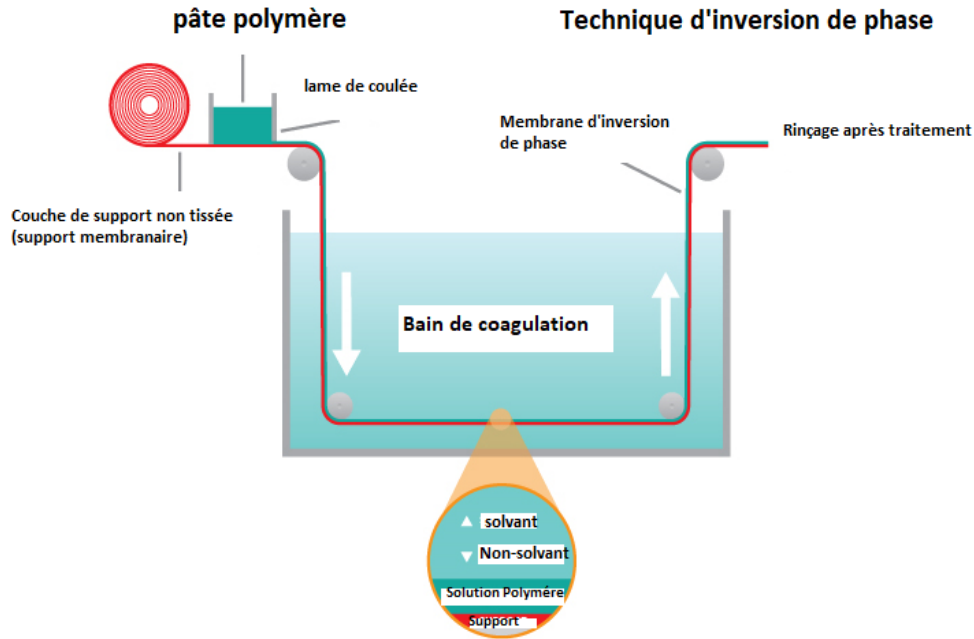


Figure I. 16 : opération inversion de phase. [83]

Une autre méthode de fabrication de membranes composites complexes est la technique de Langmuir-Blodgett (LB), dans laquelle des monocouches sont formées sur une surface d'eau, puis transférées sur un support solide. La technique LB a ensuite été utilisée par la technique couche par couche (LbL). Cette dernière a été mentionnée pour la première fois par Iler en 1966, puis développée par Decher et Hong. Elle consiste en un assemblage assisté par gabarit dans lequel des films minces sont fabriqués en déposant des couches alternées de matériaux chargés positifs et négatifs avec des étapes de lavage entre les deux. Les méthodes générales de dépôt impliquent une immersion en solution, une pulvérisation ou un revêtement par centrifugation. La formation de couches par pulvérisation a été introduite par Schlenoff et l'utilisation de centrifugeuses a été démontrée par Hong et également par Wang. Dans la première étape un substrat avec une charge positive (par exemple) est plongé dans une solution de polyélectrolyte anionique et une couche de molécules de polymère anionique ayant des groupes fonctionnels chargés négativement. Ainsi, la charge de surface est inversée du positif au négatif. Dans l'étape suivante, un lavage à l'eau pure est effectué pour éliminer les molécules peu liées qui peuvent adhérer à la surface par la force de van der Waals. Par la suite, le substrat est plongé dans une solution de polyélectrolyte cationique et la charge de surface est rétablie positive. En exécutant les étapes ci-dessus, une bicouche (bl) se forme. On peut obtenir le nombre souhaité de bicouches en répétant cette dernière étape plusieurs fois [84].

-Membranes à matrice hybride

Une autre approche du procédé membranaire hybride couplant les filtrations OI, UF et la MD avec l'emploi de plusieurs membranes polymérique à matrice hybride contenant le charbon sous ces différents types : charbon actif en poudre (CAP), nanotubes de carbone (NTC) ou oxyde de graphène (OG).

-Préparation des fibres creuses (carbone et polymère) NF membranes :

Le développement de membranes en fibres creuses à haute perméabilité est obtenu par filage de mélange de polymères modifiés en utilisant les nanoparticules appropriées telles que les zéolithes pour le réglage des propriétés de la membrane en général et la rugosité de surface et l'hydrophilie en particulier. Les membranes hydrophobes seront basées sur du fluorure de polyvinylidène (PVDF) avec des additifs hydrophobes tandis que les membranes NF peuvent être un mélange de polymère à base de polysulfone / polyacrylonitrile avec des additifs hydrophiles.

Le développement des membranes en fibres creuses de carbone est un processus en deux étapes :

Tout d'abord, la membrane polymère asymétrique à fibres creuses sera préparée par la technique de filage sec/humide. Ce procédé consiste à faire :

- 1) le séchage du matériau polymère sélectionné en poudre ;
- 2) le mélange avec le solvant optimal ;

3) la filtration de la solution polymère et un traitement de dégazage pendant la nuit. Ensuite, la solution polymère filtrée est dégazée sera aspirée dans la cuve isotherme principale de l'appareil de filage. Comme liquide de forage, on peut utiliser un mélange dégazé d'un bon solvant polymère et d'un non-solvant. La solution de polymère et le liquide de forage, mélange de solvants et de non-solvants, seront pompés simultanément à travers une filière à tube dans l'orifice à l'aide de pompes à engrenages. Le diamètre intérieur de la filière, l'espace d'air, la température de la solution de polymère et la vitesse de collecte par roulement sont les principaux paramètres pour adapter les dimensions macroscopiques finales des membranes à fibres creuses formatées.

Dans un deuxième temps, une technique de post-traitement (procédé de pyrolyse) sera mise en œuvre dans un four tubulaire à haute température. Le four est capable de fonctionner dans un environnement inerte, oxydant et sous vide, alors que la température de pyrolyse pourrait atteindre 1600 °C.

-Développement de membranes de nanotubes de carbone à haut flux :

Cette tâche comprend le développement de membranes zéolitiques d'alumino-phosphate (AlPO₄-5) avec des nanopores unidimensionnels et orientés, comme modèles pour la croissance de TNT de 4-5Å d'épaisseur à l'intérieur des canaux. À condition que la taille des pores des nanotubes soit adaptée aux dimensions des molécules d'eau, une diffusion d'eau ultra-rapide à un seul filet peut avoir lieu grâce aux interactions hydrophobes / hydrophiles qui expulsent les molécules d'eau au centre des tubes, et à la liaison hydrogène qui en résulte et qui permet un transport unidimensionnel en chaîne, limitant ainsi la fonction des membranes biologiques Aquaporin-1,

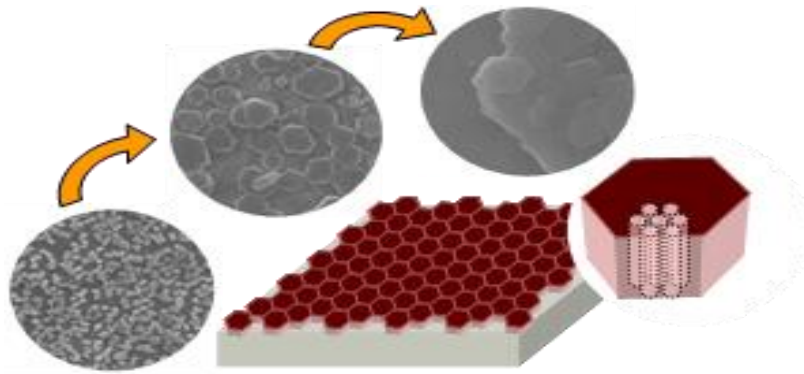


Figure I. 17 : Développement de membranes autoportantes en oxyde de graphène (GO)

Une suspension GO sera synthétisée à partir de graphite synthétique (granulométrie $\leq 20 \mu\text{m}$) par la méthode Hummers. La suspension sera ensuite filtrée, lavée avec une solution d' HCl et plusieurs fois avec de l'eau jusqu'à atteindre un pH neutre dans l'eau résultante et enfin séchée pour obtenir de l'oxyde de graphite. Ensuite, ce matériau sera dispersé dans un volume d'eau donné et traité aux ultrasons dans un bain à ultrasons. Enfin, la dispersion résultante sera centrifugée pour obtenir la suspension GO. Les membranes GO autonomes seront développées par filtration sous vide de cette suspension GO à travers des filtres MCE ayant différents diamètres et tailles de pores moyennes. Différentes membranes peuvent être préparées soit en ajustant le volume de la suspension GO, ou en ajustant le débit de filtration et la chimie de surface GO, soit en raison de la réduction chimique du GO et enfin, soit en utilisant différents protocoles chimiques (méthode de Staudenmaier) et source de graphite (naturelle au lieu de synthétique).

- Développement de membranes d'oxyde de graphène (GO) supportées :

Des nano feuilles (GO) chargée négativement seront déposées électro statiquement sur les surfaces chargées positivement des membranes polymères (disponibles dans le commerce ou fabriquées en laboratoire). L'auto-assemblage du GO aux interfaces sera adapté par une sélection appropriée :

- 1- de la nature et de la composition ;
- 2- de la dispersion GO (aqueuse) ;
- 3- du nombre de couches déposées ;
- 4- des caractéristiques chimiques et morphologiques du support et ;
- 5- des conditions opératoires pendant le processus de fabrication.

De plus, l'utilisation d'agent de réticulation chimique pour stabiliser les membranes GO sera également étudiée. Les objectifs techniques spécifiques comprendront la sélection / réalisation de la couche de support optimale et de la membrane GO à faible coût et avec un faible impact environnemental. Dans ce but, la membrane de support sera réalisée par des processus faciles à étendre, comme la coulée et la séparation de phases [85]. De plus, les solvants de la coulée seront sélectionnés avec précision sur la base de leur durabilité [86].

Plusieurs techniques seront comparées pour le dépôt de la dispersion GO afin d'obtenir des membranes sans défaut, notamment le dip-coating, le spread-coating et le spin-coating.

- Développement de membranes NF haute pression intégrant des systèmes de canaux d'eau artificiels :

Cette tâche s'appuie sur la découverte récente d'architectures tubulaires artificielles d'imidazole-4 en fournissant d'excellentes raisons d'être considérées comme des canaux d'eau fonctionnels. Ces canaux présentent une sélectivité totale d'exclusion d'ions, basée pour des raisons stériques dimensionnelles, alors que les effets hydrophobes et hydrodynamiques semblent moins importants. Leurs propriétés de transport sélectif (sélectivité à 100% contre les sels et propriétés de perméabilité très intéressantes) se rapprochent de celles des systèmes naturels. Les systèmes de canaux d'eau artificiels optimisés en termes de perméabilité et de rejet élevé d'ions seront utilisés pour la préparation de nouvelles membranes artificielles pour le dessalement. Les étapes cruciales sont liées au maintien de l'activité des canaux et à l'obtention d'une densité de canaux élevée sur la morphologie des membranes planes. Les résultats préliminaires connexes ont jusqu'à présent confirmé que de bonnes densités de canaux sont obtenues dans les membranes solides.

I.5 Développement de l'unité de distillation membranaire (MD) :

La distillation membranaire est un procédé de séparation membranaire qui consiste à mettre l'évaporation en œuvre au travers d'une membrane poreuse hydrophobe. L'objectif est que les pores demeurent vides de liquide, et que le liquide d'alimentation ne pénètre pas dans ces derniers. Un gradient de pression de vapeur de part et d'autre de la membrane est obtenu par l'intermédiaire d'une différence de température ou de pression. Ce gradient de pression de vapeur peut-être par exemple créé par le chauffage de l'effluent du côté d'alimentation ce qui entraîne l'augmentation de sa pression de vapeur et son évaporation au voisinage de la membrane. Une membrane hydrophobe et microporeuse (0,1 – 1 μm) est en contact avec un effluent chaud d'un côté et de l'autre avec un courant liquide froid ou un flux gazeux dans lequel la pression partielle de vapeur d'eau est abaissée soit pas l'usage d'un gaz porteur, soit par une pompe à vide. La distillation membranaire MD est considérée comme une distillation à un étage, et il est important de noter que la membrane sert uniquement de support à l'interface liquide-gaz et quelle n'apporte en principe aucune contribution à la sélectivité de la séparation. [88].

Comme dans d'autres processus de séparation membranaire, la force motrice est la différence du potentiel chimique à travers l'épaisseur de la membrane. Le transfert simultané de chaleur et de masse se produit dans ce processus et en fonction du modèle de contact liquide-vapeur [89].

Il existe différentes configurations de MD :

- 1- distillation à membrane à contact direct (DCMD) ;
- 2- balayage de gaz distillation à membrane (SGMD) ;
- 3- distillation à membrane sous vide (VMD) et ;
- 4- entrefer distillation membranaire (AGMD).

Cette dernière configuration est utilisable pour diverses applications (dessalement, nettoyage de l'environnement / des déchets, réutilisation de l'eau, alimentaire, médical, etc.). De plus, la possibilité d'utiliser la chaleur perdue et ou des sources d'énergie alternatives, telles que l'énergie solaire et géothermique, permet de combiner la MD avec d'autres processus ce qui en fait une technique de séparation plus prometteuse à l'échelle industrielle. Vu que les températures de fonctionnement sont plus basses que dans la distillation conventionnelle, vu que les pressions hydrostatiques de fonctionnement sont également plus basses que dans les processus entraînés par la pression comme l'osmose inverse (RO), Vu que les propriétés mécaniques des membranes sont moins exigeantes avec des facteurs de rejet élevés, en particulier pendant le traitement de l'eau contenant des solutés non volatils, au vu de tout cela, rend la technologie MD la plus attrayante que tout autre procédé de séparation populaire.

La MD est un procédé principalement adapté aux applications dans lesquelles l'eau est le composant principal présent dans la solution d'alimentation. Comme indiqué précédemment, la MD est un processus thermique, dans lequel seules les molécules de vapeur sont transportées à travers des membranes hydrophobes poreuses. La nature hydrophobe de la membrane empêche les solutions liquides de pénétrer dans ses pores en raison de la tension superficielle. [89].

Il existe plusieurs manières de faire fonctionner une distillation membranaire, la Figure I. 18(a) décrit la plus ancienne des configurations, la distillation membranaire à contact direct (Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)).

Les liquides chaud et froid sont tous les deux en contact direct avec la membrane, cela à l'avantage de minimiser la distance de diffusion des vapeurs et donc de fournir des flux de perméat élevés. L'étape de condensation de la distillation membranaire à contact direct est effectuée à l'intérieur du module membranaire. Elle est la configuration la plus appliquée, en particulier pour le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. [88].

Des équipes de chercheurs suédois ont développé un système appelé distillation membranaire avec espace gazeux (Air Gap Membrane Distillation (AGMD)) : seul le liquide chaud est en contact avec la membrane. De l'autre côté, la chambre froide ne contient pas de liquide si bien que les vapeurs doivent traverser une zone gazeuse (en principe de l'air) avant d'être condensées sous la forme d'un film tombant sur une paroi froide (Figure 18 (d)). L'air présent entre la membrane et le liquide fait isolation et permet de diminuer les pertes thermiques à travers la membrane. Cependant, les flux de perméat sont relativement faibles et seules des membranes planes ou enroulées en spirale peuvent être utilisées dans ce cas

Deux autres configurations sont dérivées de celle-ci : dans l'un des systèmes, Distillation Membranaire à basse pression (Vacuum Membrane Distillation (VMD)) Figure I.18 (bon établit un vide partiel du côté du perméat ; dans l'autre distillation transmembranaire à entraînement gazeux (Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD)) (Figure I.18 (c)). Un courant de gaz traversant la chambre froide entraîne les vapeurs qui ont passé la membrane. Dans les deux cas, les vapeurs sont condensées à l'extérieur du module [88].

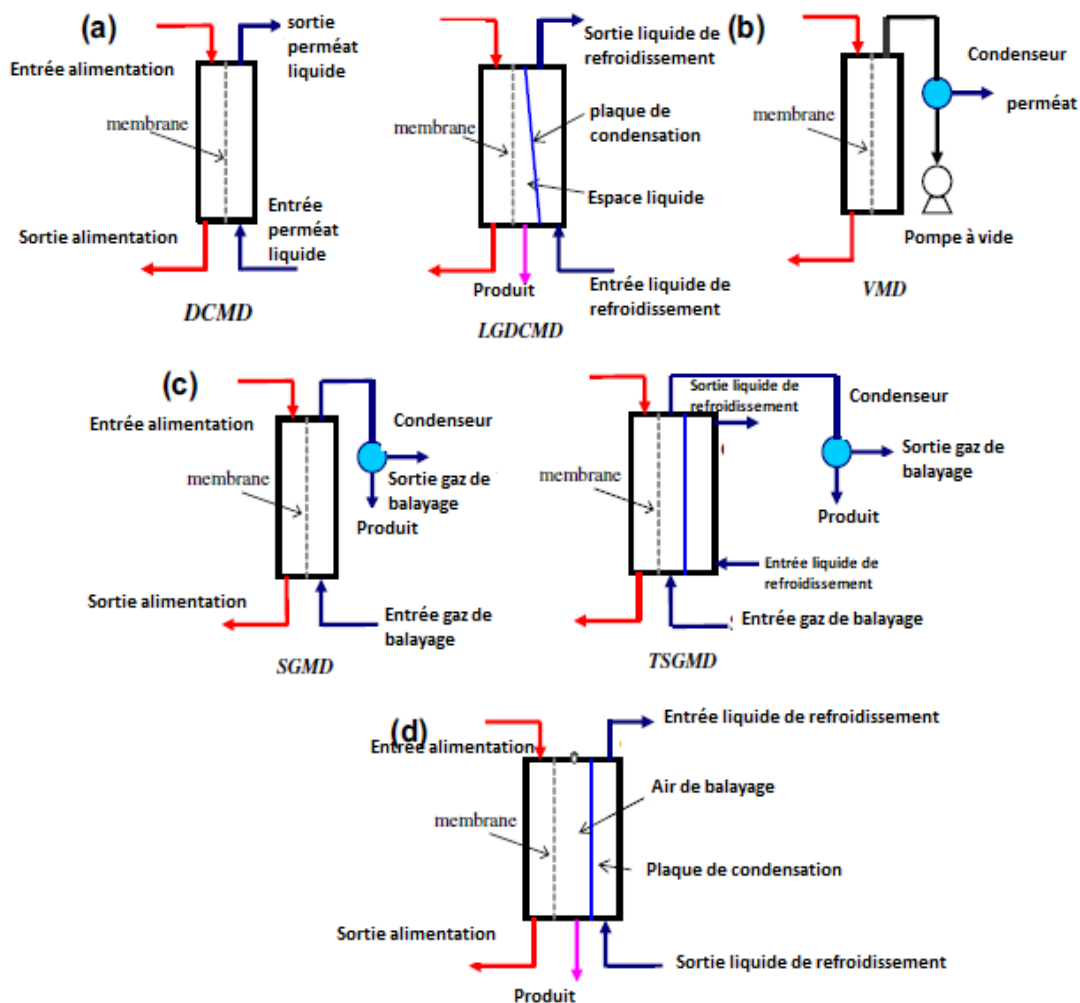


Figure I.18 : Configurations de processus MD : (a) DCMD et DCMD avec espace liquide ; (b) VMD ; c) SGMD et thermostatique SGMD ; (d) AGMD. [90].

Une variante SGMD appelée distillation à membrane de gaz de balayage thermostatique (TSGMD) a été proposée récemment. Dans ce mode de SGMD, l'augmentation de la température du gaz est minimisée en utilisant une paroi froide du côté du perméat [89].

- Avantages :

La Distillation Membranaire (MD) comporte de nombreux avantages. Il est possible de coupler ce procédé avec une source d'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire ou l'énergie thermique océanique, etc. ou d'utiliser la chaleur récupérée à la sortie d'un procédé industriel, souvent rejetée dans l'environnement. Une installation de Distillation Membranaire peut fonctionner aux températures nettement inférieures au point d'ébullition et à pression atmosphérique. La présence d'un gradient de température est une condition suffisante pour obtenir du distillat, le faible gradient de pression de vapeur étant compensé par une surface de contact élevée par unité de volume de fluide traité que l'on peut obtenir grâce aux géométries filtre-pressé ou fibres creuses. Cela représente un avantage considérable par rapport à une distillation conventionnelle. [88].

I.6 Cristallisation :

La cristallisation est un procédé permettant d'aboutir la production d'un composé solide à partir d'un soluté contenu dans une phase continue, généralement une solution homogène. À de plus rares occasions, elle peut être réalisée à partir d'un milieu fondu ou d'une phase gazeuse. La force motrice permettant d'enclencher le processus de cristallisation est appelée sursaturation. Cette dernière est amenée par un écart à l'équilibre de solubilité (équilibre thermodynamique de type liquide-solide) dans les conditions opératoires de pression et de température données. Ainsi, c'est en revenant à son état d'équilibre que le système permet l'apparition de la phase cristalline. La nucléation fait référence au mécanisme de formation des premiers germes de cristaux qui peuvent ensuite, selon leur taille, grossir (c'est l'étape de croissance) ou se redissoudre. [91].

Plusieurs modes de fonctionnement peuvent alors être envisagés pour générer cette sursaturation [92]. Par refroidissement, par évaporation du solvant ou par ajout d'un composant non réactif appelé antisolvant, miscible au solvant mais dans lequel le soluté est moins soluble (on parle aussi de relargage), par modification du pH et enfin par réaction chimique. [93].

Par ailleurs, la précipitation est une forme de cristallisation particulière résultant du couplage simultané d'une réaction chimique et d'une cristallisation. [94].

Le MCr, est une des nouvelles technologies de traitement de la saumure, partageant un mécanisme similaire à la MD, il a été récemment introduit pour traiter la saumure d'eau de mer et exploiter des ressources précieuses pendant l'opération. Drioli et ses collègues de l'ITM (Italie) ont présenté un nouveau concept d'usines de dessalement en tant qu'usines de production de minéraux au lieu d'usines de production d'eau douce (car les ressources minérales sont plus précieuses que l'eau) [95].

L'objectif de MCr est de parvenir à un rejet liquide zéro et à une utilisation totale des matières premières. Le MCr, qui peut être considéré comme une extension de la MD, concentre la solution à l'état de sursaturation pour récupérer certains des composés dans la solution d'alimentation. [96].

Les avantages du MCr comprennent une nucléation et une cinétique de croissance bien contrôlée, un temps d'induction des cristaux réduit, un taux de sursaturation contrôlable et une vitesse de cristallisation plus rapide, ce qui permet d'obtenir des cristaux de taille étroite et de grande pureté [95]. Cependant, en termes de maintenance, le MCr devrait surmonter plusieurs problèmes de fonctionnement comme l'encrassement des membranes et le mouillage des pores des membranes en raison de sa forte concentration en sels dans l'eau d'alimentation (Feed) [97].

-Caractérisation des performances :

Généralement, les performances des membranes peuvent être évaluées par leur productivité (taux) et leur capacité de séparation (sélectivité). Des paramètres comme le flux (J), la perméabilité (P) et la perméance (P) jouent un rôle essentiel dans l'évaluation de la productivité de la membrane, tandis que l'efficacité (performance de séparation) est

déterminée par les facteurs de sélectivité (α) et de séparation (β). Le flux peut être calculé comme [98].

$$J = Q/(A \times t) \quad I.1$$

Où : - Q est le poids total du perméat traversant la membrane,

- t est une période de temps spécifique et ;
- A est la surface effective.

La perméabilité (P) représente le flux de perméation transmembranaire d'un composant particulier qui peut être approximé par :

$$P = k_{sm} \times k_m \times \lambda / (2k_m + m \times k_{ms}) \quad I.2$$

Où :

- k_m est une constante de diffusion pour la membrane,
- k_{sm} est une constante de diffusion à travers l'interface solution-membrane,
- k_{ms} est une constante de diffusion à travers l'interface membrane-solution,
- m est une constante liée à l'épaisseur de la membrane
- λ est la distance minimale entre les positions équivalentes.

En revanche, la perméance P' représente la perméabilité d'un composant à travers la membrane par unité d'épaisseur L pour donner :

$$P' = P/L \quad I.3$$

La sélectivité (α_{ij}) représente le rapport entre la perméabilité de chaque composant (i et j). La valeur peut être exprimée en utilisant la masse ou la mole comme :

$$(\alpha_{ij})_{masse} = (P_i/P_j) = ((P_i/L)/(P_j/L)) \quad I.4$$

$$\alpha_{ij} \text{ mole} = (M_i/M_j) \times (\alpha_{ij})_{masse} \quad I.5$$

Où les indices i et j se réfèrent à chaque composant, tandis que M est la masse molaire.

Le facteur de séparation β_{ij} représente la fraction relative de chaque composant dans le perméat y et l'alimentation x pour donner :

$$\beta_{ij} = ((y_j/y_i)(x_j/x_i)) \quad I.6$$

I.7 Le prétraitement dans l'osmose inverse :

L'alimentation de l'osmose inverse contient des différentes concentrations :

- solides suspendus.
- matières dissoutes.

La matière solide suspendue contient :

- particules inorganiques.
- colloïdes.
- matières biologiques.

Pour la matière dissoute elle est composée de :

- sels hautement solubles (chlorures).
- sels modérément solubles (carbonates – sulfates – silices).

La réduction du débit d'eau durant l'opération de l'osmose inverse permet une augmentation de la concentration des matières suspendues et des ions dissouts.

La décantation des matières solides ou la formation des tartres à partir des sels modérément solubles peut causer :

- blocage de la canalisation ce qui implique une chute de pression.
- réduction du passage d'eau et augmentation dans la quantité des sels traversée dans la membrane.

L'endommagement de la membrane peut être causé par :

- système opération avec pH bas.
- haute concentration du chlore.
- autre composition chimique.

Le processus du prétraitement consiste sur :

- la crépine qui doit enlever beaucoup de particules.
- désinfection de l'eau par le chlore ou autre biocide
- filtration médiane.
- réduction des alcalines avec ajustement du pH.
- inhibiteur des tartres.
- la réduction du chlore libre en utilisant le sodium bisulfite ou le filtre avec charbon actif.
- utilisation des filtres de cartouches pour enlever les particules suspendues.

-Méthodes d'essais :

L'alimentation d'eau est testé par :

- turbidité.
- solide suspendu.
- charbon organique.
- limon densité indice SDI.
- les gaz dissous CO₂, O₂, CL₂ .
- ph
- température.

Si le :

- $SDI < 1$ implique que l'eau d'alimentation est de haute qualité et un fonctionnement pour une année est assuré.
- $1 < SDI < 3$ implique que l'eau d'alimentation est de modéré à faible qualité et qui permettra un fonctionnement de quelque mois.
- $3 < SDI < 5$ implique que l'eau d'alimentation est de faible qualité et qui exige un nettoyage de la membrane.
- $SDI > 5$ implique que l'eau d'alimentation est de pauvre qualité et l'opération dans ces conditions n'est pas acceptable.

-La réduction des solides suspendus et des limons :

Les solides suspendus sont :

- boue et limon.
- colloïdes organiques.
- corrosion des produits fabriqués en fer.
- le fer précipité.
- algues.
- bactéries.
- roches.
- silice.
- manganèse précipité.
- aluminium hydroxyde.

-Les filtres médians :

Les filtres médians sont caractérisés par :

- formés d'une à plusieurs couches de particules ;
- la couche est constituée de gravier, de charbon actif ou d'anthracite ;
- la couche supérieure du lit est constituée de matière grossièrement classée, cependant la fine est placée dans la couche du fond.
- l'épaisseur de la couche du filtre est de 1-3m.
- le diamètre de la particule du filtre médian est de 0.5-3mm.
- le taux de filtration est de 10-20 m³/h.

Les cartouches de filtration :

Les cartouches de filtration sont caractérisées par :

- la taille commune est 5 µm.
- la séparation médiane est fabriquée de polymère.
- la combinaison du filtre médiane et les cartouches est une très bonne solution économique.

-Encrassement et formation des tartres :

Le tartre est composé de :

- Calcium carbonate

- Calcium sulfate
- Silices complexes.
- Barium sulfate.
- Strontium sulfate.
- Calcium fluoride.

-Encrassement biologique dans l'opération de l'osmose inverse :

L'encrassement biologique dans l'opération de l'osmose inverse est la combinaison résultante des facteurs suivants :

- Présence des microorganismes dans l'eau ;
- Capacité de la surface de la membrane à être colonisé par les microorganismes ;
- L'osmose inverse rejette tous les microorganismes mais une partie adhère sur la membrane et initialise le processus du biofilm ;
- Tout prétraitement avant la membrane permet une croissance des microorganismes et des bactéries ;
- Le mode de croissance du biofilm sur la surface de la membrane ou sur toute autre surface nécessite la quantité minimale possible de nutriments dans l'eau d'alimentation. En plus, la diffusion et la pénétration de biocides de l'eau d'alimentation vers le film des bactéries et moins efficace que son attaque sur les cellules suspendues toutes seules dans l'eau d'alimentation.

-Effets d'Encrassement biologique dans la performance des opérations de l'osmose inverse :

L'encrassement biologique dans la performance des opérations des osmoses est caractérisé par une détérioration dans le système de performance cela peu causé :

- Chute dans le débit de l'eau ;
- Chute de pression ;
- Faible rejet des sels.

Les résultats de ces effets sur la performance de l'opération sont :

- Augmentation du coût de nettoyage et d'entretien ;
- Réduction de la durée de vie de la membrane ;
- Le biofilm augmente la friction et la trainée. L'écoulement inégal de l'eau dans le système est dû essentiellement à la croissance inégale du biofilm.

- Le mécanisme d'encrassement biologique :

- La température influe directement sur la formation des biofilms ;
- L'adhésion des microbes sur le biofilm est assurée par la charge électrostatique, et accomplis par les forces hydrodynamiques, motilité et diffusion.

La couche des microbes est protégée contre le débit d'eau suite à la faible épaisseur du biofilm.

L'adhésion est liée au nombre des cellules dans l'eau, concentration des nutriments, température, pH, hydrodynamique débit.

-Evaluation de l'encrassement biologique :

L'Encrassement biologique est caractérisé par :

Chute dans le rejet des sels, dégradation dans la perméabilité, augmentation de la chute de pression.

L'évaluation de l'encrassement biologique se fait par l'une des méthodes suivantes :

- Analyse du filtre médian de l'encrassement biologique ;
- Utilisation d'éléments de test en ligne avec la membrane.

-Traitement d'encrassement biologique :

L'addition du biocide tue les microorganismes et bactéries mais n'enlève pas le biofilm. Aussi, le biofilm mort pourrait devenir un substrat des nouvelles cellules de bactéries et peut être attaché sur le biofilm mort et consommé ces nutriments. Ce phénomène peut se reproduire sur la membrane est causer une réduction du taux de récupération des rejets des sels.

Les caractéristiques du processus de traitement de l'encrassement biologique sont :

- l'efficacité du biocide dépend de plusieurs facteurs de fonctionnement et de conception, y compris le type de biocide.
- Concentration du biocide.
- la réaction secondaire du biocide est composée d'autres facteurs que les bactéries où microorganismes, comme le PH, températures, temps de séjour, type de microorganismes, état de croissance.
- l'augmentation dans la concentration du biocide et la température, et le temps de séjour, augmente le taux des microorganismes morts.
- Cependant, il faut une unité de déchloration placée en avant de l'osmose inverse pour protéger la membrane.

Le nettoyage est assuré avec un pH faible et utilisation du sulfurique hydrochlorique où acide citrique.

- les tartres du calcium sulfate :

Nettoyage avec le sodium tripoli phosphate où le sel de sodium.

- silice :

Nettoyage au détergent où le nettoyage hydraulique.

- Organique et encrassement biologique :

Il est similaire au calcium sulfaté, il est recommandé d'utilisé un détergent et biocide.

-Les procédures du lavage des membranes :

Généralement, les solutions à faible pH sont utilisées pour nettoyer les tartres métalliques, cependant les solutions alcalines sont utilisées pour nettoyer les encrassements biologiques et organiques aussi, un débit d'eau fort avec une pression faible est recommandé.

Les étapes de nettoyage son :

- préparation de la solution de nettoyage avec ajustement de la température et du pH ;
- injection de la solution dans le circuit de l'osmose inverse ;
- recyclage et immersion de l'élément ;
- rinçage avec une eau perméable jusqu'à ce que la mousse disparaisse et le pH et la conductivité de la solution effluente approche de celle de l'eau d'alimentation ;
- L'utilisation du chlore ou autre oxydant fort dans le polyamide de la membrane peut causer des endommagements irréversibles dans la membrane.

L'eau à une température de 32C⁰ à 37C⁰ donne de très bons résultats.

- Si le pH de l'acide augmente pendant la recirculation, on ajoute plus d'acide jusqu'à ce que le pH atteigne la valeur ciblée, cela est dû à la consommation de l'acide pour la dissolution des tartres inorganiques.
- utilisation de l'acide sulfurique dans une solution à faible pH forme les tartres sulfuriques.
- utilisation de l'eau de robinet pour une solution à haut pH peut causer l'encrassement des carbonates si l'eau est dure.

-La stérilisation de la membrane :

Après l'arrêt du système au-delà de deux jours il est impératif de faire une stérilisation avec les composants suivants :

- hydrogène peroxyde (0,25wt%).
- sodium bisulfite /glycérine (0,2 à 1wt% 16 à 20wt%).
- sodium bisulfite (0,5 à 1wt%).
- formaldéhyde (0,1 à 0,5 Ppm).

Les procédures de stérilisation sont :

- Préparation de la solution de stérilisation.
- Rinçage initiale avec de l'eau perméable dans l'osmose inverse.
- Recirculation de la solution.
- Drainage.
- Fermeture serré durant la période de stockage.
- Rinçage finale.

- Le nettoyage du système :

Les équipements composant le nettoyage de l'osmose inverse sont :

- Réservoir
- Filtre cartouche 5 µm.
- Pompe.
- Instrumentation.
- La solution est pompée à partir du réservoir vers les filtres cartouche.

-Stockage des membranes :

Les différentes méthodes de stockage incluent :

- stockage à court terme à l'intérieur des tuyaux de pression pour une durée de 5 à 30 jours ;
- stockage à long terme à l'intérieur des tuyaux de pression pour une durée de plus 30 jours ;
- stockage à sec des éléments de membrane en pièces détachées où avant la construction de l'usine de dessalement.

I.8 Avenir de la technologie membranaire :

-Étendue : Exemple d'unité de processus hybride MD / PRO :

Un autre nouveau processus hybride intégrant la MD au processus PRO osmose à pression retardée pour traiter la saumure d'OI, et produire de l'énergie est à l'étude comme, projet Global MVP, www.globalmvp.org [99], en Corée du Sud. Les principaux objectifs du projet sont de minimiser l'élimination de la saumure produite, de réduire la consommation d'énergie, de générer des énergies renouvelables et de récupérer les ressources minérales.

- **Conclusion :**

Les procédés et applications membranaires deviennent une technique cruciale dans les processus industriels, la conservation de l'environnement et la production d'énergie. Par conséquent, la recherche fondamentale sur les propriétés des membranes et les phénomènes de transport dans les diverses opérations membranaires est inévitable pour l'avenir de la science et de la technologie des membranes. Les membranes avancées avec un flux élevé et une séparabilité élevée ainsi qu'une polarisation de concentration réduite et un encrassement zéro pour les applications à grande échelle seront la plus grande préoccupation dans l'avenir. La haute efficacité énergétique, la simplicité opérationnelle, la facilité de fabrication, la sélectivité de transport et la compatibilité environnementale font de la technologie des membranes un outil important pour les processus de séparation avancés et les transformations chimiques.

Chapitre II : Techniques de dessalement

II .Le dessalement de l'eau de mer

II.1 Problématique :

La pérennité de l'espèce humaine dépend étroitement de la disponibilité des ressources en eau. Or l'accroissement de la population et l'augmentation du niveau de vie des pays émergents entraînent de véritables problèmes de quantité et qualité de l'eau disponible. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé, environ une personne sur dix n'avait pas accès à l'eau potable en 2015, [100]. Cette même année, l'Institut des Ressources Mondiales s'est appuyé sur des modèles de changements climatiques et des scénarios socio-économiques pour évaluer quels pays seraient les plus exposés au manque d'eau d'ici 2040, représentés par la figure II. 1. Cette étude a révélé que 33 pays auront d'extrêmes pénuries d'eau en 2040 et 14 de ces pays se situent au Moyen Orient [101].

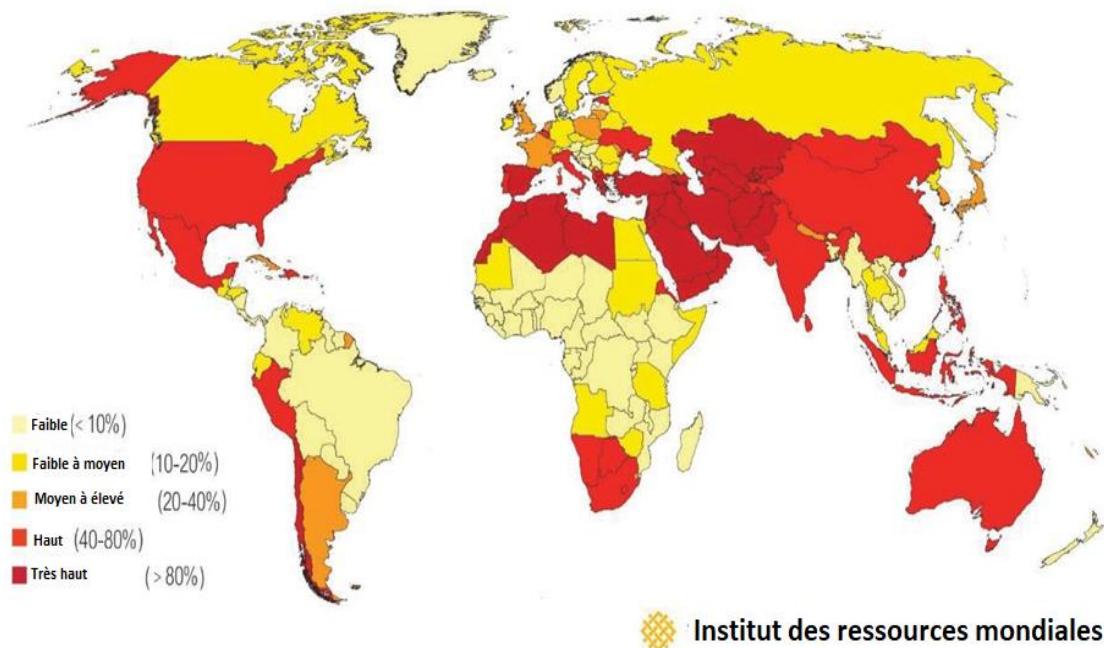


Figure II .1 : pénuries d'eau dans le monde en 2040. [101].

Sur la Figure II. 1, les fractions représentent le risque potentiel lié au manque d'eau. Plus le pourcentage est élevé, plus le risque est grand. De ce fait, il est clair que de nombreux pays vont se retrouver en pénurie d'eau potable disponible dans les prochaines années.

Pourtant, l'eau est une des ressources les plus présentes et inépuisables sur terre, couvrant les $\frac{3}{4}$ de la planète [102].

Environ 97% de l'eau sur Terre est de l'eau salée et 3% est de l'eau douce contenue aux niveaux des pôles (sous forme de glace: environ 70% de l'eau douce), des eaux souterraines (29.75% de l'eau douce), des lacs et des rivières(0.25% de l'eau douce). Du fait de sa nette abondance, dessaler l'eau de mer – ou les eaux saumâtres, moins salées que l'eau de mer mais impropres à la consommation – est une solution présentant un immense intérêt et attrait. Cette solution est également justifiée par le fait que près de 40% de la population vit à moins de 100 km des côtes. [103].

La formation d'eau douce à partir d'eau de mer se fait depuis toujours à travers le cycle naturel de l'eau. En effet, dans la nature, de la vapeur d'eau se forme à partir de l'évaporation des océans, sous l'action du soleil, et forme ainsi des nuages qui provoquent de la pluie ou de la neige lorsque qu'ils atteignent des régions plus froides. Le dessalement d'eau de mer fonctionne sur ce même principe, l'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qui, une fois liquéfiée, permet d'obtenir de l'eau douce, le sel n'étant pas volatil. Ce principe de dessalement est utilisé depuis l'antiquité pour l'approvisionnement d'eau potable à bord des navires. Les marins, en portant l'eau de mer à ébullition, liquéfiaient la vapeur produite sur de larges éponges froides [104].

Le dessalement par distillation a été pratiqué depuis plus de 2000 ans. C'est à partir du 18ème siècle qu'il a été observé qu'il était possible d'améliorer les performances des processus de distillation en économisant l'énergie, en augmentant la production et en augmentant la pureté de l'eau produite [105].

Les procédés membranaires, consistant à extraire de l'eau douce à partir d'eau salée au travers d'une membrane semi-perméable notamment sous l'action d'une pression, sont quant à eux apparus plus tardivement. Bien que le phénomène ait été mentionné par Plin en 77, le procédé d'osmose inverse a vu le jour autour de 1959 à l'Université de Californie [106], dans la continuité de la méthode de séparation des sels contenus dans les mélasses. [107].

Les deux grandes familles de procédés utilisés pour le dessalement d'eau de mer, mentionnées ci-dessus, ont surtout été développées de manière industrielle à partir de la moitié du 20ème siècle. Depuis, les intérêts académiques et industriels ont été décuplés permettant ainsi de rendre ce moyen de production d'eau douce fiable, performant et à des coûts minimalisés

II.1.1 Origine de l'eau sur la terre :

L'eau existe dans notre système solaire, très probablement, depuis le début, et a pour origine le processus de fusion thermonucléaire qui a produit les éléments du système périodique et leurs composés. On admet généralement que la majeure partie de l'eau formant l'hydrosphère provient d'un dégazage du manteau par l'intermédiaire des éruptions volcaniques et des laves qui se sont épanchées à la surface (basaltes) au cours des 5 milliards d'années d'existence de la terre. Cependant, on sait que la terre est également exposée aux collisions avec du matériel cosmique dont les comètes de glace. Ainsi, une origine extraterrestre d'au moins une partie de l'eau terrestre est probable [108].

- Il existe trois réserves disponibles d'eaux naturelles :
 - **Les eaux souterraines (aquifère, nappe phréatique, infiltration) :**
Les eaux souterraines sont contenues dans des aquifères de natures très variées, définies par la porosité et la structure du terrain. Ces paramètres déterminent le type de nappe et le mode de circulation de l'eau[109] ;

- **Les eaux de surfaces captives ou en écoulement (lacs, étangs, rivières, fleuves) :** Les eaux de surface ont pour origines soit les eaux souterraines (par une résurgence, source), soit les eaux de ruissellements. Ces eaux se regroupent en cours d'eau et sont caractérisées par une surface libre, surface de contact entre l'eau et l'atmosphère, toujours en mouvement, avec une vitesse variable. Les eaux de surface peuvent se retrouver stockées dans des réservoirs naturels (lacs) ou artificiels (barrages), de profondeur variable. La surface d'échange se retrouve alors quasiment immobile [109] ;

- **Les eaux de mer et eaux saumâtres :** Ces eaux sont caractérisées par une salinité importante. Selon leurs origines (pleine mer, estran, estuaire) les caractéristiques physiques sont très variables : turbidité, matières en suspension, présence de plancton, teneur en sable, pollution par des rejets urbains ou industrielle, influence des fleuves, influence de la marée, température de l'eau,... À cause de sa forte concentration en sels, l'eau de mer n'est pas potable et nécessite une importante désalinisation [109].

II.2 Propriétés de l'eau :

- Masse volumique :

La masse volumique de l'eau diminue avec la température et augmente un peu avec la pression.

-Viscosité dynamique :

La viscosité dynamique de l'eau varie fortement dans la gamme de température 0 à 100 °C (plus d'un facteur 6). Toute modélisation ou essai doit tenir compte de ce phénomène comme par exemple les maquettes testées en analogie de Reynolds [110].

-Propriétés thermique :

. Conductivité thermique :

La conductivité thermique augmente avec la température jusque vers 130 °C et diminue ensuite. Elle augmente avec la pression. Une interpolation linéaire sur des plages de température et pression d'une centaine de °C et de bar donne de bons résultats [110].

-Propriétés électriques :

a. Constante diélectrique :

Le constant diélectrique de l'eau, de l'ordre de 80 farads stéradian par mètre, est l'une des plus élevées que l'on connaisse ; C'est pourquoi l'eau possède un pouvoir ionisant très important . [111].

b. Conductivité électrique de l'eau :

L'eau est légèrement conductrice. La conductivité de l'eau la plus pure que l'on ait obtenue est de 4,2 micros siemens par mètre à 20°C. Elle augmente lorsque des sels sont dissous dans l'eau et varie avec la température.[112].

II.3 Procédés de dessalement :

Divers procédés de dessalement existent pour dessaler l'eau de mer et les eaux saumâtres mais beaucoup ne sont pas encore passés à l'échelle industrielle. On distingue :

- les procédés avec changement de phase (distillation, congélation, extraction par formation d'hydrates solides...)
- les procédés avec utilisation de membranes (électrodialyse, osmose inverse, procédé osmo-ionique...)
- les procédés agissant sur les liaisons chimiques (échange d'ions, extraction par solvants sélectifs...) [113].

La figure II.2 présente les procédés de dessalement les plus utilisés :

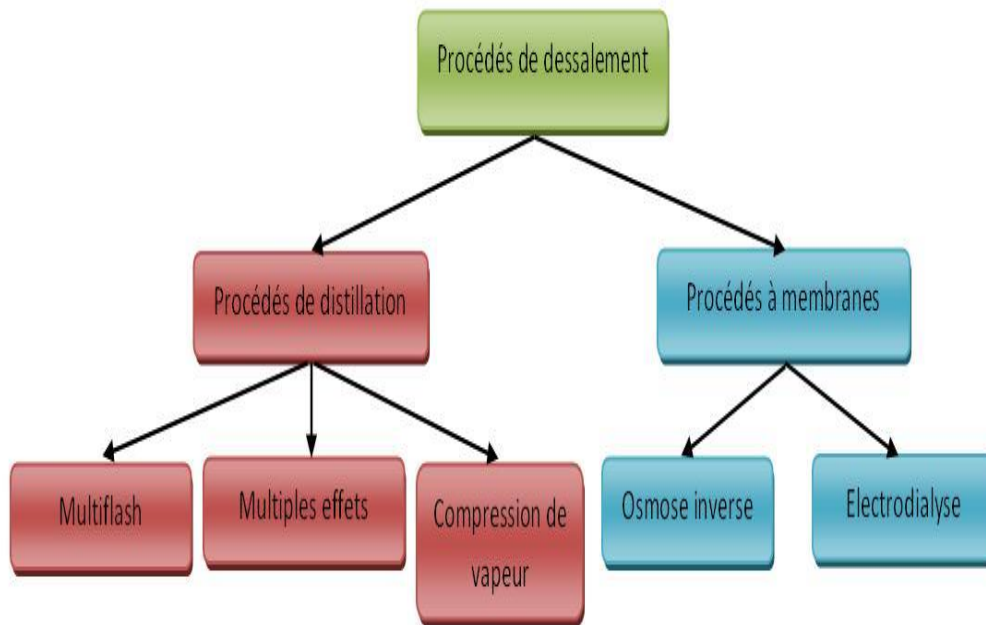


Figure II.2 : Procédés de dessalement conventionnels industrialisés [114].

Il existe donc des procédés conventionnels (distillation thermique, osmose inverse, électrodialyse,...) et d'autres procédés qui sont non conventionnels (distillation solaire, congélation, marais salants, cristallisation,...). Ces procédés sont présentés ci-dessous :

-Procédés conventionnels les plus utilisés :

- l'osmose inverse
- la distillation
- l'électrodialyse

-Procédés non conventionnels :

Ces procédés sont communément moins utilisés comparé à l'osmose inverse et aux procédés de distillation ou bien ne sont pas encore industrialisés :

- les marais salants
- la distillation solaire
- la distillation membranaire
- la congélation
- la cristallisation.

Habituellement, les procédés de dessalement non conventionnels permettent d'approvisionner les zones arides en eau douce [114].

II.3.1 Les Procédés de distillation :

a. Distillation à simple effet :

Principe : l'eau de mer est portée à ébullition jusqu'à évaporation dans une enceinte où la pression est réduite (la température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression). On récupère ensuite la vapeur d'eau qui se condense en se refroidissant. Les gouttelettes d'eau douce sont alors recueillies. Ce procédé consomme beaucoup d'énergie figure II. 3. C'est pourquoi il n'est rentable que dans les régions où l'énergie est bon marché (les pays du Golfe, par exemple, qui ont du pétrole mais peu de ressources d'eau douce). Depuis peu, on construit des usines de dessalement sur le même site qu'une centrale électrique ce qui permet ainsi de récupérer la chaleur induite (procédé hybride). [115]

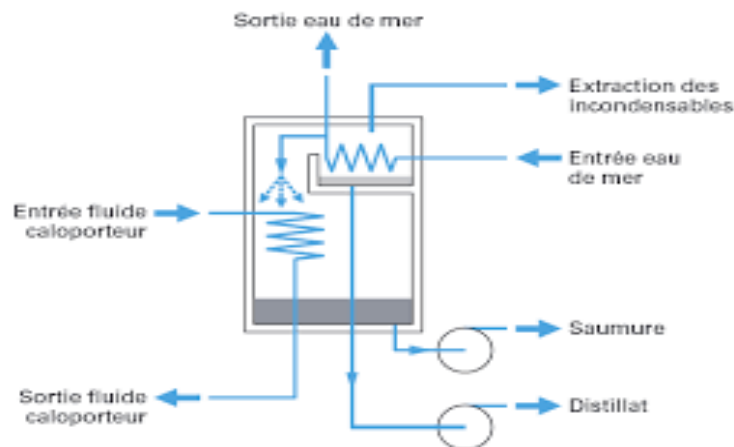


Figure II. 3 : distillation à simple effet.

b. Distillation à multiples effets (MED) :

La distillation à multiples effets (MED : Multi-Effect Distillation) reprend le principe de la distillation à simple effet. Le concept de la distillation à multiples effets réside dans la juxtaposition de plusieurs cellules (ou effets). On diminue progressivement la pression (et donc la température) d'une cellule à l'autre.

Dans la première cellule (où la température est la plus haute), le fluide de chauffage (ou fluide caloporteur) chauffe l'eau de mer jusqu'à évaporation pour produire de la vapeur d'eau, condensée ensuite sur des faisceaux de tubes refroidis dans le but d'obtenir de l'eau douce.

La vapeur passe alors dans la deuxième cellule (cette seconde cellule contient une pression légèrement inférieure) et permet de chauffer l'effet suivant. Le processus est répété plusieurs fois. La saumure et le distillat sont récoltés dans chaque cellule figure [115].

Deux types d'évaporateurs à multiples effets sont industrialisés : les évaporateurs à longs tubes verticaux et les évaporateurs à tubes horizontaux arrosés. Actuellement, ce dernier procédé revient en force sur le marché car son coût d'investissement est de 10 à 20% plus faible que pour la distillation multistage présentée dans le prochain point. De plus, sa consommation énergétique est également plus faible. Ce procédé atteint généralement des capacités de l'ordre de **10 000 m³/jour** avec un coût correspondant de **0,64 euros/m³**. La capacité maximale en service est localisée en Arabie Saoudite à Al Hidd II avec 272 520 m³/j [116].

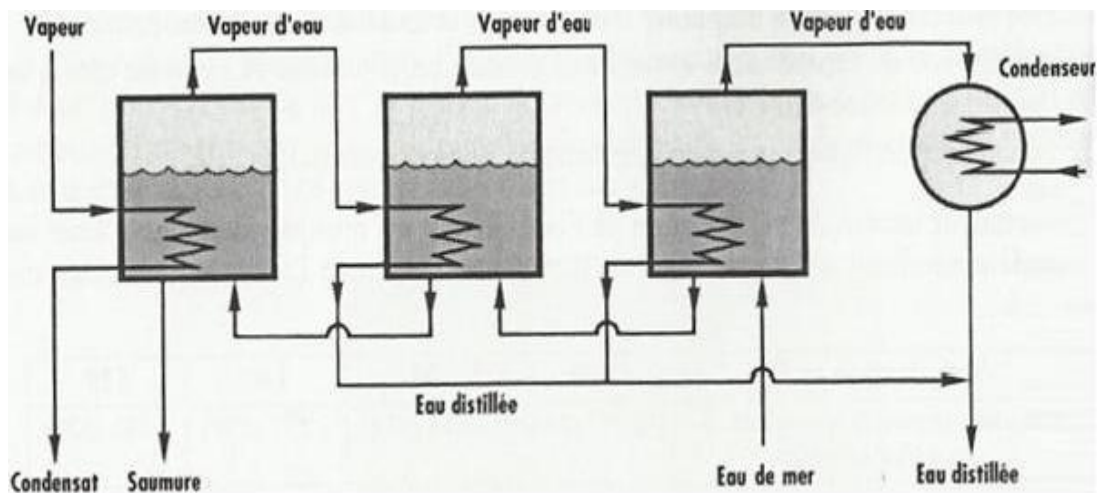


Figure II.4 : Distillation à multiples effets [114].

c. Distillation par compression de vapeur (Vapor compression ou VC) :

Ce procédé a pour principe de récupérer la chaleur de condensation avec un apport d'énergie sous forme mécanique. On peut l'utiliser dans un évaporateur simple ou à multiples effets. Un compresseur aspire la vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique s'il s'agit d'une petite installation. Après la compression, cette vapeur haute pression a une température plus élevée que celle régnant dans l'évaporateur qui peut donc servir de condenseur pour cette vapeur qui le traverse dans un réseau de tuyaux, réchauffant l'eau à dessaler en lui cédant la chaleur de condensation et commencer de la sorte un nouveau cycle, avant d'être évacuée sous forme d'eau distillée. Figure II.5

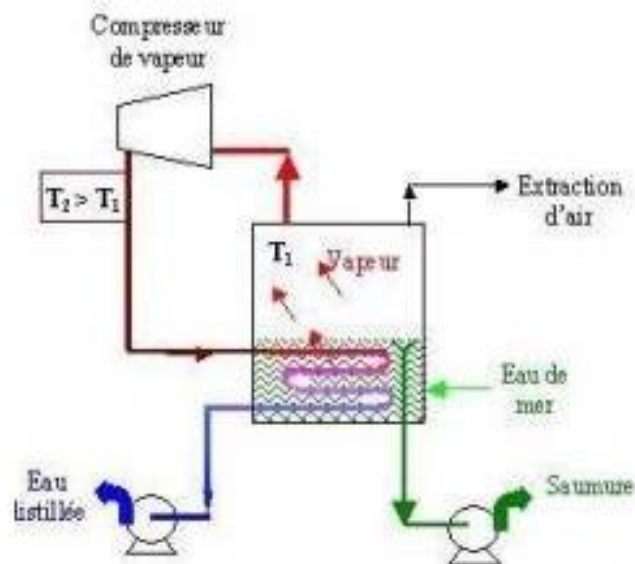


Figure II. 5 : Distillation par compression de vapeur (VC)

Ce système, qui produit de l'eau pure, a un coût énergétique moyen de 7 à 14 kWh/m³ selon qu'il s'agit d'un ou de deux effets. Il ne fonctionne qu'à l'énergie électrique. Cependant, on peut associer au compresseur un échangeur thermique pour réchauffer l'eau salée en récupérant la chaleur perdue par les gaz d'échappement ou les vapeurs de combustion [117].

-Récupération d'énergie :

-Couplage avec groupe électrogène :

La récupération se fait aux niveaux des gaz d'échappement et du circuit de refroidissement. Un poste de distillation associé dans les meilleures conditions à un moteur de 1000 KW pourra fournir 230 m³/j d'eau douce. Ce type d'unité équipe les navires et les communautés isolées (îles) [118].

-Couplage avec une turbine à gaz :

Dans ce cas, une chaudière récupère la chaleur des gaz de combustion de la turbine et produit de la vapeur nécessaire au fonctionnement de l'unité de distillation, la production prévisible est de 500 à 1000 kw d'énergie électrique produite. [118].

-Couplage avec une centrale thermique à vapeur :

L'idée est d'utiliser la vapeur qui s'échappe de la turbine à vapeur, c'est la plus importante. Là également, la production attendue est de 500 à 1000m³/j d'eau douce pour 1000 KW produits d'énergie électrique. [118].

d. Distillation par détente successives (multi stage flash MSF) :

Ce procédé permet de diminuer les effets d'entartrage causés par la distillation à multiples effets par exemple. Voici le principe : l'eau s'échauffe dans les différents condenseurs de chaque étage (du n^e au 1^{er}) avant d'être introduite dans un réchauffeur qui permet d'augmenter encore la température. L'eau chaude est conduite vers le bas du premier évaporateur où la pression est inférieure à la pression de saturation, vaporisation instantanée par détente appelée Flash (figure II.6).

La vapeur produite se condense au contact du condenseur de l'étage concerné et le condensat (eau douce) est recueilli au sein de chaque étage. La température décroît depuis l'étage 1 jusqu'à n et par conséquent la pression, ceci permettant l'écoulement de l'eau entre les divers étages sans la nécessité d'utiliser des pompes.

Ce procédé à une capacité typique de **25 000 m³/jour** à **0,88 euros/m³**, la capacité maximale en service de 880 000 m³/jour étant observée en Arabie Saoudite à Shoaiba 3 [116].

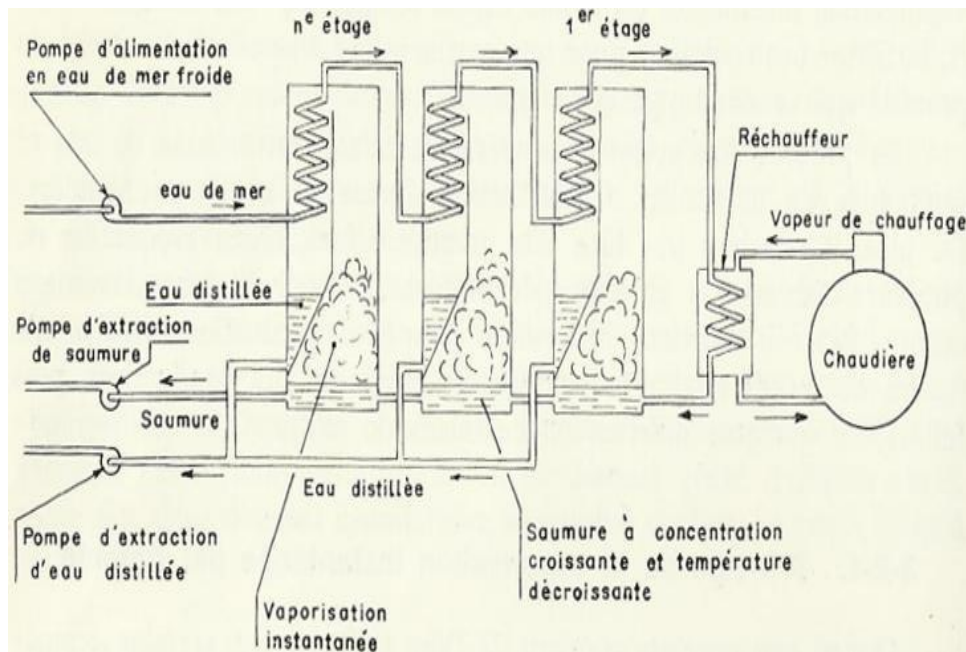


Figure II.6 : Distillation Flash [119]

II.3.2 Les Procédés membranaire :

a. Osmose inverse :

L'osmose est un phénomène naturel : lorsque deux solutions salines de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-perméable, l'eau passe spontanément de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée. Lorsque l'équilibre est établi, la différence de pression entre les deux compartiments est la pression osmotique.

L'osmose inverse repose sur le principe contraire. Lorsqu'une pression importante (supérieure à la pression osmotique) est appliquée à l'eau salée, l'eau douce traverse la membrane. [120].

La membrane est constituée d'une pellicule de polymère perméable et sélective ; elle permet seulement le passage des molécules d'eau, produisant ainsi de l'eau douce. La pression osmotique est de l'ordre de 29 bars pour l'eau de mer. Plus l'eau est chargée en sels, plus la pression osmotique est élevée. Elle est donnée par la loi de van 't Hoff. Donc pour pallier l'augmentation de la pression osmotique au fur et à mesure que l'eau est extraite et pour produire un flux d'eau douce significatif, il est nécessaire que le système fonctionne sous une pression nettement plus importante, soit environ 60 à 70 bars, [121].

-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 [122]

-L'échangeur de pression :

Pour une efficacité optimale du phénomène d'osmose, la pression de l'eau dans le dispositif doit être de 13 bars. Pour pressuriser l'eau de mer entrante à 13 bars on utilise un échangeur de pression qui est un système intelligent, fiable et économique.

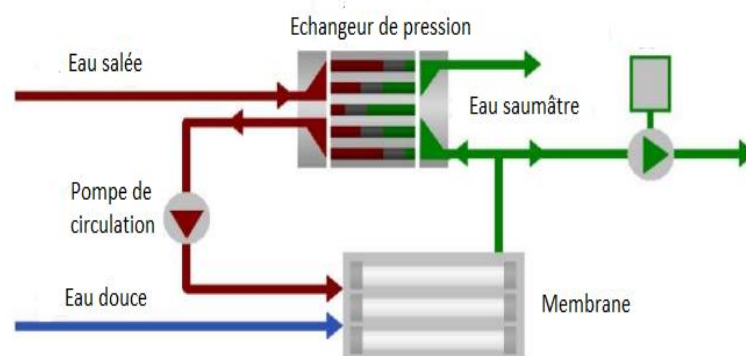


Figure II. 07 : échangeur de pression

- L'eau de mer entre dans le rotor et pousse l'eau saumâtre (eau dont la teneur en sels est sensiblement inférieure à celle de l'eau de mer).
- Le rotor est donc plein d'eau de mer à basse pression.
- On injecte de l'eau saumâtre à haute pression issue des membranes (deux tiers de l'eau pressurisée par les membranes est injecté dans l'échangeur).
- L'eau de mer est chassée dans la pompe de circulation, et il ne reste plus que de l'eau saumâtre dans l'échangeur. [123].

Ce cycle se reproduit ainsi indéfiniment et l'échangeur de pression permet ainsi de gérer la pression de l'eau alimentant la turbine produisant l'électricité. Etant donné que ce cycle est répété 1200 fois par minute, le mélange entre l'eau salée et saumâtre est très faible. Ce cycle est déclenché par la rotation du rotor. Le rotor est aligné obligatoirement soit avec les deux ouvertures supérieures (1 et 2), soit avec les deux ouvertures inférieures (3 et 4), ou enfin avec aucune ouverture (donc aucun échange de liquide) [124].

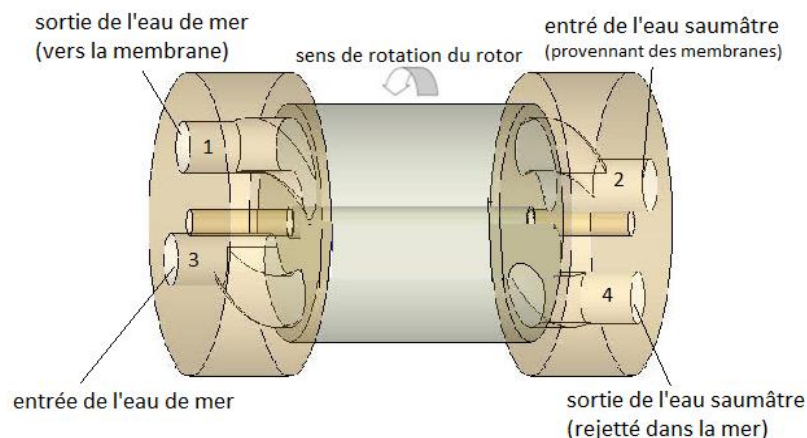


Figure II. 8 : échangeur de pression

Bien que la turbine PELTON, avec son rendement d'environ 74% soit la plus utilisée, elle est progressivement remplacée par le booster de pression hydraulique HPB [118].

b.L'électrodialyse :

Cette méthode repose aussi sur la séparation des sels et de l'eau au travers d'une membrane semi-perméable. Sous l'action d'un champ électrique, les ions de la solution saline migrent à travers des membranes imperméables à l'eau, dites sélectives. Un électrodialyseur, est composé de plusieurs compartiments et de membranes alternativement anioniques et cationiques. Sous l'effet du champ électrique, les cations migrent dans le sens du courant

électrique en ne traversant que la membrane cationique. Les anions circulent dans le sens contraire du courant et ne peuvent traverser que la membrane anionique. De ce fait, certains compartiments sont appauvris en sels dissous tandis que d'autres en seront enrichis. Les compartiments de dilution et de concentration sont donc alternés. L'eau dessalée est ainsi obtenue en récupérant les solutions des compartiments de dilution. La figure II. 9 représente un électro-dialyseur. On comprend bien que la séparation reposant sur la sélectivité des membranes, il en existe une grande variété pour choisir la membrane adaptée au fluide à traiter. Ce sont généralement des polymères aromatiques fonctionnalisés afin d'orienter leur sélectivité soit aux anions, soit aux cations.

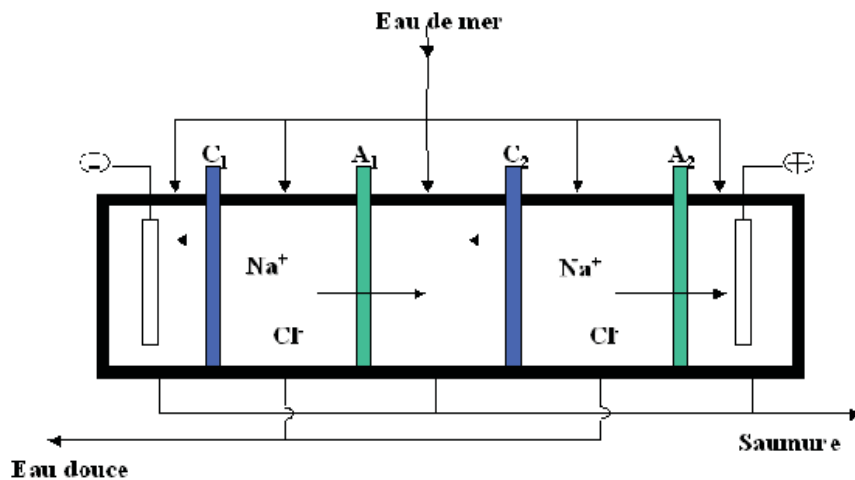


Figure II.9 : principe de fonctionnement de l'électrodialyse

II.3.3 Procédé de congélation :

C'est un autre procédé de dessalement qui se base sur la différence entre les points de congélation de l'eau douce et de l'eau .ce procédé est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau de mer et souvent inférieure à 0°C. Lorsque la température est suffisamment basse, on remplit ces bassins sur une épaisseur de 1 à 1,5 cm. Les cristaux de glace sont séparés de saumure, lavés du sel puis fondus : on obtient de l'eau douce [125]

*Chapitre III : Dessalement et énergie
renouvelable ; un choix stratégique.*

III INTRODUCTION

La crise de l'eau potable annoncée pour les années à venir relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chères, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement.

L'Algérie, comme ses pays voisins, est confrontée à un problème de manque d'eau douce [126].

En fait, à l'exception des eaux fossiles des nappes profondes du Sahara, les ressources hydrauliques naturelles de l'Algérie dépendent essentiellement de la pluviométrie qui est très inégalement répartie sur le territoire et est caractérisée par de fortes irrégularités.

Les volumes des précipitations sont très variables dans le temps : concentration sur quelques mois dans le Nord et quelques jours par année dans le Sud du pays, des années de fortes pluies peuvent être suivies par de longues périodes de sécheresses. Des fluctuations aussi marquées vont affecter, d'une année à l'autre, le volume des ressources renouvelables disponibles (écoulements superficiels et alimentation des nappes souterraines).

Ainsi, la région littorale du Nord, qui longe le bassin méditerranéen et ne représente que 7% de la surface du territoire national, accapare 90% du total des écoulements superficiels du pays, ces derniers sont estimés à 12,4 milliards de m³ par an. Le reste étant partagé entre les Hauts Plateaux pour 6% et les bassins sahariens pour 4%.

De plus, les précipitations sont, en moyenne, deux fois plus importantes à l'est qu'à l'ouest, le même déséquilibre se retrouve dans les potentialités hydriques de ces régions. [Gestion des ressources en eau [127].

En tenant compte des débits que pourraient fournir les nappes souterraines situées au nord de l'Atlas saharien, région littorale et Hauts Plateaux, et réalimentées par les précipitations, on peut évaluer à 14,4 milliards de m³ le volume total annuel des eaux renouvelables. Mais une partie seulement, 10 milliards de m³ au maximum, de ce volume est exploitable parce que physiquement et techniquement mobilisable.

À cela s'ajoute deux autres types de ressources aux eaux naturelles renouvelables, il s'agit :

- les eaux fossiles des grandes nappes profondes, de la région du Sahara septentrional dont le débit d'extraction maximum est fixé, actuellement, à 5 milliards de m³ par an ;
- les eaux « non conventionnelles » fournies par les stations de dessalement d'eau de mer installées sur le littoral algérien. [127].

En mobilisant une grande proportion de ses ressources d'eau, eaux de surface et souterraines, des barrages, des puits profonds et des usines de dessalement, l'Algérie a, actuellement, résolu le problème de l'alimentation en eau douce des grandes villes et des grandes agglomérations du Nord du pays. Mais, pour les communautés rurales lointaines, le problème de la disponibilité de l'eau potable demeure non résolu.

Une des solutions pour ces régions enclavées est le dessalement utilisant l'énergie solaire couplé avec des techniques membranaires. Cette alternative est considéré comme très intéressante pour la production de l'eau potable pour les zones rurales et arides disposant d'une eau saumâtre dont la salinité est peu élevée, c'est une technique prometteuse vu que le temps d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national excède 2 000 h annuellement et peut atteindre 3 900 h au Sahara.

L'énergie quotidiennement obtenue sur une surface horizontale de 1 m² est de 5 kWh. Sur la majeure partie du territoire national, nous avons environ 1 700 kWh/m²/an pour le nord et plus de 2 650 kWh/m²/an pour le sud du pays : ce qui énorme

Les énergies renouvelables sont estimées non pas en terme de quantité, ni même en terme de stockage, mais en termes de flux énergétique qui est largement supérieur au niveau actuel de consommation énergétique de l'humanité. Elles peuvent ainsi constituer des énergies de substitution tout à fait réalistes avec en plus, un faible impact sur l'environnement. [128].

Parmi ces techniques, la Distillation Membranaire (MD) est un procédé permettant une économie d'énergie par rapport aux autres procédés de séparation conventionnels comme la Distillation et l'Osmose Inverse (RO)

La MD utilise des membranes poreuses hydrophobes pour séparer physiquement une solution, figure III .01. Le principe de ce procédé est basé sur l'équilibre liquide/vapeur qui contrôle la sélectivité entre les deux phases, les membranes agissent juste comme une barrière physique. L'eau traverse la membrane sous forme de vapeur puis elle est condensée en dehors du module. Plusieurs options existent pour la MD, la plus utilisée est la MD sous vide. Cette configuration consiste à créer un vide, ou une basse pression, du côté perméable d'une membrane microporeuse hydrophobe (coté aval). La force d'entraînement pour le processus est liée aux gradients de pression et de chaleur entre les deux côtés de la membrane.

La Distillation Membranaire offre l'avantage de travailler avec un niveau bas de température ce qui donne la possibilité d'utiliser les énergies renouvelable tels que l'énergie solaire ou la géothermie. [129].

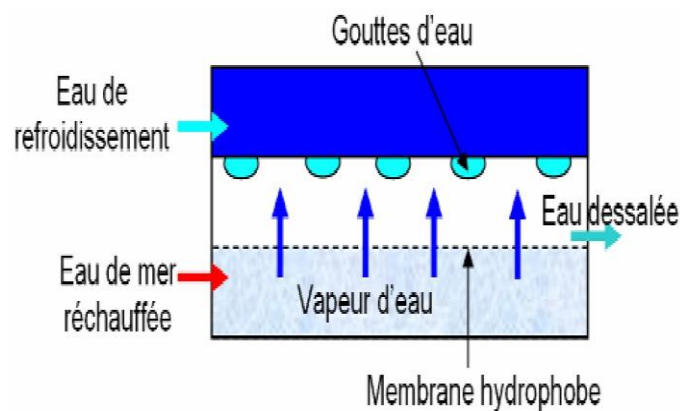


Figure III.01 : Principe de la distillation membranaire [116].

Devant une crise d'eau certaine qui commence à se faire sentir à travers le monde, en plus des contraintes économiques pour un développement durable, des solutions appropriées nécessitent d'être élaborées afin de se préparer à faire face à ce défi qui menace l'existence même de l'homme.

Notre pays qui dispose de ressources hydriques salines considérables et d'un gisement solaire tout aussi important, doit utiliser les techniques de dessalement, dont la fiabilité n'est plus à démontrer, en les associant à des sources d'énergies renouvelables. Cette solution constitue un moyen assez fiable pour produire de l'eau potable. Il faut cependant signaler que ce moyen reste économiquement fiable seulement pour des unités de petites capacités allant de quelques m³ à des dizaines de m³, voir des centaines de m³ d'eau potable par jour. Pour de grandes capacités, l'association des procédés de dessalement avec les énergies renouvelables nécessitent des coûts d'investissement élevés et la fiabilité de tels systèmes n'est pas toujours assurée.

Les procédés de dessalement se répartissent en deux grandes catégories ; d'une part les procédés à distillation (qui nécessitent un changement de phase, évaporation/condensation) et d'autre part les procédés à membranes (filtration).

III .1 Association des procédés à distillation avec l'énergie solaire :

Pour leur fonctionnement, les procédés à distillation nécessitent pour la grande part de l'énergie thermique pour assurer le chauffage de l'eau salée. Pour l'eau de mer, par exemple, 100 à 50 thermies par m³ d'eau produite suivant le rendement de l'installation. De plus, cette énergie thermique doit être fournie à un niveau de température relativement faible, entre 60 et 120 °C suivant la technologie adoptée. La source de chaleur peut être fournie, dans le cas d'un accouplement solaire, par des Capteurs Solaires Plans (CSP) ou à concentration.

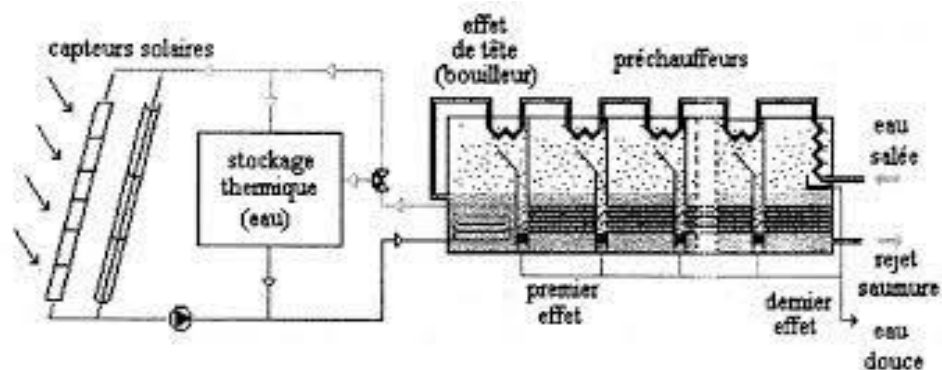


Figure III. 02 : Schéma d'une installation de dessalement par multiple-effets accouplés à des capteurs solaires [130].

Les procédés les plus utilisés et qui sont susceptibles d'être accouplés à une source d'énergie solaire sont :

- La distillation solaire directe à effet de serre qui constitue un procédé proprement solaire.
- Les procédés à distillation classique tels que le procédé à Multi-Stage Flash, à multiple-effets, à compression de vapeur.

a. La distillation solaire directe à effet de serre

Ce procédé consiste à chauffer de l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage figure III .03. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais le rendement d'un tel distillateur est relativement faible, de 4 à 5 litres/jour/m².

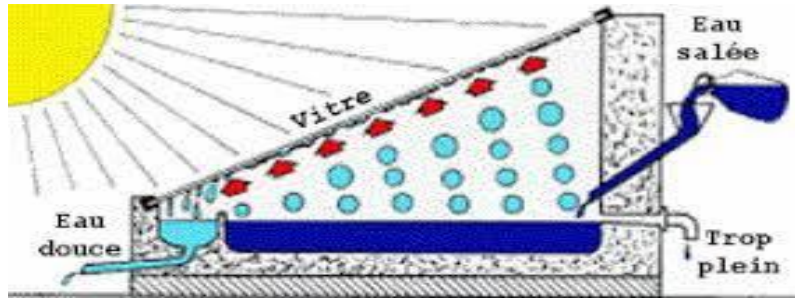


Figure III. 03 : distillateur solaire à effet de serre. [131].

Ils existent deux types de fabrications de distillateurs, ces derniers peuvent être construits soit :

- Sous forme de produit modulable, il s'agit généralement d'un bac (plastic, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage supérieurement. Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation. Le nombre de distillateurs dépend de la capacité d'eau douce produite désirée. Ce modèle n'est utilisé que pour de petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jour. Il est pratique quand les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse, parc auto ...). Ils existent cependant plusieurs variantes, on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiple effets, sphérique.

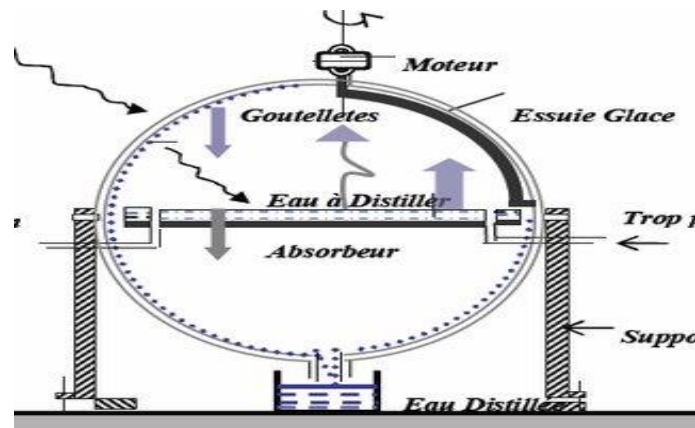


Figure III .04 : Schéma de principe d'un distillateur solaire sphérique [132].

- Quand les besoins sont plus importants, plusieurs centaines de litres/jour, les distillateurs sont construits en maçonnerie/béton sous de grands bassins vitrés. La surface dépend de la quantité d'eau distillée voulue. Un certain nombre d'applications sont effectuées généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles.

L'analyse théorique de ce genre de distillateur est basée sur le bilan thermique qui permet de déterminer son rendement en fonction des différents paramètres [130].

b. La distillation à détente successive ou Multi-Stage Flash (MSF) :

Ce procédé n'est généralement rentable que pour de grandes capacités de production (plusieurs centaines de milliers de m³). Il n'est pas assez souple et nécessite une durée de mise en régime inadéquate pour une application solaire.

c. La distillation par compression de vapeur :

C'est un procédé qui comporte une série d'évaporateurs, ses performances sont cependant améliorées en recyclant la vapeur issue du dernier effet (au niveau thermique le plus bas) en la comprimant pour ensuite l'utiliser comme vapeur de chauffe au premier effet. Ce procédé peut utiliser de l'énergie solaire comme source de chaleur, mais nécessite une énergie supplémentaire pour assurer la compression de vapeur. Celle-ci s'effectue soit avec un compresseur mécanique ou un éjecteur de vapeur (thermoccompression).

d. La distillation par multiple effets :

Dans cette catégorie, on distingue deux procédés : les uns utilisent des tubes verticaux, les autres des tubes horizontaux. L'avantage revient aux tubes horizontaux pour une puissance de pompage moindre et un coefficient global d'échange thermique plus important.

Ce procédé consiste à un ensemble d'effets successifs où la vapeur produite dans un effet est utilisée pour chauffer l'eau de l'effet suivant en s'y condensant, l'apport thermique initial est fourni à l'effet de tête (bouilleur). De par sa simplicité et sa souplesse de fonctionnement, ce procédé est le mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire :

- soit avec des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m³/jour ;
- soit avec des capteurs à concentration pour des capacités plus importantes. Un stockage thermique est souvent utilisé, sous forme de réserve d'eau chaude, pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent ou intermittent.

-Paramètres de conception :

- capacité de l'installation : choix du procédé, choix du type de capteurs, choix du mode de fonctionnement (intermittent ou permanent), l'utilisation ou non d'un système de stockage, idée sur la température de tête de fonctionnement...
- nature de l'eau à traiter : choix du prétraitement, taux de conversion et rapport de performance.
- nombres d'effets : considérations technico-économiques
- nature et situation socio-économique du site : choix des matériaux, degré d'automatisme du système.

III .2 Les procédés à membranes associée à l'énergie solaire :

Les principaux procédés à membranes utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'électrodialyse(ED) et l'osmose inverse (RO).

a. L'électrodialyse :

Ce procédé nécessite, pour son fonctionnement, l'application d'un champ électrique entre une cathode et une anode pour permettre la migration des ions (positifs et négatifs) à travers les membranes. C'est un grand consommateur d'énergie, ce qui rend son application solaire possible, seulement pour les eaux saumâtres de très faible salinité.

b. L'osmose inverse (RO) :

Le principe de ce procédé consiste à faire passer, sous l'effet d'une pression, de l'eau pure à travers une membrane semi-perméable qui a la caractéristique de retenir les sels dissous dans l'eau. Donc on a besoin de l'énergie nécessaire à alimenter une pompe haute pression, ce qui peut être fournie de façon économique (pour les petites installations) par un générateur photovoltaïque ou un aérogénérateur (éolienne). Un certain nombre d'installations sont en fonctionnement à travers le monde, et les résultats obtenus à travers les différentes études et expérimentations rendent son application très encourageante.

III .3 Dessalement solaire :

La distillation solaire est devenue un phénomène très courant au niveau domestique qu'industrielle. Chaque année des milliers des distillateurs sont conçues dans les quatre coins du monde pour des différents objectifs soit l'utilisation personnelle ou dans les laboratoires de recherche pour les études académiques. L'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen figure III 05. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le premier distillateur en Algérie date de 1953 conçu par Mr. Cyril Goméla. [133].

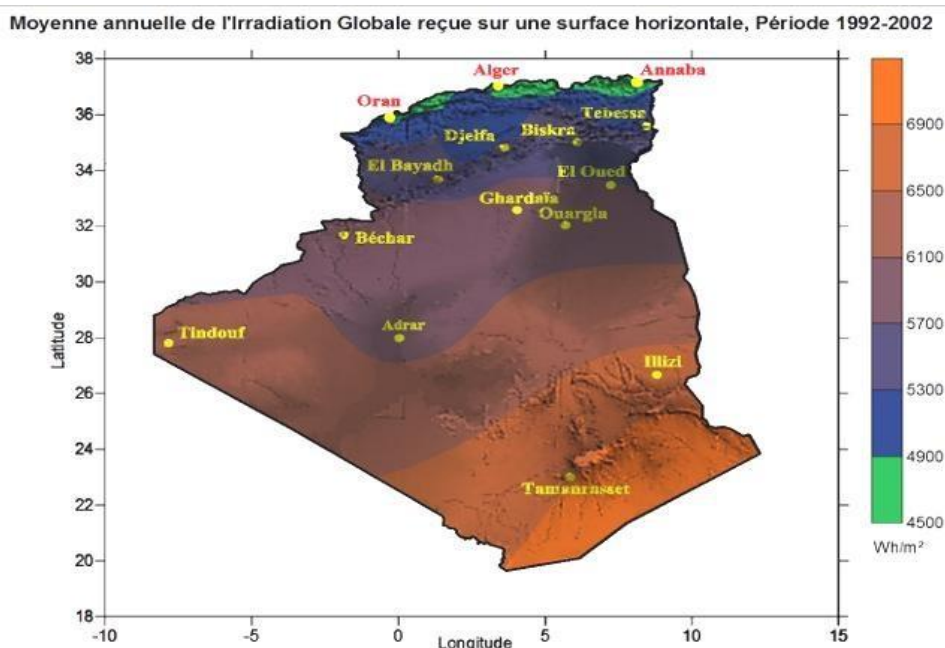


Figure III. 05 : Carte solaire de l'Algérie.

Lorsque le rayonnement solaire frappe une paroi vitrée figure III.06, une partie sera réfléchiée, une partie sera absorbée puis réémise et le reste sera directement transmis. Ce rayonnement direct transmis à l'intérieur des locaux est partiellement absorbé par les parois qui s'échauffent et par la suite le rayonnement infrarouge est réémis dans toutes les directions. Le vitrage étant pratiquement opaque au rayonnement réémis, celui-ci reste piégé à l'intérieur du local, y entraînant une augmentation de la température. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre. [134].

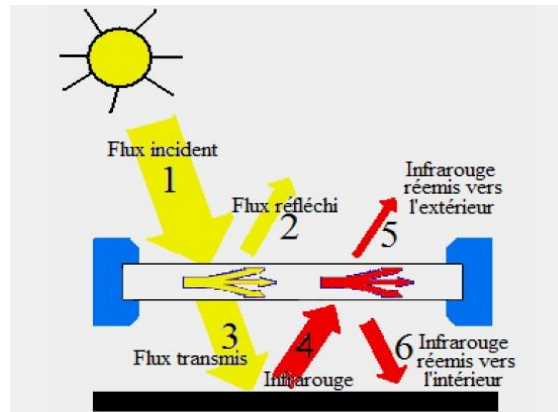


Figure III. 06 : Effet de serre

L'eau distillée est une eau obtenue par évaporation et condensation d'une eau impure et qui est ainsi théoriquement pure exempte de minéraux et d'organismes que l'on pourrait retrouver dans l'eau « naturelle ». L'eau distillée possède, à température ambiante, un pH d'environ 5,4 à cause du (CO₂) qui s'y dissout et se comporte comme un acide. Cette acidité tend à augmenter à cause des rejets de CO₂.

La conductivité électrique de l'eau distillée est proche de celle de l'eau pure qui est quasiment nulle [135]. Les régions les plus nécessiteuses en matière d'eau douce, sont souvent également celles qui ont le rayonnement solaire le plus intense et le potentiel éolien le plus considérable. Pour cette raison, les procédés de dessalement par énergie solaire thermique et énergie éolienne, devraient être les applications les plus prometteuses des énergies renouvelables pour le dessalement de l'eau de mer. [136].

Le distillateur solaire est probablement le système le plus simple de distillation de l'eau de mer. Le débit moyen d'un bon distillateur solaire est de 3-4 l/m² /j. [137].

a. Distillateur solaire simple :

La technique de dessalement de l'eau de mer, exploitant l'énergie solaire en utilisant un distillateur simple, basé sur le principe de l'effet de serre n'est pas nouvelle; Ce processus d'évaporation a été pour la première fois utilisée à grande échelle en 1872 à Las Salinas au nord du désert chilien. Le distillateur et le capteur solaire font partie de la même unité et l'énergie thermique n'est utilisée qu'une fois. Une telle installation se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'un recouvrement transparent en verre ou parfois en plastique incliné. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore (Figure III. 07).

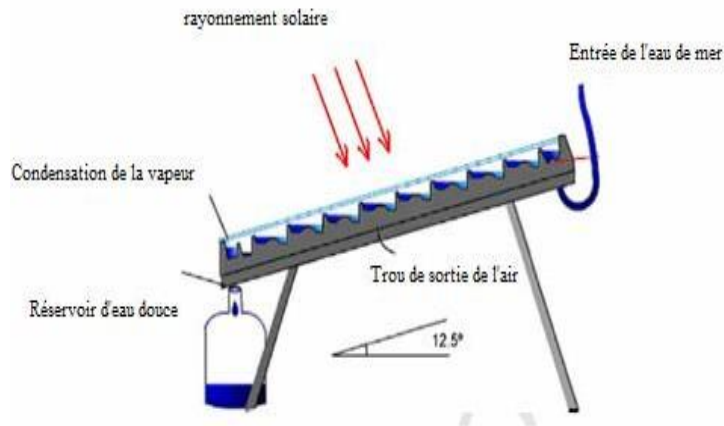


Figure III .07 : Schéma d'un distillateur solaire simple [138].

La vapeur d'eau qui contient l'air chaud est refroidie par les conditions régnant dans le milieu ambiant pour se condenser au contact du vitrage. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage dans une gouttière qui conduit au réservoir de stockage.

La Figure III .08 représente un autre type de distillateur plan mais à doubles pentes. Il a le même principe que le distillateur à simple pente

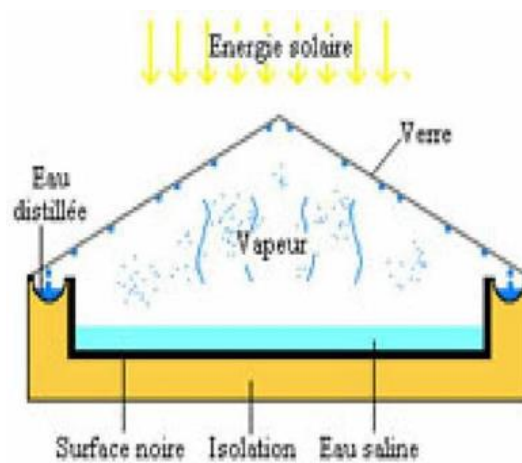


Figure III .08 : Schéma d'un distillateur solaire plan à deux pentes [139].

b. Distillateur sphérique :

C'est un distillateur en plexiglas transparent figure III .09, à bac horizontal, et à surface de condensation demi - sphérique. Le rayonnement incident transmis par la demi - sphère supérieure pénètre dans le bac et sert, à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans le demi - sphère inférieure à travers l'espace annulaire entre le bac et la sphère. Le balayage de la surface de condensation est réalisé au moyen d'un essuie - glace entraîné par un moteur. L'avantage de ce système de balayage est de maintenir la

surface de condensation, constamment transparente au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes. [140].

Ce distillateur est constitué d'une sphère en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposants sur des supports, et d'un système mécanique de récupération de l'eau distillée par l'intermédiaire d'un essuie-glace entraîné par moteur électrique. [141].

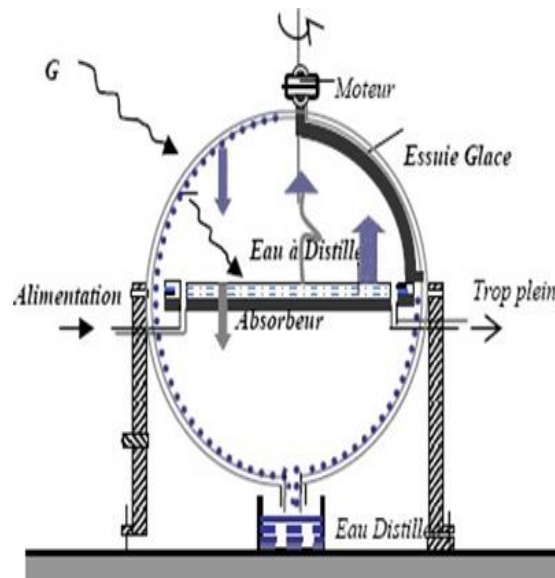


Figure III .09 : distillateur solaire sphérique.

c. Distillateur à cascade

Un distillateur solaire à cascades est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre (figure III .10), le même principe appliqué dans un distillateur plan, sauf que l'absorbeur a une forme en cascade. L'eau salée versée dans le distillateur se répartie sur plusieurs petits bassins, on remarque que si la masse d'eau est faible, l'eau s'échauffe plus rapidement et s'évapore. [142].

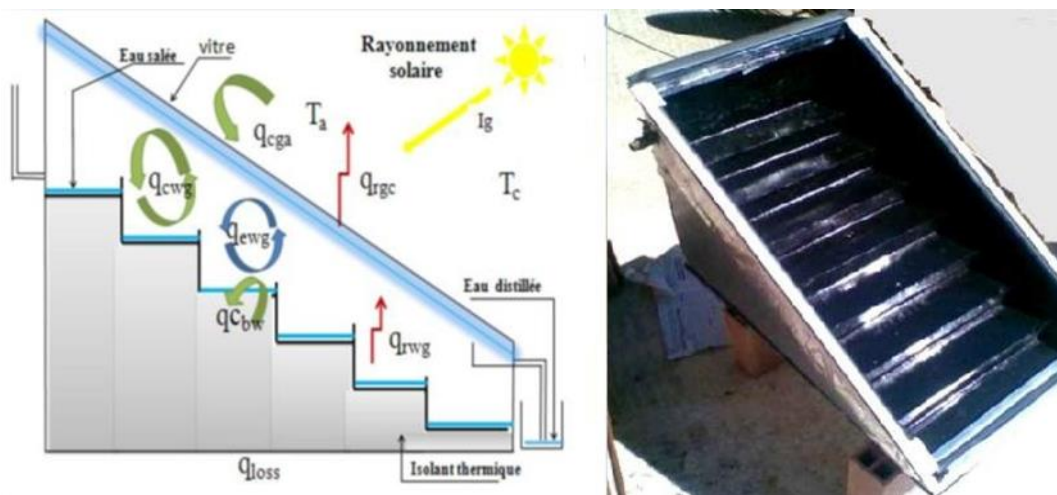


Figure III. 10 : Schéma d'un distillateur solaire à cascade

d. Distillateur à mèche :

Dans un distillateur à mèche **figure III .11**, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche).

Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée [143].

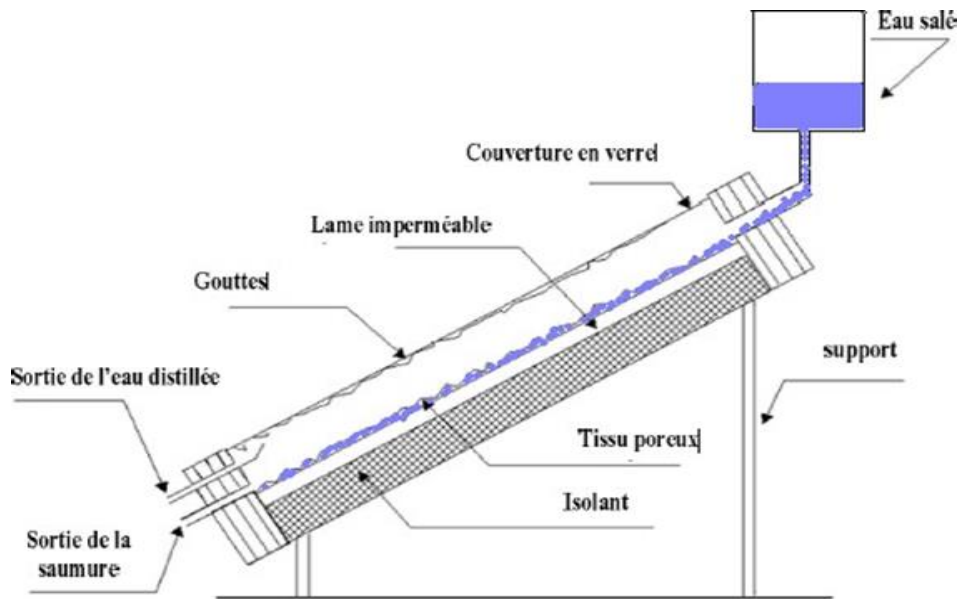


Figure III .11 : Schéma d'un distillateur solaire à mèche

e. Distillateur solaire d'eau de mer à étages multiples avec récupération de chaleur :

Contrairement au distillateur simple décrit précédemment, le système de distillation se compose ici de deux unités différentes **Figure III .12** :

- La source de chaleur (un capteur solaire, ou de la chaleur provenant de la cogénération), Le principe de la cogénération consiste à produire de l'énergie mécanique (convertie en électricité) et de la chaleur en même temps et dans une même installation et à partir d'une même source d'énergie.
- L'unité de distillation : le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs bassins (étages) contenant de l'eau saline, superposés les uns sur les autres. Seul le bassin inférieur est alimenté en énergie thermique. Lorsque l'eau du bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière qui les conduit au stockage. À la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de transformation de phase, dite enthalpie d'évaporation, est libérée.

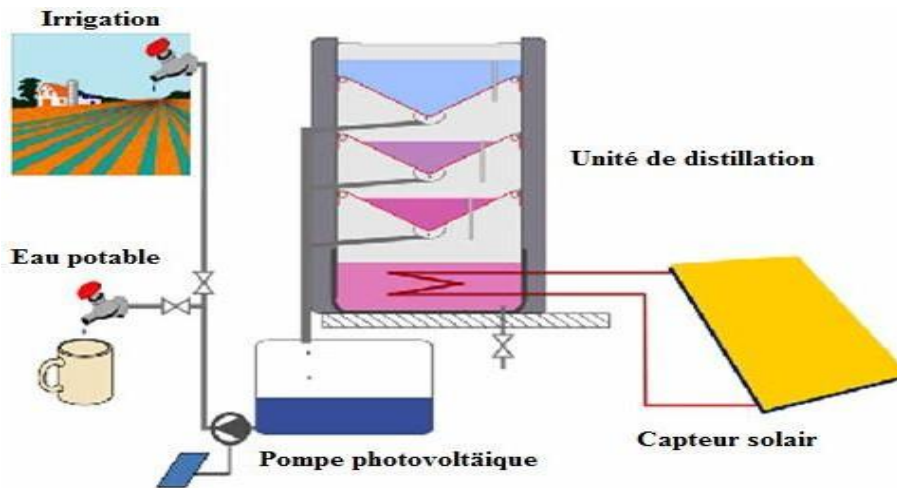


Figure III .12 : Installation solaire de dessalement à étages multiples [144].

Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant et ainsi de suite. De cette manière, l'énergie, prévue pour réchauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie, pour être utilisée plusieurs fois. Ce processus de récupération de chaleur a un effet multiplicateur sur la production d'eau potable.

f.Serres agricoles avec distillateur solaire intégré :

Les serres combinées avec les distillateurs solaires représentent une alternative intéressante pour le développement de la culture de petite taille dans les endroits où on ne dispose que de l'eau saline ou de l'eau saumâtre.

Un modèle de ce système a été construit et analysé par Chaibi et col [145].Où, la toiture de la serre a été configurée comme distillateur solaire **Figure III .13**. Pendant le jour, l'eau saline est pompée d'un réservoir placé au-dessus du toit de la serre, d'où elle s'écoule sur la surface d'évaporation du distillateur dont la couverture supérieure est une feuille de verre. Alors que le fond est composé d'un matériau transparent partiellement léger, qui absorbe une quantité substantielle de la radiation solaire, mais transmet les longueurs d'onde qui sont favorables pour la photosynthèse de la végétation

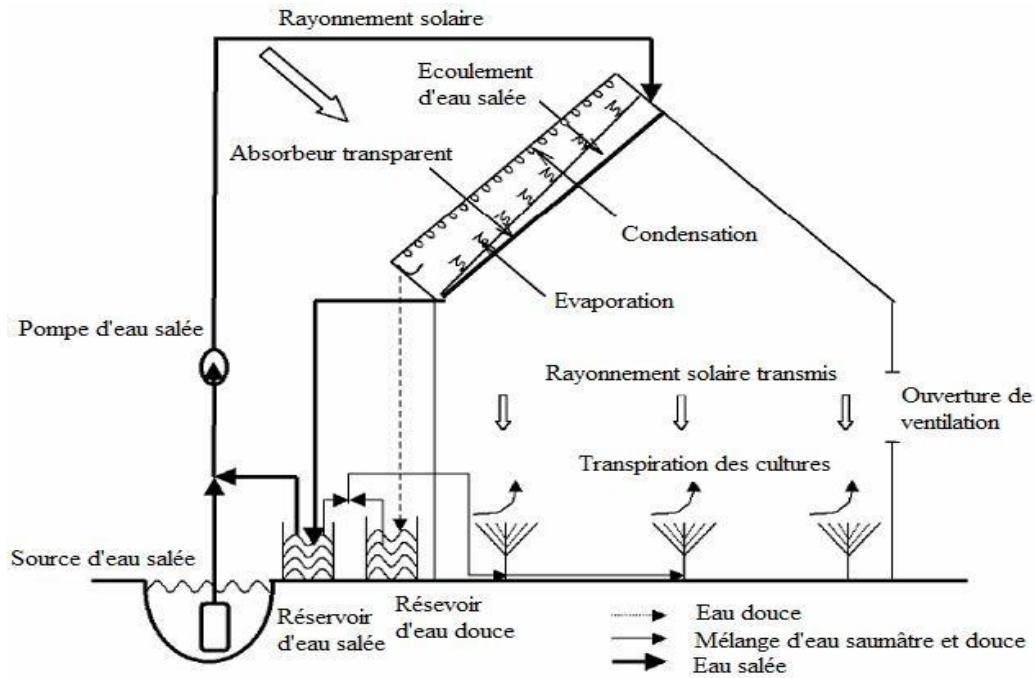


Figure III .13 : Principe de la serre avec système de dessalement solaire intégré [145].

Puisque la majeure partie du rayonnement thermique a été absorbée dans le distillateur, la température de l'air à l'intérieur de la serre est abaissée, ce qui mène à améliorer le climat interne et diminuer la consommation de l'eau d'irrigation. La vapeur d'eau formée est condensée le long du mur intérieur de la couverture supérieure, puis emmagasinée dans un réservoir d'eau douce pour l'irrigation.

g.Humidification-déshumidification :

En cycle ouvert Dai et Zang , [24].ont proposé un système de dessalement avec un cycle d'air ouvert, dans lequel l'eau de mer est chauffée par le soleil dans un collecteur puis pulvérisée sur le mur de l'humidificateur qui a la forme d'un nid d'abeilles **Figure III .14**. De l'air est soufflé au travers de l'humidificateur, où il ressort chaud et humide. Il est ensuite canalisé vers la section de condensation, où il est refroidi. L'eau douce est ensuite stockée dans un réservoir.

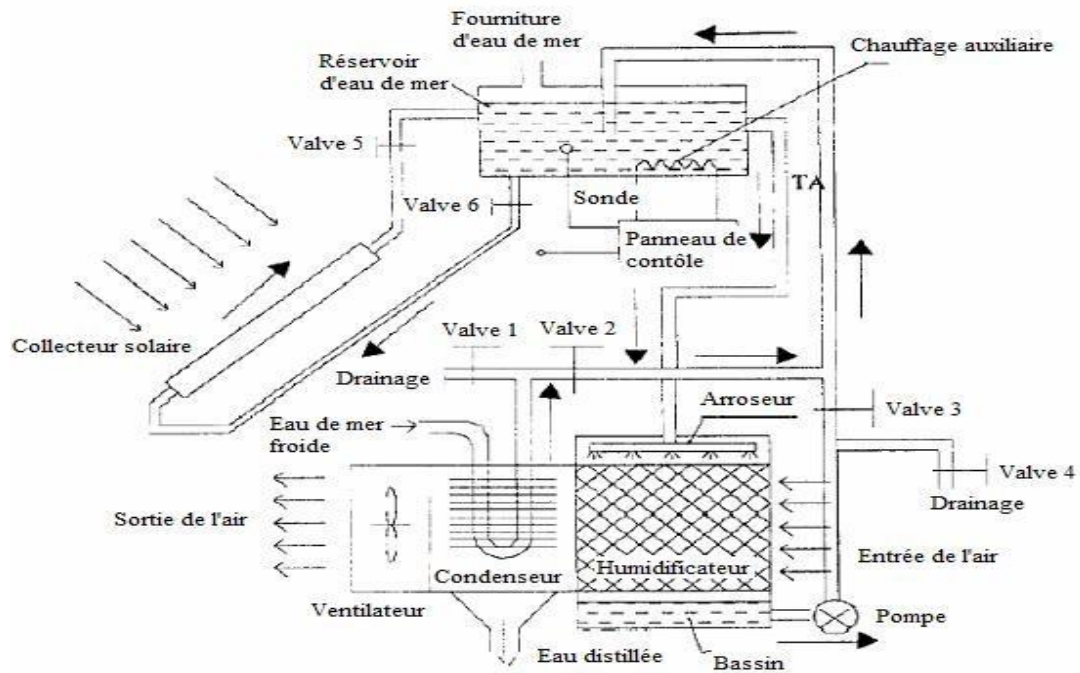


Figure III .14 : Schéma de dessalement par humidification déshumidification en cycle ouvert.
[145]

h.Serre solaire de dessalement (SWG H) :

La serre solaire de dessalement Sea Water Green House (SWG H) est un procédé facile à mettre en œuvre, il offre une solution peu coûteuse pour la production d'eau douce et la culture des sols. Elle répond également à trois préoccupations :

- Assurer la croissance des végétaux ;
- Produire l'eau douce nécessaire aux cultures ;
- Climatiser.

L'intérêt de la serre de la Figure III. 15 est double :

- Assurer localement une base alimentaire en nourriture fraîche ;
- Fixer les populations en valorisant leurs terres.

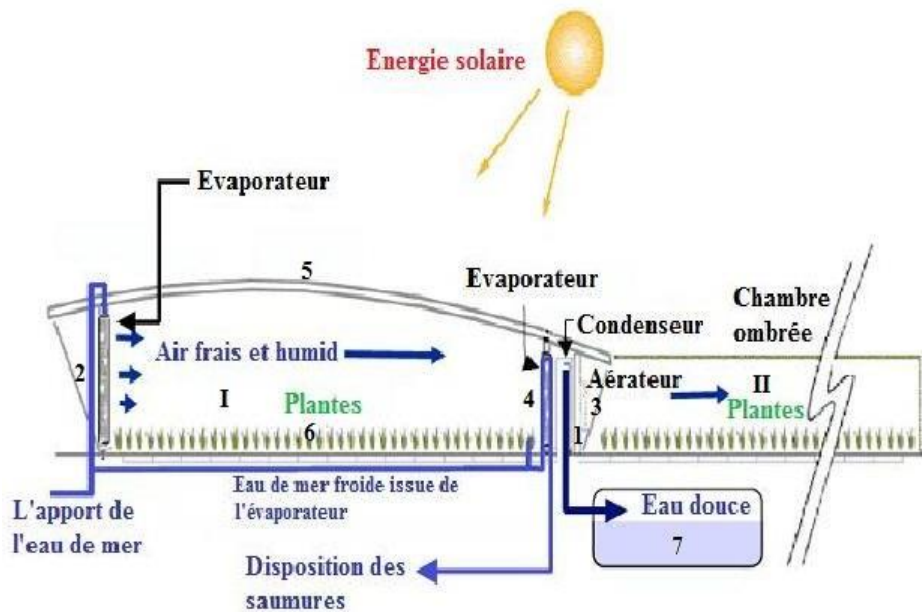


Figure III .15 : Schéma descriptif de la serre solaire à Mascate [136].

i. Dessalement par énergie électrique produite par les énergies renouvelables : -éolienne :

Le recours à l'énergie éolienne couplée aux unités de dessalement peut constituer une alternative potentielle pour pallier au déficit en ressources conventionnelles dans les régions isolées possédant un gisement éolien important. Cependant, l'utilisation de l'énergie éolienne pour le dessalement conventionnel souffre de deux contraintes : son coût élevé et la discontinuité de la production (aléas climatiques). Pour pallier à la première contrainte, l'utilisation de procédés de dessalement à très hautes performances énergétiques est impérative. Le procédé d'Osmose Inverse (RO), utilisant uniquement de l'énergie électrique ou mécanique, est le plus performant du point de vue énergétique (soit 2 kWh/m³ dans le cas de l'eau de mer). Pour pallier à la seconde contrainte, il y a une nécessité d'un stockage d'énergie ou de couplage avec d'autres sources d'énergie (hydraulique, thermique) ou raccordement

Différentes approches pour les systèmes de dessalement par énergie éolienne sont possibles. D'abord, l'éolienne et l'unité de dessalement sont connectées à un réseau électrique (on-grid). Dans ce cas, les dimensions optimales du système de conversion éolien et de l'unité de dessalement ainsi que les coûts prohibés de carburant sont d'intérêt. La seconde possibilité est basée sur un couplage plus ou moins direct des éoliennes et l'unité de dessalement (stand-alone). Dans ce cas, le système de dessalement est affecté par les variations de puissance et les interruptions provoquées par la source d'énergie (vent). Ces variations de puissance ont, néanmoins, un effet négatif sur les performances et la durée de vie des composants de certains équipements de l'unité de dessalement. Par conséquent, des systèmes de stockage, comme les batteries, les générateurs diesel ou les volants d'inertie pourraient être intégrés dans le système [146].

L'éolienne permet d'installer le plus de puissance en un minimum de mètres carrés. Néanmoins, plusieurs modèles existent sur le marché et la puissance d'une éolienne dépend de plusieurs facteurs qui détermineront la puissance électrique produite et réinjectée sur le réseau.

Type d'éolienne	Diamètre de rotor (m)	Puissance
Micro éoliennes	0,5 à 2	100Kw à 1Kw
Petite éoliennes	2 à 12	1Kw à 36Kw
Moyenne éoliennes	12 à 35	36 Kw à 350KW
Grande éoliennes	35 à 125	350 Kw à 5 Mw

Tableau III.1 : Puissance produite pour chaque type d'éolienne

- énergie houlomotrice :

L'utilisation de l'énergie des vagues présente l'avantage d'avoir un potentiel plus régulier que la plupart des sources renouvelables qui peuvent être très fluctuantes, comme le vent ou l'énergie solaire. L'exploitation de cette énergie est particulièrement adaptée en milieu insulaire ou en région côtière [147]. Cheddie et al. ont modélisé une unité de dessalement d'eau saumâtre par osmose inverse alimentée par l'énergie des vagues. Dans ce procédé, un piston est entraîné par le mouvement des vagues et assure le pompage et la pressurisation de l'eau à dessaler comme il est présenté dans la Figure III .16

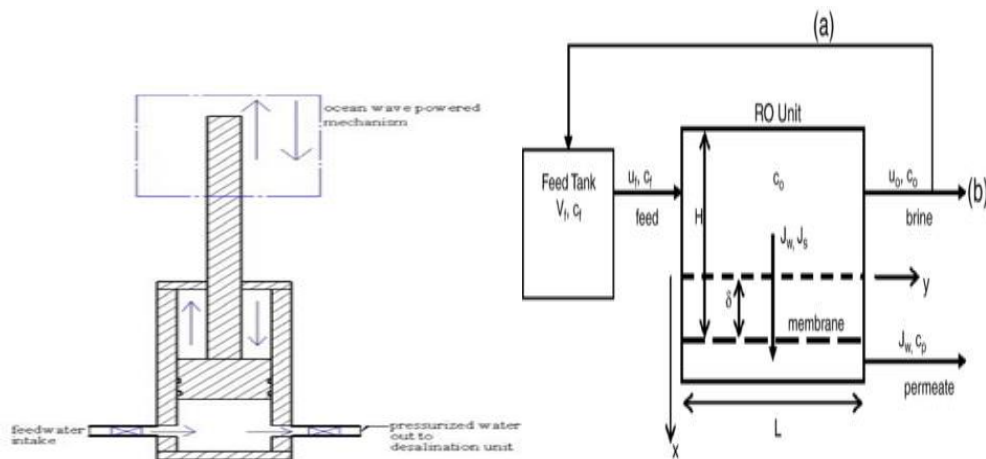


Figure III .16 : Principe du dessalement par l'énergie des vagues. [150].

Ce procédé, dont la pression d'alimentation est d'allure sinusoïdale et caractérisée par une pression « crête » de 9 bars, permet une production d'eau dessalée estimée à 1 m³/h. Sa consommation énergétique serait 12 % inférieure à un procédé similaire à pression constante induisant une productivité équivalente (3.7 bars) en diminuant les effets de couche limite diffusive au voisinage de la membrane [148].

- Géothermie :

L'énergie géothermique est largement distribuée à travers le monde .Cette énergie peut être utilisée pour le chauffage, la climatisation et pour la production d'électricité. Son utilisation potentielle s'adapte aux procédés de dessalement, qu'ils soient thermiques (MED, MSF, MD, VC) ou membranaires (RO, EDR). Les réservoirs géothermiques peuvent produire de la vapeur et de l'eau chaude.

Cette vapeur sèche surchauffée est le plus souvent facilement convertie en énergie utile pour produire de l'électricité à moindres coûts que celle provenant des ressources classiques.

Vu que les besoins en énergie pour le dessalement continuent d'être hautement influencés par les coûts du système, l'intégration des énergies renouvelables semble être un accompagnement naturel et stratégique pour piloter les usines de dessalement Le sud de l'Algérie, à titre d'exemple, se compose presque entièrement (90%) de l'immensité du désert du Sahara. Or, dans cette partie du pays, il y a une pénurie d'eau douce, mais il a aussi beaucoup d'énergie solaire d'énergie éolienne et d'importants réservoirs géothermiques c'est là un potentiel important qu'il faudrait exploiter. La fusion des diverses ressources renouvelables avec la purification et le dessalement de l'eau est donc très attractives pour cette région. Lors de l'utilisation de l'énergie géothermique pour l'alimentation des usines de dessalement, la nécessité du stockage thermique ne se fait pas sentir. En effet, la production d'énergie géothermique est globalement stable par rapport à d'autres ressources renouvelables Comme le solaire et l'énergie éolienne. La température du sol en dessous d'une certaine profondeur reste relativement constante tout au long de l'année. On peut classer les sources d'énergie géothermiques en trois catégories, celles de surface, celles peu profondes et celles profondes avec des températures mesurées, faibles (<100°C), moyennes (100 à150°C) et hautes températures (> 150°C), respectivement. Les sources géothermiques avec des puits de plus de 100 m peuvent, raisonnablement, être utilisées pour fournir la puissance nécessaire aux usines de dessalement On peut également envisager l'utilisation de l'énergie géothermique, directement, en tant que puissant flux dans les usines de dessalement thermiques. En outre, avec les progrès récents des technologies de distillation membranaires, l'utilisation directe de la saumure géothermique, à des températures supérieures à 60°C, est devenue une solution prometteuse l'électricité produite par des moyens géothermiques est utilisée dans 24 pays, dont cinq ont couvert jusqu'à 22% de leurs besoins à partir de cette source. En outre, l'application directe de l'énergie géothermique pour le chauffage, les thermes et la baignade a été observée dans 72 pays à travers le monde. La capacité mondiale installée d'électricité géothermique est de 10 GW à 70 GW avec la technologie actuelle, il est possible de l'augmenter à 140 GW avec de nouvelles technologies. [118].

III .4 Coûts du dessalement :

Les coûts dépendent en effet d'un ensemble de paramètres, comme la capacité de l'installation, la technologie employée, la situation géographique des équipements et leur accès, l'énergie consommée, le coût de la main d'œuvre et les réseaux de distribution. Un autre coût, non pris en compte actuellement dans les chiffres annoncés, concerne les déchets produits par le dessalement (saumures (brine) et autres produits chimiques) rejetés dans

l'environnement (rejets en mer pour le dessalement d'eau de mer, épandage sur terre pour celui des eaux saumâtres) [149].

a.Coûts de fonctionnement - coûts variables :

Il est très difficile de donner des coûts précis sans une étude effectuée au cas par cas en prenant en compte les conditions locales à la fois techniques et économiques.

b.Conditions techniques :

Parmi les conditions techniques à considérer on peut citer :

- Les caractéristiques des eaux à traiter. Tout d'abord la salinité, mais également les paramètres susceptibles d'induire soit un entartrage soit un colmatage : dureté, teneur en sulfate, carbone organique total. Ces derniers exigent l'insertion d'un prétraitement plus ou moins complexe ;
- Les caractéristiques des eaux produites, par exemple les eaux produites par osmose inverse sont généralement insipides et agressives et exigent la remise à l'équilibre donc un post-traitement ;
- Les caractéristiques d'utilisation de l'installation, temps de fonctionnement, capacité, main d'œuvre ou automatisation de l'installation ;
- Les sources d'énergie disponibles.

c.Influence de la salinité de l'eau à traiter sur les coûts

Les coûts du dessalement par des procédés de distillation sont dans une première approche indépendante de la salinité. Ce n'est pas vrai pour les procédés membranaires. Une augmentation de salinité se traduit dans le cas de l'électrodialyse par des investissements liés à une utilisation de surface membranaire plus importante et une consommation électrique supérieure puisqu'elle est proportionnelle à la quantité de sel à extraire. Dans le cas de l'osmose inverse, une hausse de salinité implique l'utilisation de membranes plus sélectives et par là même de perméabilité plus faible. Le flux d'eau produite étant proportionnel à cette dernière il diminue donc. D'autre part la pression osmotique augmentant avec la salinité, il convient d'appliquer des pressions plus élevées [125]. les procédés membranaires sont, à priori, plus intéressants pour les eaux saumâtres que les procédés de distillation.

d.Conditions économiques :

En dehors des conditions techniques, l'aspect économique peut être très différent d'un pays à l'autre ou d'une région à l'autre. Plusieurs coûts sont à prendre en compte : le coût de l'énergie, de la main d'œuvre, des produits chimiques mais aussi le cours des monnaies (inflation, prix du dollar,...).

e.Coût de l'énergie :

- Ce coût est peu élevé au Moyen-Orient, et très élevé pour des sites isolés. Dans certains cas il peut n'y avoir aucun lien entre le prix de revient et le prix payé par le client par suite de subventions publiques comme c'est le cas en Algérie ;
- Coût des produits chimiques suivant que ces produits sont fabriqués localement ou doivent subir des transports plus ou moins longs ;

- Fluctuation des monnaies : en particulier pour les modules d'osmose inverse qui proviennent presque exclusivement des USA, les variations du cours du Dollar ne permettent pas de donner des coûts avec une grande précision ;
- Inflation variable en fonction des pays et au cours du temps : ce sont là les aléas monétaires ;
- Conditions de financement (taux d'intérêt). Coût de la main d'œuvre [151].

Coûts d'investissements :

L'investissement spécifique, par m³/jour de capacité installée, peut être scindé en deux parties :

- frais du Propriétaire ;
- Coût de l'usine proprement dite.

Cette partie correspond au coût de l'usine de dessalement montée sur un site aménagé où l'électricité est disponible.

f.Frais de l'investisseur

Cette partie des investissements comprend :

- Les études préliminaires ainsi que les frais d'ingénieurs-conseils ;
- L'achat éventuel du terrain et l'aménagement du site (génie civil, route d'accès, clôtures, ...) ;
- la prise d'eau de mer (pompage, filtration grossière, chloration). Rappelons que dans le cas du FLASH pour produire 1 m³ d'eau douce, il faut pomper 10 m³ environ d'eau de mer ;
- les rejets de saumure (il faut en effet que le lieu de rejet soit situé à une distance suffisante de la prise d'eau de mer) ;
- les tuyauteries ainsi que le stockage de l'eau douce ;
- les magasins pour pièces détachés et outillages ainsi qu'un jeu de pièces de rechange ;
- le démarrage de l'usine ainsi que la formation du personnel.

Il est évident que cette partie des investissements dépend de chaque cas particulier. Elle peut être très faible dans le cas d'une usine qui s'implante sur un site industriel existant. Elle peut être élevée dans le cas d'une usine construite sur un site sans infrastructure.

Les ordres de grandeur des investissements des différents procédés de dessalement d'eau de mer et d'eaux saumâtres sont donnés dans le **tableau III .1**.

/	Procédé	Euro par m ³ /jour
Eau de mer	Multi-Flash	1 270 - 2 540
	Multiples Effets	1 140 - 2 280
	Compression de vapeur	1 140 - 2 280
	Osmose inverse	1 000 - 2 000
Eaux saumâtres	Osmose inverse	250 – 570
	Electrodialyse	370

Tableau III .2 : Ordre de grandeur des investissements pour les différents procédés de dessalement. [151].

g. Tendance et évolution des coûts :

Le coût de l'eau dessalée peut être estimé en faisant la somme des trois postes suivant :

- Charges financière ;
- Coût de l'énergie ;
- Coût de conduite, d'exploitation et d'entretien.

Plusieurs constatations peuvent être faites :

- Le coût du dessalement des eaux saumâtres est nettement inférieur à celui du dessalement de l'eau de mer : le rapport entre les deux est d'environ 40 %. Ceci est en partie lié à la moindre quantité d'énergie nécessaire pour purifier des eaux moins chargées ;
- Les coûts du dessalement diminuent de manière importante avec la taille de l'installation d'où l'intérêt de construire des installations de capacité importante si la demande le permet.

Dans les conditions techniques et économiques les plus favorables, les coûts de l'eau dessalée se situent aux environs de :

- 0.7 - 0.8 euro/m³ dans le cas de l'eau de mer ;
- 0.2 - 0.4 euro /m³ dans le cas des eaux saumâtres. [151].

Dans une unité de dessalement, les postes les plus chers sont, dans l'ordre

- l'énergie et la durée d'amortissement de l'installation ;
- le suivi et la maintenance (surtout pour la distillation) ;
- le prix des membranes de remplacement ;
- les pièces de rechange et enfin ;
- les produits chimiques indispensables au procédé.
- Les deux premiers postes représentent environ 70 % du coût de l'installation. La durée de l'amortissement n'est pas systématiquement annoncée au client, ce qui peut rendre le prix du mètre cube artificiellement attractif [151].

h. Le prix de revient de la production d'eau

Il est fonction de la technique utilisée : 9 €/m³ par distillation, 3€/m³ par électrodialyse et 1 €/m³ par osmose inverse (2 €/m³ pour l'usine de dessalement de Sein en Bretagne). Par osmose inverse les eaux sont si pures qu'elles doivent être reminéralisées, ce qui implique des coûts supplémentaires. Il faut rajouter enfin les coûts distribution. [150].

III .5 Le dessalement en Algérie

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie et tout particulièrement de l'industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement en vue d'un usage destiné exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est quasi-inexistant. Une seule expérience a été tentée dans une situation où il n'existait aucune autre solution. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'Ouled Djellaba dans la Wilaya de Biskra (Sud- Est Algérien). En 1964, 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 la distillation à multiple effet. En 1969, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j. Le procédé utilisé est le multi stage flash. [151]. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire au processus des complexes de production d'électricité (Cap Djinet à l'Est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda). Algérienne des Eaux (entreprise nationale) qui a amorcé la première expérience en matière de dessalement de l'eau de mer par la réalisation de 23 stations monobloc, d'une capacité totale de 57.500 m³ /j , dans le cadre d'un programme d'urgence, dans les wilayas de Tlemcen, Oran, Tipaza, Alger, Boumerdès, Skikda et TiziOuzou et 14 grandes stations d'une capacité totale de 1.940.000 m³ /j sont mises en service en 2003 et 2005. (Algerian of Water, 2012). Des autres stations sont mises en service dans les années 2009, 2010 et 2011. Il s'agit notamment des stations de Skikda (100 000 m³ /j), Beni Saf (200 000 m³ /j), Souk Tlata et Honaine à Tlemcen (200 000 m³ /j de chacune), Mostaganem (200 000 m³ /jour), Fouka et Oued Sebt à Tipaza (respectivement 120 000 m³ /j et 100 000 m³ /j) et Cap Djinet à Boumerdès (100 000 m³ /j). Des autres stations sont, également, en cours de réalisation à la wilaya de Chlef (200 000 m³ /j), El Tarf (50 000 m³ /j) et la plus importante station est celle de Magtaâ, à Mostaganem, avec une capacité de production de 500 000 m³ /j. (Mozas et Ghosn, 2013) La production en eau dessalée sera, selon les experts, passe de 500 000 m³ /jour en 2008 à 1 100 000 m³ /jour en 2009 et 2 260 000 m³ /jour en 2011 pour atteindre 4 m³ /j en 2020. [152].

a. Dessalement et environnement :

La principale caractéristique des eaux rejetées par les usines de dessalement est sa forte salinité. On la qualifie ainsi de saumure (eau de mer concentrée). Pour les usines à procédé thermique, le taux de conversion de l'eau de mer en eau douce est en moyenne de 10 %, c'est à dire qu'avec 10 L d'eau salée est produit 1 L d'eau pure. Ainsi, la concentration des effluents issus de ces usines est en moyenne 10 % plus concentrée que l'eau d'alimentation [152]. Dans ce procédé, les eaux de rejets sont souvent diluées par deux avec des eaux de refroidissement (eau de mer classique), ce qui donne donc un effluent seulement 5% plus concentré que l'eau de mer naturelle.

Pour les usines à procédé membranaire en revanche, l'eau de rejet est de 30 % à deux fois plus concentrée [154]. De nombreux produits chimiques utilisés tout au long du procédé de dessalement de l'eau se retrouvent dans les eaux rejetées par ces usines.

Dans le cas des installations de dessalement d'eau de mer, des problèmes peuvent se poser dans le cas où les rejets de saumures sont évacués aux larges et éventuellement dilués par les courants marins. En effet, outre une concentration en sels plus élevée, les rejets de saumure peuvent contenir des produits de corrosion (chrome, nickel, molybdène, cuivre...) ainsi que des réactifs utilisés (antitratres, antimousses, produits anticorrosion, coagulants, composés organochlorés...).

À ce jour, les effets à long terme de ces modifications de l'environnement marin sont mal connus, bien que certaines études d'impact des rejets d'usines de dessalement soient en cours. De plus, des concentrations biologiques de polluants minéraux ou organiques par des espèces

aquatiques (phytoplanctons, zooplanctons, poissons) peuvent éventuellement se produire et entraîner un phénomène de bio-accumulation. [154].

Le fonctionnement optimal d'installations de dessalement d'eau de mer exige une prise d'eau brute de bonne qualité sans risque de contamination. Une zone de protection est donc nécessaire. Quel que soit le procédé, un prétraitement des eaux brutes et un post traitement des eaux produites sont réalisés avec le plus souvent l'emploi de produits chimiques. D'autres substances sont également utilisées pour lutter contre l'entartrage, la corrosion ou le colmatage des membranes. On retrouvera donc ses composés dans les effluents rejetés. De plus l'implantation d'une usine nécessite en premier lieu l'achat d'un site dont la taille est à la mesure de l'installation et un apport d'énergie soit électrique soit thermique. Les experts s'accordent pour considérer que les points les plus importants à traiter lors de l'implantation d'une usine de dessalement sont les suivants :

- La localisation de l'usine ;
- L'évacuation des solutions salines concentrées (brine) ;
- Le choix de l'énergie utilisée.

Comme toute nouvelle construction industrielle le choix du site doit être réalisé en prenant en compte les souhaits de la population, des écologistes, des politiques. Le particularisme de ce type d'industrie qui produit de l'eau potable à partir d'eau brute impose que l'on puisse, pendant et après la construction, protéger le site pour maintenir constante la qualité de l'eau. La problématique des rejets salins doit donc être bien étudiée pour éviter de perturber l'environnement à plus ou moins long terme.

D'autres dispositions peuvent être prises pour éviter ces nuisances : l'injection du concentré dans une couche aquifère saline, l'évaporation ou le transport par la canalisation en un point approprié [155]. La gestion séparée des effluents contenant les produits chimiques de nettoyage des membranes, et des composés pour lutter contre l'entartrage et la corrosion paraît nécessaire. La solution qui consiste à rejeter ces solutions dans les eaux souterraines n'est cependant pas recommandée. D'un point de vue environnemental, le meilleur procédé sera celui qui pollue le moins. Ce sera donc celui qui produit le plus faible débit d'eau salée, celui qui consomme le moins d'énergie ou qui utilise des énergies renouvelables, enfin celui qui modifie le moins l'écosystème.

b. Conclusion sur le dessalement :

Le dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre est un moyen utilisé couramment dans de nombreux pays pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Deux types de techniques peuvent être utilisés à cet effet : la distillation et les procédés membranaires, chacune de ces techniques ayant plusieurs déclinaisons. Les procédés les plus utilisés dans le monde sont la distillation multi-Flash (MSF) et l'osmose inverse (RO). L'utilisation d'une technique de dessalement plutôt qu'une autre résulte d'une étude complète du contexte, et le choix s'effectue au cas par cas. Néanmoins, les procédés membranaires semblent a priori plus intéressants d'un point de vue économique pour les eaux saumâtres que les procédés de distillation. Les améliorations techniques ont permis de diminuer la consommation

énergétique de ces procédés et donc leur coût. Le coût dépendant en premier lieu de la concentration en sels, il est estimé inférieur de 40 % pour des eaux saumâtres [139].

Quoiqu'il en soit le prix du mètre cube d'eau dessalée baisse et le dessalement paraît, pour les années à venir, une solution possible pour remédier à la pénurie d'eau.

Chapitre IV

*Système intégré de dessalement
membranaire à énergie solaire: étude de
cas au Sud Algérien.*

IV.1 Introduction:

Le stress hydrique est un défi majeur auquel sont confrontées les sociétés du monde entier, en particulier dans les régions arides [168]. L'augmentation de la population et les besoins en matière de production alimentaire qui en découlent ont accru la consommation d'eau par les êtres humains au cours des décennies précédentes [168]. La dégradation de la qualité de l'eau due au flux de déchets industriels a également aggravé le stress hydrique. Les changements climatiques sont également liés aux variations de la disponibilité de l'eau et au risque accru de sécheresse [169]. Les changements croissants dans les précipitations saisonnières et l'évaporation, affecteront la disponibilité de l'eau à l'échelle mondiale. Ces problèmes ont entraîné une diminution croissante dans les réserves mondiales en eau et ont donc une incidence sur l'accès universel à la santé et à l'assainissement.

Les énergies renouvelables et le dessalement sont des technologies qui peuvent être combinées de diverses manières pour aider à atténuer les problèmes de stress hydrique dans le monde [170,171]. Pour être efficaces, les programmes combinés reposent sur la fusion des efforts d'experts de deux disciplines distinctes, les énergies renouvelables et le dessalement [172].

Ces derniers peuvent être favorisés par l'énergie produite sur place à partir de sources d'énergie renouvelables accessibles à proximité. Cette puissance peut être fabriquée sous de nombreuses formes : comme chaleur, électricité, ou énergie mécanique. En théorie, toute technologie d'énergie renouvelable peut être intégrée à une usine de dessalement de l'eau, en particulier dans le cadre d'approches de dessalement utilisant l'électricité. Il est nécessaire de pouvoir mieux évaluer comment intégrer différentes technologies pour contribuer à résoudre les problèmes mondiaux de stress hydrique en tenant compte de la durabilité économique et environnementale [173].

L'objectif de cette étude est d'évaluer les technologies émergentes de dessalement qui peuvent être intégrées aux systèmes d'énergie renouvelable (ER). L'accent a été mis sur la distillation membranaire et l'humidification-déshumidification-dessalement des serres. Une étude de cas a été présentée sur la faisabilité de coupler le dessalement en serre d'eau saumâtre avec la distillation par membrane pour le sud de l'Algérie (Adrar).

IV.2 Applications des systèmes intégrés :

Les systèmes existants d'énergie renouvelable (ER) peuvent être fusionnés avec le dessalement, cependant, les contraintes technologiques et économiques entravent leurs applications à grande échelle [172,173]. Une étude récente a donné un aperçu de l'état des technologies de dessalement pilotées par les ER, en mettant l'accent sur les systèmes intégrés et les applications possibles, ainsi que sur leurs limites économiques et technologiques [172].

Bundschuh et al. [172] ont fait valoir la nécessité d'optimiser les processus énergétiques, notamment en générant des solutions plus efficaces sur le plan énergétique et économique, cela peut se faire en développant les moyens de stockage de l'énergie. De même, il est nécessaire d'apporter des changements aux pratiques conventionnelles de dessalement afin de les rendre plus appropriées aux approches intégrées. Il existe des technologies de dessalement

et des ER (figure 1) qui sont particulièrement prometteuses quant à leur faisabilité économique et technologique. Certains technologies sont plus appropriés pour les usines de dessalement à grande échelle, tandis que d'autres sont plus applicables pour les usines à petite échelle.

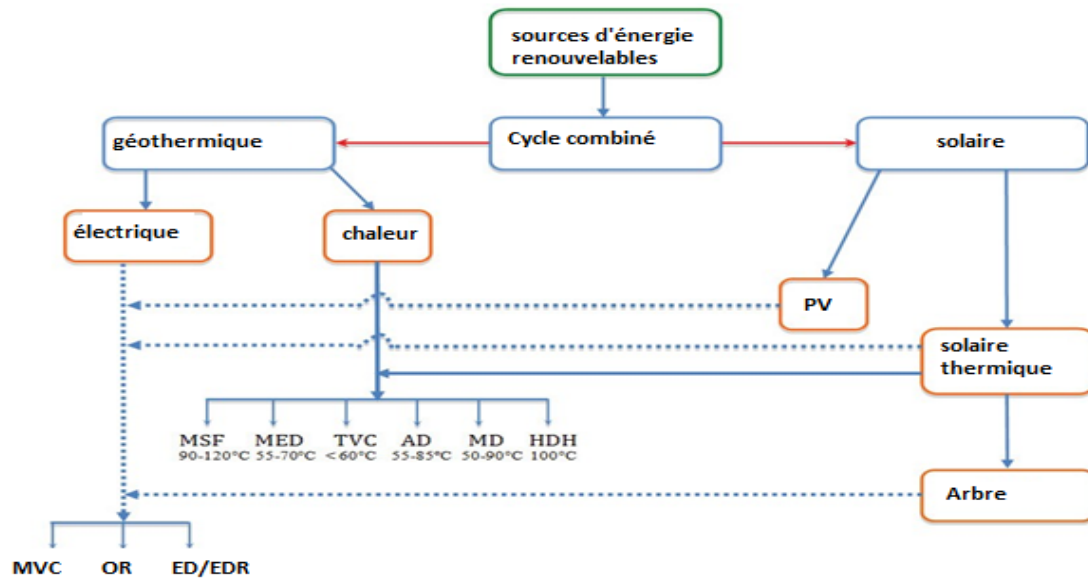


Figure IV 1 : Combinaisons possibles des systèmes intégrés, SER avec des procédés de dessalement classiques et innovants. [173].

AD : dessalement par adsorption,

ED : électrodialyse ;

EDR : inversion de l'électrodialyse ;

HDH : humidification-déshumidification ;

MD : distillation membranaire ;

MED : distillation multi-effets ; MSF : flash multi-étapes ;

MVC : compression mécanique de vapeur ;

PV : photovoltaïque ;

OR : osmose inverse ;

TVC : compression thermique de vapeur ;

IV.3 Technologies émergentes de dessalement :

Ahmed et al. ont évalué les progrès réalisés dans les technologies prometteuses de dessalement [174]. Les auteurs se sont concentrés sur des systèmes proches de la commercialisation tels que les procédés électrochimiques, l'osmose directe et la distillation membranaire. L'utilisation de chaleur de faible quantité dans la distillation par membrane, ainsi que les systèmes hybrides alimentés par des énergies renouvelables, devraient accélérer la croissance. Ahmed et al. [174] sont déterminés que les progrès réalisés dans le domaine des

batteries de dessalement pour éliminer les ions de sel à l'aide de matériaux de batterie à haute capacité pourraient entraîner la résurgence des pratiques électrochimiques de dessalement de l'eau de mer. Les efforts à venir devraient être axés sur l'évaluation économique de l'extension et de l'optimisation de la conception du système.

La figure 2 donne un aperçu des types d'énergies provenant de plusieurs sources d'énergie renouvelables. À ce jour, le mélange le plus populaire est l'intégration du photovoltaïque avec osmose inverse (PVRO). La réduction de la durée de vie de la membrane a été reconnue comme un défi technologique pour l'intégration de la technologie d'Osmose Inverse (RO) avec des systèmes d'énergie renouvelable, en particulier l'énergie solaire et éolienne [174,175]. La diminution de la durée de vie de la membrane peut être due à un fonctionnement intermittent. Ali et al. [175] ont souligné que les technologies solaires qui concentrent la chaleur solaire, comme la concentration de l'énergie solaire (CSP), sont bien adaptées à l'osmose directe (OD) et à la distillation par membrane (MD).

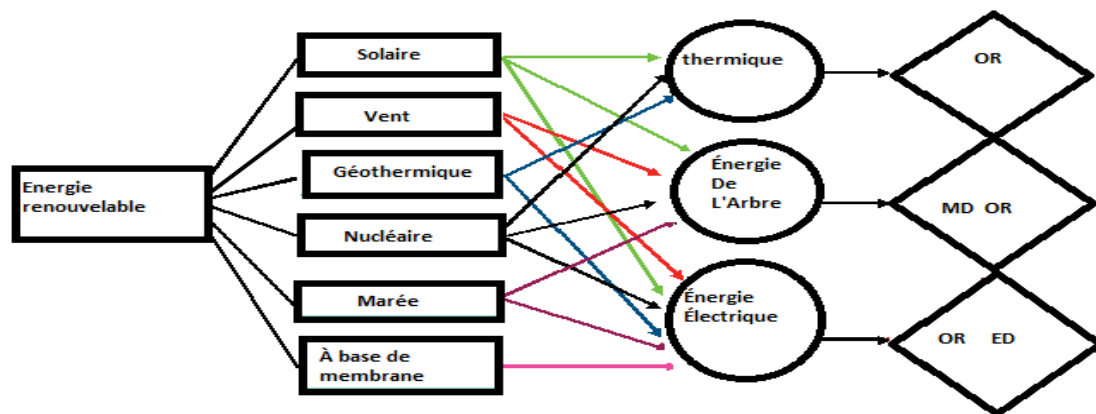


Figure IV 02 : Vue d'ensemble des technologies liées aux énergies renouvelables avec OR, MD et ED [174,175].

IV.4 Membrane de distillation:

Les membranes industrielles actuelles d'osmose inverse (RO) ne peuvent pas résister physiquement aux pressions élevées nécessaires pour dessaler des solutions hypersalines avec une salinité totale dissoute (TDS) > 50 000 ppm de solutions (>80 bar). La MD devient une option attrayante car l'énergie consommée ne dépend pas de la salinité de l'eau d'alimentation [174].

L'un des principaux avantages de la technologie MD par rapport aux procédés thermiques classiques tels que le flash multi-étapes et la distillation multi-effet est qu'elle nécessite peu de chauffage. En effet, la distillation membranaire (MD) est un procédé thermique. Il utilise une membrane microporeuse hydrophobe comme contacteur pour obtenir une séparation par équilibre liquide-vapeur. Le pouvoir moteur du procédé MD est la variation partielle de pression de vapeur maintenue sur les deux côtés d'une membrane microporeuse hydrophobe (figure 4). Après avoir été chauffée, la solution d'alimentation est mise en contact avec la membrane qui ne laisse passer que la vapeur à travers les pores secs pour qu'elle se condense

côté perméat (réfrigérant). Une différence de 7°C à 10°C entre les deux cours d'eau est théoriquement adéquate pour produire de l'eau douce [174].

Ce procédé fonctionne à des températures relativement basses (entre 50°C et 90°C), ce qui est très approprié pour traiter des saumures thermiques déjà préchauffées. La séparation se produit lorsque la vapeur d'eau pure, plus volatile, traverse les pores de la membrane par un processus convectif ou diffusif. Ainsi, un gradient thermique est utilisé à travers une membrane dans MD séparant la charge et le perméat. L'alimentation chauffée provoque un gradient de température à travers la membrane résultant en une différence de pression de vapeur. Cela force l'eau côté alimentation à se vaporiser et à passer à travers les pores de la membrane et à se condenser côté perméat plus froid [173].

Quatre modes de fonctionnement MD existent actuellement en fonction du transfert de chaleur côté perméat. Il s'agit de la distillation par membrane sous vide (VMD), de la distillation par membrane à entrefer (AGMD), de la distillation par membrane à contact direct (DCMD) et de la distillation par membrane à gaz de balayage (SGMD). Même si le DCMD a le rendement énergétique le plus faible, il est surtout utilisé en laboratoire en raison de sa disposition simple.

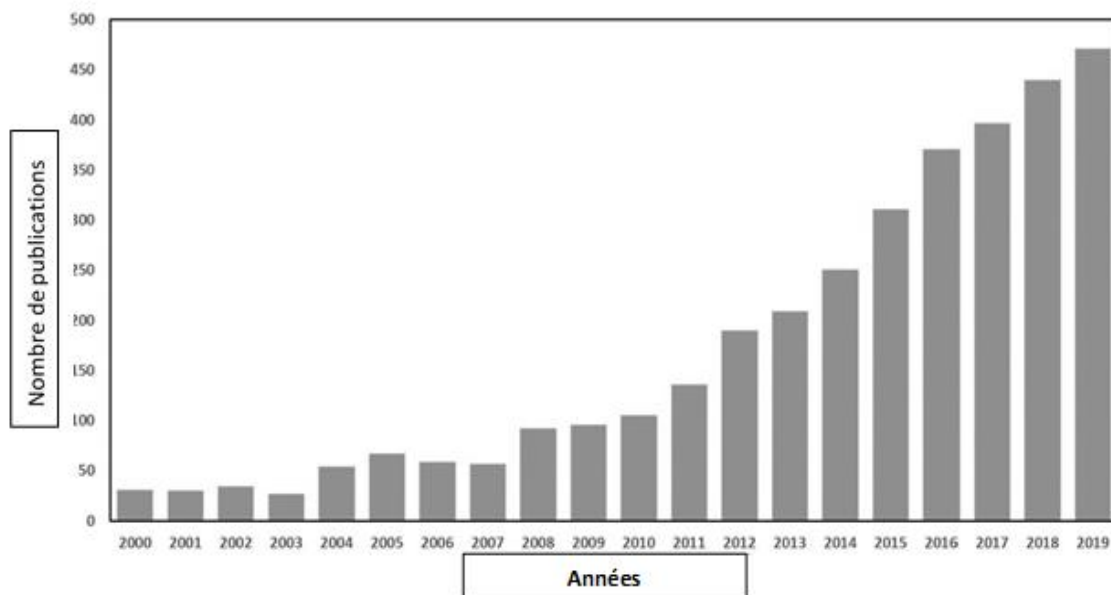
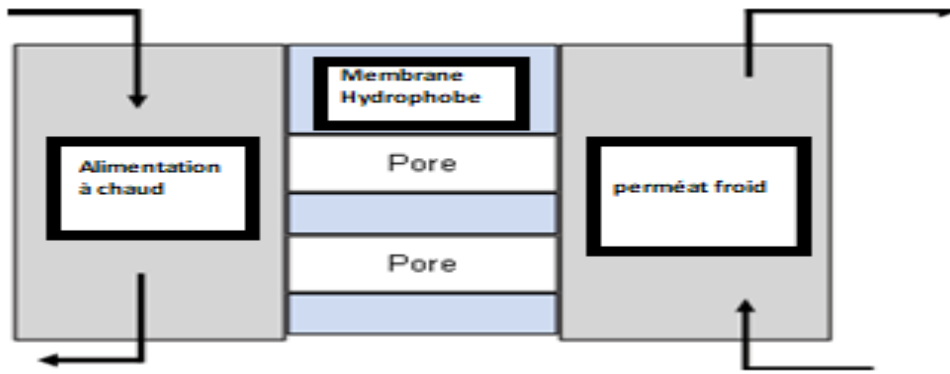


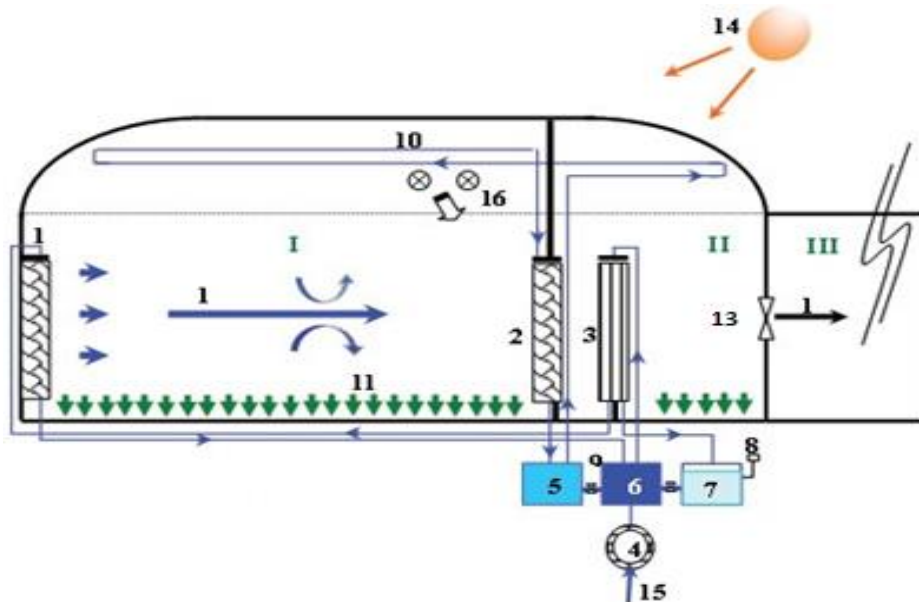
Figure IV.3 : Nombre de publications sur la distillation membranaire de 2000 à 2020 (Scopus) [174].



FigureIV 04 : Mécanisme de dessalement par distillation directe sur membrane (DCMD) (adapté de Chamani et al. [176]).

IV.5 Humidification-déshumidification dans une serre de Dessalement:

La serre est une structure flexible qui peut être modifiée pour le dessalement de l'eau en recréant un cycle hydrologique naturel dans un environnement contrôlé. Une serre d'eau de mer utilise la lumière du soleil, l'eau de mer/saumâtre et l'atmosphère pour produire de l'eau douce et de l'air frais, générant ainsi de meilleurs environnements pour la culture (figure 5). Les deux humidificateurs sont constitués par des treillis en nid d'abeilles en carton produisant de l'air humidifié. Cela aide à maintenir la serre au frais tout en permettant aux cultures de pousser dans des conditions de lumière élevée. L'air saturé sortant de l'évaporateur passe sur le condenseur. La condensation de l'eau douce à partir de l'air humide est acheminée vers le réservoir de stockage pour l'irrigation. La première usine pilote a été construite et testée par Paton et Davies sur l'île Canarienne de Tenerife en 1992 [179].



FigureIV 5. Schéma de procédé pour la serre d'eau de mer [177,178].

1. évaporateur 1
2. évaporateur 2
3. Condenseur
4. Puits
5. Réservoir d'eau de mer chaude
6. Réservoir d'eau de mer froide
7. Eau douce
8. Appareil de conductivité
9. Soupape d'appoint
10. Tuyaux de chauffage solaire
11. Cultures
12. Air refroidi et humidifié
13. Ventilateurs
14. Energie solaire
15. Prise d'eau de mer
16. Ventilateur
17. Air sec et chaud

I 1er compartiment

II 2ème compartiment

III Salle des ombres

IV.6 Couplage de l'humidification de l'eau saumâtre - déshumidification dessalement en serre avec distillation membranaire pour le Sud de l'Algérie : une étude de cas :

L'objectif principal de cette étude de cas était la proposition d'une unité de dessalement en serre d'eau saumâtre couplée à une batterie de distillation à membrane conçue pour la partie sud de l'Algérie (Figure 6). L'eau saumâtre à faible salinité et à haute température est pompée d'un aquifère et alimentée à la batterie de distillation à membrane. L'eau douce produite est stockée dans un grand réservoir pour être utilisée dans l'irrigation des cultures à l'intérieur de la serre. La saumure produite, qui est le goulot de la bouteille pour tous les processus de dessalement, alimente la serre dans le but de produire de l'eau douce en utilisant le processus

de déshumidification des cations humidifiés. La saumure produite par la serre est mélangée à de l'eau saumâtre qui alimente la batterie à membrane de distillation.

L'Algérie est un pays vaste dont la partie sud, qui représente 80 % du territoire (1 905 932 km²), est inhabitable à cause du désert du Sahara. Elle se caractérise par un manque chronique d'eau potable qui oblige les gens à migrer vers la partie nord. Cette région aride, étonnamment, possède un énorme réservoir géothermique appelé l'aquifère Albien qui est l'un des plus grands systèmes d'eau souterraine au monde. Il s'agit d'un réservoir géothermique gigantesque à faible salinité, 0,35 g/l et une température allant de 35°C à 70°C), qui s'étend sur plus d'un million de km² [181]. La partie méridionale est également connue pour son important potentiel de ressources énergétiques non conventionnelles, très favorable pour les applications photovoltaïques et solaires thermiques [182].

L'unité de dessalement par humidification en serre, utilise la lumière du soleil, l'eau salée et l'atmosphère pour recréer un cycle naturel de l'eau dans un environnement contrôlé et produire de l'eau douce et de l'air frais, créant des conditions de température idéales pour des cultures. L'eau souterraine chaude, après avoir été pompée de l'aquifère Albien, passe à travers l'unité de filtration sur sable conventionnelle qui permet l'élimination des particules solides et autres impuretés. L'eau filtrée est envoyée dans un grand réservoir d'eau chaude, où elle est alimentée en cascade à une batterie de modules de distillation à membrane. Le perméat produit est envoyé dans le réservoir d'eau douce pour être utilisé pour l'irrigation. Le concentré (saumure) est envoyé au premier évaporateur puis au deuxième évaporateur (figure 6). L'eau de saumure provenant du second évaporateur retourne dans le réservoir d'eau chaude où elle est mélangée avec l'eau souterraine chaude et filtrée.

Les deux évaporateurs ont la dimension de la paroi avant de la serre. Ils sont construits à partir de treillis en nid d'abeilles en carton. La serre doit être orientée vers la direction du vent dominant. La saumure concentrée ruisselle sur les modules de distillation à membrane. L'air passant dans la zone de plantation est refroidi et humidifié en raison du contact direct entre des gouttelettes d'eau et l'air sec dans le premier évaporateur. Des ventilateurs sont utilisés pour faire recirculer l'air à l'intérieur de la serre et pour l'aspirer à travers la salle d'ombre. Le second évaporateur humidifie l'air jusqu'à son point de saturation. L'air saturé passe sur le condenseur où il est condensé. L'eau douce qui en résulte est acheminée vers un réservoir pour l'irrigation. Le condenseur est le goulot de bouteille du dessalement en serre par humidification et déshumidification (SWGH).

Pour qu'un prototype commercialisé soit efficace, le condenseur doit être efficace, simple, peu coûteux et nécessite peu d'entretien. Mahmoudi et al. [182] ont proposé deux nouvelles conceptions pour le condenseur de serre : un système de refroidissement passif avec un condenseur (IC) immergé dans un bassin d'eau, et un condenseur passif externe (EPC) connecté à un bassin d'eau placé au-dessus du condenseur.

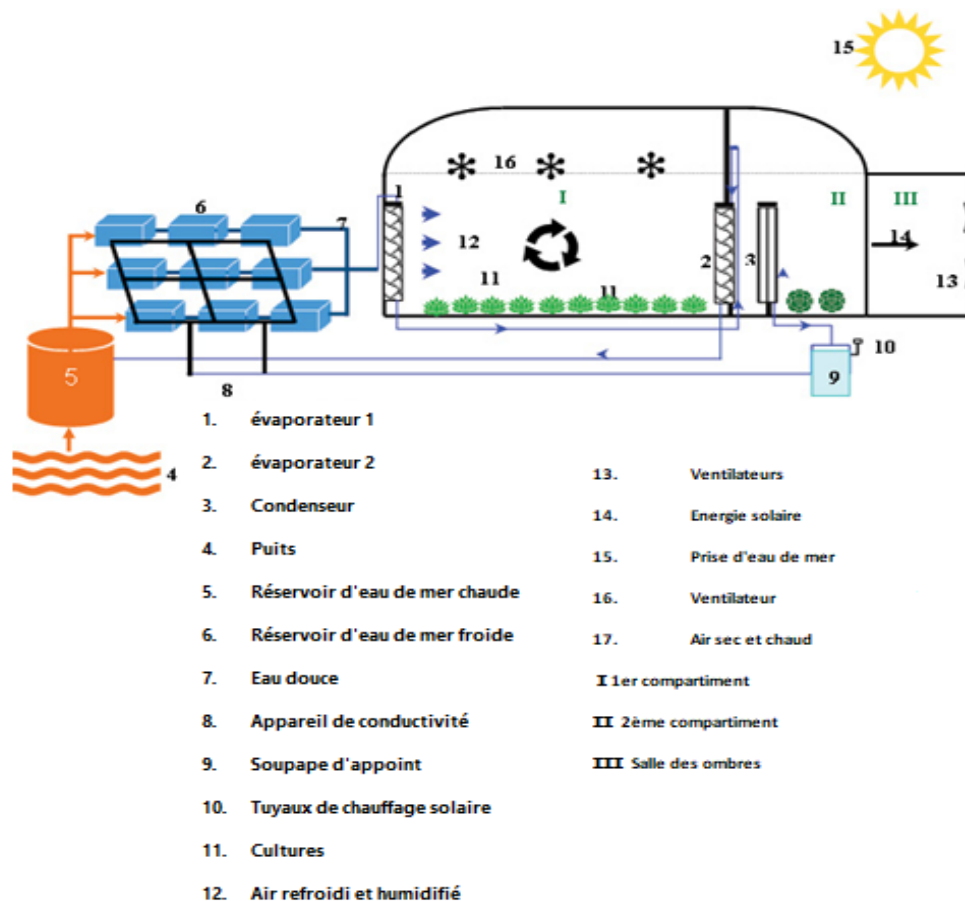


Figure IV 6 : Schéma de procédé pour batterie de distillation à membrane couplée à une serre d'eau saumâtre d'humidification-déshumidification

IV.7 Préoccupations environnementales, potentiel du marché et facteurs réglementaires:

Goosen et al. [183] ont soutenu que l'utilisation efficace de l'expertise renouvelable exige une prise de conscience de la croissance durable. Les auteurs soulignent la nécessité de trouver un équilibre entre les questions sociales, économiques et environnementales. Ces objectifs ne sont toutefois pas toujours compatibles et des compromis sont alors nécessaires. Grubert et al. [184] ont signalé que l'association entre ces domaines est un processus complexe. Par exemple, qu'est-ce qui vient en premier, la protection de l'environnement et la santé humaine ou la croissance économique. Goosen et al. [183] ont déterminé qu'une façon d'aider à atteindre un sentiment de stabilité est d'enseigner aux gens, y compris aux décideurs, aux étudiants et au personnel industriel, car cela représente le principal outil disponible pour catalyser les changements sociaux.

Pour promouvoir la commercialisation, divers types d'instruments de politique publique, tels que les allègements fiscaux et les prêts à faible taux d'intérêt, peuvent contribuer au développement des énergies renouvelables [183]. Cependant, des programmes à large assise, comme les certificats d'énergie échangeables, sont plus susceptibles de déboucher sur des innovations technologiques qui sont près de concurrencer les combustibles fossiles. Il est

inquiétant de constater que les sources d'énergie renouvelables n'ont représenté que 13 % de la consommation totale d'énergie au cours des 40 dernières années [17]. Sur la base de critères sélectionnés, une analyse de décision multicritères (MCDA) du système d'information géographique (SIG) a été appliquée à la sélection des sites de dessalement pour aider les décideurs politiques en fournissant un outil personnalisable pour identifier les emplacements favorables pour les installations de dessalement. Ces travaux ont montré comment un cadre intégré SIG-MCDA peut permettre aux décideurs d'inclure simultanément des critères environnementaux, économiques et d'autres critères spécifiés par la société lorsque, par exemple, ils produisent une décision concernant le meilleur endroit pour une usine de dessalement.

De même, le parrainage par le gouvernement de projets d'énergie renouvelable (ER) en Allemagne est fréquemment cité comme une norme à copier, étant basé sur des lois environnementales qui remontent à plus de 20 ans. Frondel et al. [20] ont soutenu que les structures de soutien du gouvernement avaient essentiellement échoué en raison d'énormes dépenses qui présentaient peu de possibilités à long terme de stimuler l'économie, de protéger l'environnement ou d'améliorer la sécurité énergétique. Les auteurs expliquent qu'il est fort probable que les emplois créés par la promotion des énergies renouvelables disparaîtront dès que l'aide gouvernementale prendra fin.

He et al. [170] ont calculé la pénurie mondiale d'eau en milieu urbain en 2016 et 2050 en fonction de quatre situations socio-économiques et climatiques et ont étudié les solutions possibles. Ils ont montré que les résidents urbains du monde confrontés à la pénurie d'eau devraient passer de 933 millions en 2016 à 1,7 à 2,4 milliards de personnes en 2050, et que l'Inde devrait être la plus durement touchée. He et al. (2021) [170] ont expliqué que la plupart des villes où l'eau est rare peuvent atténuer la pénurie d'eau grâce à des investissements dans les infrastructures. Enfin, Matar et al. [171] ont fait état de l'application de systèmes de gestion intégrée (SGI) dans les usines de dessalement. Ils ont montré que l'utilisation de l'IMS avait des effets encourageants sur le fonctionnement des usines de dessalement en termes de caractéristiques managériales, techniques, financières, environnementales et socio-économiques. Ils ont conclu que la priorité absolue et l'approche la plus appropriée sont la création d'une collaboration avec les institutions des Nations Unies pour obtenir une protection mondiale et accélérer l'accès à tout matériel nécessaire.

IV.8 Conclusion :

Cette étude a montré que les technologies émergentes de dessalement peuvent être intégrées à des systèmes d'énergie renouvelable telle que la mise en place d'une distillation sur membrane couplée à une unité de dessalement en serre d'humidification-déshumidification. Une étude de cas a montré qu'il pourrait être possible de combiner un dessalement en serre d'eau saumâtre avec une distillation en membrane pour le sud de l'Algérie en tirant parti d'un aquifère d'eau saumâtre souterrain très important. En conclusion, une approche globale doit être adoptée lors de l'examen de l'extension des systèmes hybrides, en particulier, les préoccupations environnementales, le potentiel commercial et les facteurs réglementaires des systèmes intégrés doivent, tous faire partie du processus décisionnel.

Chapitre V:
Présentation et exploitation du logiciel
REtScreen

V .1 Introduction :

La plateforme logicielle de gestion d'énergies propres « RETScreen » permet la planification, la mise en œuvre, le suivi et la préparation de rapports de projets à faibles émissions de carbone.

Cette plate-forme logicielle permet, intelligemment, aux professionnels et aux décideurs d'identifier et d'évaluer la viabilité de projets potentiels d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération. Elle permet également de mesurer et de vérifier facilement de façon continue les performances réelles de bâtiments, usines et centrales électriques à travers le monde.

« RETScreen » est géré sous la direction et avec le soutien financier continu du centre de recherche CanmetENERGIE de Ressources naturelles avec l'appui du gouvernement du Canada. Ce centre de recherche collabore avec de nombreux autres gouvernements et organisations multilatérales, avec l'appui technique d'un vaste réseau d'universitaires et d'experts de l'industrie dont la NASA

Le but de notre travail est d'améliorer les performances d'une serre agricole d'une superficie de 40800 m² située dans la région de Touat près de la ville d'Adrar. Cette amélioration devrait se faire par le biais d'un système intégré de dessalement membranaire alimenté électriquement par des énergies renouvelables.

Une telle serre de dessalement est un procédé qui permet de produire de l'eau douce par le principe de *l'humidification et déshumidification et le refroidissement progressif du milieu ambiant*. Le recours à ce genre de serres dans des régions arides, diminue les besoins en eau des plantes par la réduction de leur évapotranspiration, de l'ordre de 60 à 80% par rapport à l'extérieur de la serre, créant ainsi les conditions optimales pour le développement des cultures désirées.

À partir des eaux saumâtres de la nappe albienne donc et des ER disponibles autour de ce site, allons- nous pouvoir produire suffisamment d'eau potable par la technique de distillation membranaire pour mener à bien une culture sous cette serre et allons-nous pouvoir répondre aux besoins en eau douce d'une population très localisée et très peu nombreuse ? C'est ce que l'on va voir dans notre travail.

V .2 Condition de référence du site :

a.Lieu :

Dans cette section, le logiciel de gestion d'énergies propres *RETScreen* propose une feuille de calcul dénommée « *Lieu* », elle permet d'établir rapidement les conditions climatiques de référence à l'endroit où se situe l'installation, et ce pour des sites partout à travers le monde. Pour notre cas, nous avons choisi la ville d'Adrar dans l'extrême Sud de l'Algérie.

b.Données climatiques :

La base de données climatique *RETScreen* contient les données météorologiques nécessaires au modèle établie. Pendant l'exécution du logiciel, on peut obtenir des données climatiques en

provenance de stations météorologiques de surveillance au sol ou des données satellite ou analyses mondiales de la NASA.

c. Données de stations météorologiques au sol :

Les données de stations météorologiques au sol comprennent les valeurs moyennes sur la période de 1982 à 2006 en provenance de plus de 6 700 sites à travers le monde, elles proviennent à partir de plus de 50 sources différentes.

d. Données satellite/analyses mondiales de la NASA

Les données météorologiques de la NASA ont été obtenues à partir d'observations et de mesures par satellite et sont disponibles pour n'importe quel point à la surface du globe. Elles ont été mises dans un format compatible avec le logiciel RETScreen dans le cadre du projet POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resource) de la NASA. Cet ensemble de données a été développé par le centre de recherche de la NASA à Langley (États-Unis) en collaboration avec le centre de recherche « Canmet ÉNERGIE » dans l'Alberta au Canada. Les données ainsi obtenues permettent d'analyser des projets dans des régions pour lesquelles il n'existe pas de données de mesures au sol ni de cartes de ressources énergétiques. L'ensemble des données de la NASA est le résultat de 30 années d'observation à partir de juillet 1983, et est présenté avec une trame de 0,5 degré de la surface du globe. À la latitude moyenne (45°), cette trame correspond à des territoires d'environ 40 km par 55 km. Les valeurs d'irradiation solaire sont obtenues en utilisant des observations par satellite de l'atmosphère et de la surface de la Terre. Les autres paramètres météorologiques (par ex. température, humidité, etc.) sont calculés à partir des méthodes d'analyse météorologique du Goddard Earth Observing System Model, Version 5 (GEOS-5) de la NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO).

e. Latitude

On entre la latitude du lieu des installations et celle du lieu dont les données climatiques sont connues. La latitude est exprimée en degrés par rapport à l'équateur, positifs pour la latitude Nord et négatifs pour la latitude Sud. Les valeurs sont donc comprises entre +90 (pôle Nord) et -90 (pôle Sud). Cette information est disponible dans la Base de données climatiques RETScreen. La latitude du lieu des données climatiques peut être copiée directement dans la feuille de calcul à partir de la base de données climatique. De plus, la latitude du lieu des installations peut être collée dans la feuille de calcul en utilisant la carte disponible dans la base de données climatique.

f. Longitude :

On entre la longitude du lieu des installations et celle du lieu dont les données climatiques sont connues. La longitude du site envisagé sera exprimée en degrés, positifs pour les longitudes à l'est du méridien de Greenwich et négatifs pour les longitudes à l'ouest du méridien de Greenwich. Cette information est disponible dans la Base de données climatiques RETScreen. La longitude du lieu des données climatiques peut être copiée directement dans la feuille de calcul à partir de la base de données climatique. De plus, la longitude du lieu des installations peut être collée dans la feuille de calcul en utilisant la carte disponible dans la base de données climatique.

g. Amplitude des températures du sol :

La valeur de l'amplitude annuelle des températures (°C) du sol. Il s'agit de la moitié de l'écart entre les températures moyennes extrêmes du sol à la profondeur de mesure de la température. Le modèle calcule à partir de cette valeur les températures extrêmes des eaux souterraines ou du sol durant l'année. Selon les endroits, l'amplitude annuelle des températures du sol est de 5 à 20 °C lorsque la profondeur des mesures de la température du sol est 0 m. Généralement les amplitudes sont plus élevées en climats plus froids et plus faibles dans les régions chaudes. Par exemple, au Québec, l'amplitude annuelle de température est de 15,6 °C, alors qu'à Atlanta, elle n'est que de 10,6 °C. Les données d'amplitude des températures du sol ne sont pas disponibles pour les stations météorologiques au sol de la base de données climatiques de RETScreen. Par contre, la base de données satellite ou analysées de la NASA (accessible par l'intermédiaire de la base de données climatiques de RETScreen) peut fournir ces valeurs à la surface du sol (c.-à-d à une profondeur de 0) pour tout le globe. L'utilisateur peut aussi obtenir ces données d'autres sources telles que les stations ou services météorologiques.

h. Température de l'air :

Le modèle calcule la température moyenne de l'air pendant une année.

i. Humidité relative :

Le modèle calcule l'humidité relative moyenne de l'air pendant une année.

g. Précipitation

Le modèle calcule la quantité de précipitations totales pendant une année.

k. Rayonnement solaire quotidien – horizontal :

Cette valeur varie de 0 dans les régions nordiques pendant la nuit polaire, à 8,5 (kWh/m²)/j en été dans les régions de climat tempéré. Le modèle calcule le rayonnement solaire incident sur une surface horizontale pendant une année

l. Pression atmosphérique :

En général, la pression atmosphérique moyenne varie entre 60 et 103 kPa. La limite inférieure de la plage correspond à une élévation d'environ 4 000 m et la limite supérieure, au niveau de la mer. La pression atmosphérique standard est de 101,3 kPa [Elliot, 1986]. Il est à noter que la pression atmosphérique diminue à mesure que l'altitude (élévation) augmente.

Jusqu'à environ 5 000 m d'altitude, la pression atmosphérique moyenne notée P et exprimée en [kPa], à une altitude de z mètres au-dessus du niveau de la mer, peut être estimée en utilisant la relation suivante :

$$P = P_{\text{Niveau de la mer}} \times e^{(-Z/8200)} \quad \text{V. 1}$$

Où $P_{\text{Niveau de la mer}}$ représente la pression atmosphérique au niveau de la mer (c.-à-d. 101.3 kPa).

m. Vitesse du vent :

Le modèle calcule la vitesse moyenne du vent pendant une année.

n.Température du sol :

Les données de température du sol ne sont pas disponibles pour les stations météorologiques au sol de la base de données climatiques de RETScreen. Par contre, la base de données satellite ou analysées de la NASA (accessible par l'intermédiaire de la base de données climatiques de RETScreen) peut fournir ces valeurs à la surface du sol (c.-à-d. une profondeur de 0) pour tout le globe. Le modèle calcule la température moyenne du sol pendant une année. Selon l'endroit, la température moyenne annuelle du sol varie de températures négatives, en conditions de pergélisol (permafrost), jusqu'à 20 °C lorsque la profondeur des mesures de la température du sol est 0 m. Ainsi, dans une ville de climat froid comme Québec cette valeur est de 7,4 °C alors qu'à Atlanta, plus au Sud, elle vaut 16,8 °C.

o.Degrés-jours de chauffage :

Les degrés-jours mensuels de chauffage sous 18 °C sont la somme des degrés-jours de chaque jour du mois. Le nombre de degrés-jours pour une journée représente la différence de température, en °C, entre la température extérieure moyenne de la journée et une température spécifique qui est fixée à 18 °C, car cela correspond au seuil typique des besoins de chauffage. Le modèle calcule la valeur annuelle du nombre de degrés-jours de chauffage.

p.Degrés-jours de climatisation :

Les degrés-jours mensuels de climatisation au-dessus de 10 °C sont la somme des degrés-jours de chaque jour du mois. Le nombre de degrés-jours pour une journée représente la différence de température, en °C, entre la température extérieure moyenne de la journée et une température spécifique qui est fixée à 10 °C, car cela correspond au seuil typique des besoins de climatisation.

Le modèle calcule la valeur annuelle du nombre de degrés-jours de climatisation.

Mois	Température de l'air (c°)	Humidité relative (%)	Vitesse du vent (m/s)
Janvier	12,4	38,6	5,8
Février	16	31,7	6,5
Mars	19,4	26,5	6,7
Avril	23,6	23,2	6,6
Mai	28,1	20,1	6,8
Juin	33,6	17,5	6,4
Juillet	36	14,7	6,5
Aout	35,4	16,8	6,3
Septembre	31,6	22,3	6,3
Octobre	25	29,4	5,9
Novembre	18,2	36,3	5,7
Décembre	12,9	41,5	5,7

Tableau V.1 : température et humidité relative et vitesse de vents en fonction des mois d'une année

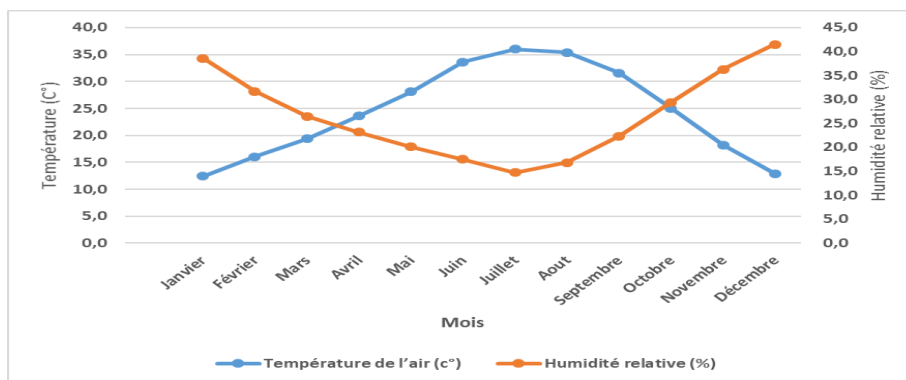


Figure V .01 : humidité relative et température de l'air en fonction des mois d'une année.

V .3 Interprétation des résultats :

La figure 01, montre les variations de l'humidité relative et la température de l'air en fonction des mois d'une année pour la région d'Adrar. On peut noter que le mois de janvier la température de l'air commence à augmenter et prend des valeurs importantes pendant les mois de juillet et août 36°C où elle atteint sa valeur maximale, puis elle chute au début du mois de septembre et continue à diminuer jusqu'à la fin décembre et début janvier où elle atteint des valeurs minimales 12,4°C.

Les variations de l'humidité relative au cours des mois d'octobre, novembre décembre, sont notées dans la figure N° 01, avec une montée progressive, le maximum est atteint 41,5% au mois de décembre, elle diminue par la suite peu à peu, elle est importante le mois de juillet, elle descend à 14,7%. (À l'inverse de la température) pour s'élever à nouveau en janvier, février et mars d'une valeur de 38,6% (janvier).

Nous observons également que la courbe de température et d'humidité s'inversent lorsque la température de l'air augmente, l'humidité de l'air diminue et lorsque la température de l'air diminue, l'humidité de l'air augmente. En général, on a de faibles valeurs de température pendant les mois de fortes humidités relatives et de fortes valeurs pendant les mois de faible humidité relative.

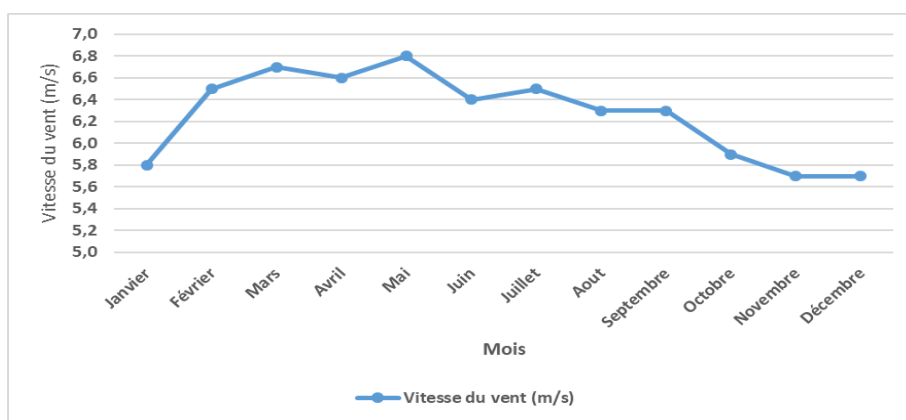


Figure V. 02 : vitesse du vent en fonction des mois d'une année.

La figure 02 illustre les variations des vitesses du vent moyennes mensuelles sur toute la période de mesures. On remarque que les vitesses maximales sont obtenues au mois de mai et atteignent une valeur moyenne de 6,8 m/s et les minimas sont de 5,7 m/s et sont enregistrées au mois de novembre et décembre. La vitesse moyenne de l'air mensuelle est de 6,3 m/s. À partir de ces valeurs, on peut confirmer que le choix d'une installation éolienne demeure une excellente option pour, la région d'Adrar qui est considéré comme une région la plus ventée d'Algérie.

Chapitre VI : Présentation et exploitation de la serre

VI.exploitation de la serre :

VI 1 Technologies existantes de refroidissement et de déshumidification :

Il existe quelques méthodes pour refroidir et déshumidifier une serre. Certaines sont utilisées pour refroidir en priorité et d'autres sont utilisées pour à la fois refroidir et déshumidifier. Les méthodes utilisées pour le refroidissement sont :

- 1) le rideau thermique ombrageant ;
- 2) le panneau de refroidissement humide ;
- 3) la micro brumisation.

Les méthodes utilisées pour le refroidissement et la déshumidification sont :

- 4) la méthode de ventilation par aération chauffage ;
- 5) la pompe à chaleur ;
- 6) l'échangeur de chaleur eau-air ;
- 7) le rideau d'eau.

a.Rideaux thermiques ombrageant :

Les rideaux thermiques peuvent être utilisés pour ombrager la serre et limiter l'augmentation de la température à l'intérieur de celle-ci. Les rideaux thermiques peuvent réduire la température jusqu'à 6°C par rapport à une serre qui n'utilise pas de rideaux thermiques [156]. Par contre, l'utilisation de cette technique réduit la luminosité qui est nécessaire à la photosynthèse. Le rideau thermique peut être utilisé pour ombrager la serre en temps chaud et ensoleillé ou pour réduire la consommation énergétique d'une serre durant la nuit. La Figure V. 1 représente un rideau thermique déployé à 50 % dans une serre, au cours d'une journée ensoleillée. La configuration optimale d'un rideau thermique dans une serre dépend du besoin du producteur.



Figure VI 1. Rideau thermique déployé à 50 % dans une serre.

b. Panneaux humides de refroidissement :

Cette méthode de refroidissement consiste à faire circuler de l'eau froide dans un panneau de cellulose à base de plastique ou à base de cellulose ayant reçu un traitement spécifique, combinée à des ventilateurs d'extraction d'air. Les panneaux de refroidissement sont installés dans une section de mur, idéalement, celle qui est exposée aux vents dominants.

La Figure V. 2 représente une installation de panneaux de refroidissement du côté extérieur du mur de la serre. Ces panneaux de refroidissement sont utiles lorsque le climat extérieur est chaud et sec. Ils permettent le refroidissement adiabatique de l'air de la serre, en utilisant l'air chaud à faible teneur en eau de l'extérieur. En évaporant l'eau du panneau de refroidissement humide, l'air chaud de l'extérieur devient froid et à haute teneur en eau, contribuant à abaisser la température ambiante de la serre.

La Figure V. 3 représente le fonctionnement des coussinets de refroidissement. Le panneau de refroidissement permet d'abaisser la température de la serre mais a démontré un manque d'uniformité dans la distribution du froid et de l'humidité dans la serre.



Figure VI. 2 : Installation des coussinets d'évaporation [157].

Cette information a aussi été constatée par [160]. Le panneau de refroidissement humide engendre un gradient de température dans la serre. La zone la plus froide est située près du panneau de refroidissement humide et la zone la plus chaude est située près des ventilateurs de sortie de l'air. Des essais effectués à l'Université de Floride ont fait face à une perte d'efficacité de ces systèmes en raison de problèmes de colmatage liés aux impuretés de l'eau [157]. Il est donc fortement recommandé d'utiliser cette technologie avec un système de filtration de l'eau. De plus, il est nécessaire d'avoir une serre équipée de système de ventilation mécanique pour utiliser cette technique de refroidissement. La ventilation mécanique assure que la pression est négative dans la serre, ce qui permet à l'air de l'extérieur de circuler adéquatement au travers du coussinet de refroidissement, ainsi que dans la serre.

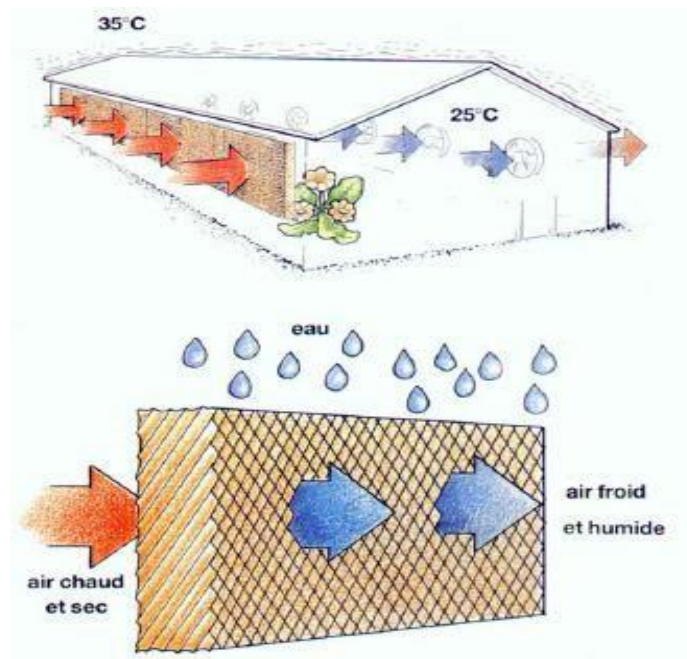


Figure VI. 3 : Schéma représentant le fonctionnement des panneaux humides de refroidissement.

c. Micro-brumisation :

La micro-brumisation utilise le concept de refroidissement adiabatique, qui consiste à vaporiser de fines gouttelettes d'eau dans l'air pour refroidir celui-ci. Cette technique transforme la chaleur sensible en chaleur latente, l'enthalpie de l'air reste constante. L'énergie qui est contenue dans l'air est transmise à la vapeur d'eau, ce qui augmente l'humidité relative de l'air et diminue la température de l'air [158]. Les gouttelettes sont généralement plus petites que dix micromètres, pour rester en suspension dans l'air. Cette technique est utile pour les serres qui ont besoin de refroidir et d'humidifier l'air pour leurs cultures.

d. La méthode de ventilation par aération-chauffage :

La méthode qui est traditionnellement utilisée pour abaisser le taux d'humidité de l'air des serres est l'aération chauffage. Cette méthode diffère selon les saisons. En hiver, cette technique consiste à remplacer une partie de l'air chaud et humide de la serre par de l'air froid et sec de l'extérieur de la serre. En été, cette méthode consiste à remplacer une grande proportion d'air chaud et humide par de l'air tempéré et moins humide de l'extérieur. Cette technique a le désavantage de limiter l'injection en CO₂ et de consommer de 12,6 à 18,4 % des coûts totaux de chauffage annuel d'une serre [163]. Considérant que les coûts d'énergie d'une culture sous serre peuvent représenter jusqu'à 30 % des coûts de production, tout gain énergétique représente un gain financier important pour le producteur.

e. La méthode de refroidissement et de déshumidification (R/D) par ventilation naturelle :

La Figure V. 4 représente la méthode de déshumidification par aération-chauffage avec ventilation naturelle. Cette méthode consiste à remplacer une partie de l'air chaud et humide de la serre par de l'air froid et sec de l'extérieur. La densité de l'air chaud, à haute

teneur en eau, est plus faible que la densité de l'air froid, à faible teneur en eau. Le mélange de l'air chaud et de l'air froid se fait alors naturellement. Aucune limite de longueur de serre ne s'applique à l'utilisation de la ventilation naturelle [164]. La ventilation naturelle peut se faire par le toit pour les serres jumelées ou par le côté pour les serres individuelles.

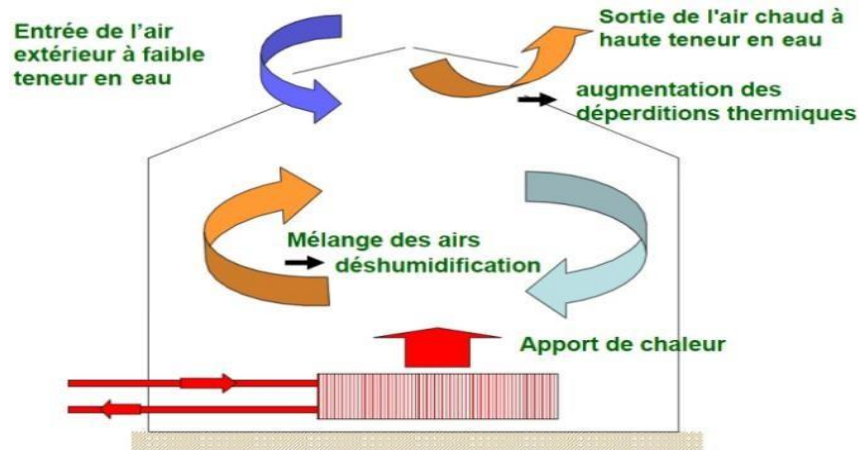


Figure VI. 4. Méthode de R/D par ventilation naturelle (aération-chauffage) au toit (Chassériau, 2008)

e. Pompes à chaleur :

Il est possible de procéder à une déshumidification et un refroidissement en utilisant des pompes à chaleur. Les pompes à chaleur sont composées d'un compresseur, d'un évaporateur, d'un condenseur et d'une valve d'expansion. Pour être efficace en refroidissement, la pompe à chaleur a avantage à être couplée à un procédé de chauffage afin de récupérer le surplus de chaleur produite. Le compresseur représente la consommation d'énergie principale pour le fonctionnement de la pompe à chaleur.

Des recherches menées au Japon utilisant un échangeur de chaleur composé d'un évaporateur, d'un condenseur, d'une ligne de retour en U et une ligne de passage de la vapeur, ont démontré qu'il est possible de déshumidifier une serre efficacement sans l'utilisation d'un compresseur. [165].

L'échangeur de chaleur utilise la structure d'un tuyau de retombée de liquide avec une partie en forme de U, et comporte une section de mécanisme de pompe à bulles formée par l'installation d'un chauffage à la base de section du tuyau. En d'autres termes, lorsque la puissance absorbée est donnée au (fluide frigorigène) dans le tuyau inversé en forme de U, ce dernier commence à bouillir. Les bulles générées par cette ébullition augmentent le niveau du fluide et commencent à pomper le fluide autour des bulles. Le liquide s'écoule ensuite dans l'évaporateur. Au cours de ce processus, une grande quantité de chaleur (environ 20 fois l'apport de chaleur) est retirée de l'évaporateur. L'évaporateur, et la chaleur est transférée au condenseur. [165]. La déshumidification basée sur la ventilation peut être efficacement réalisée en aspirant l'air humide dans la serre par l'évaporateur et en fournissant de l'air sec à l'air libre par le côté du condenseur.

f.Échangeur de chaleur eau-air :

Cette technique utilise de l'eau comme source de refroidissement qui passe par un échangeur de chaleur. L'air chaud et humide est aspiré de la serre à l'aide du ventilateur pour ensuite être poussé au travers de l'échangeur de chaleur froid. La température de surface de l'échangeur de chaleur est en dessous de la température du point de rosée de l'air, ce qui a pour effet que la vapeur d'eau qui est contenue dans l'air chaud et humide condense sur l'échangeur de chaleur. L'eau condensée est enlevée du système et l'air froid et sec est réintroduit dans la serre, à l'aide de tubes de polyéthylène. Ce système est doté d'un filtre, qui protège le serpentin des particules présentes dans l'air et filtre continuellement l'air de la serre. La Figure V. 5 illustre le concept du serpentin, utilisé, en combinaison avec un filtre et un ventilateur. Des recherches ont démontré que l'augmentation de la vitesse de l'air dans une serre fait réduire l'humidité autour de la feuille [166]. Puisque l'échangeur de chaleur eau-air utilise un ventilateur pour faire circuler l'air de la serre au travers de l'échangeur de chaleur et que le ventilateur est aussi utilisé pour distribuer l'air dans la serre, il se peut que celui-ci favorise à réduire l'humidité autour de la feuille.

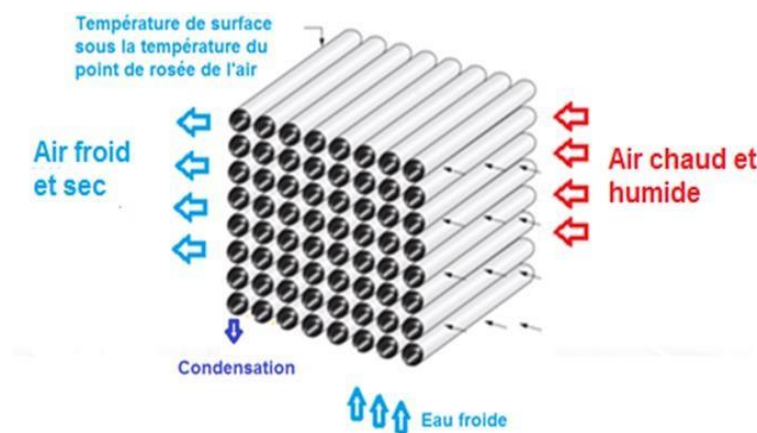


Figure VI. 5 : Échangeur de chaleur eau-air [167].

g.Échangeur de chaleur par rideau d'eau :

Cette technique utilise un rideau d'eau pour refroidir et déshumidifier l'air de la serre. De l'eau est pompée dans un tuyau qui est fixé sur la structure de la serre, au-dessus des plantes. Des buses distribuent l'eau sous forme de rideau d'eau dans la serre. La vapeur d'eau contenue dans l'air chaud condense sur le rideau d'eau qui se maintient à une température en dessous du point de rosée. L'eau du rideau d'eau et la vapeur d'eau condensée est récupérée dans une gouttière qui est fixée à 3,1 mètres sous les buses de distribution d'eau. Une pente dans la gouttière assure que l'eau retourne dans un réservoir d'eau. La Figure V. 6 ci-dessous représente le fonctionnement du rideau d'eau. Le système de rideau d'eau, a été développé par la compagnie Novarbo, en Finlande. L'air chaud et humide a une plus faible densité que l'air froid et sec. L'air chaud et humide est situé dans le haut de la serre et entre en contact avec le rideau d'eau qui est à une température en dessous du point de rosée de l'air. La vapeur d'eau contenue dans l'air chaud et humide condense sur le rideau d'eau. L'air est alors refroidi et déshumidifié.



Figure VI. 6. Représentation générale de la méthode de R/D par rideau d'eau [158].

VI 2 Éolienne :

Les éoliennes produisent de l'électricité à l'aide de l'énergie (renouvelable) du vent. La performance énergétique d'un parc d'éoliennes est influencée par un certain nombre de facteurs. Par exemple, ces facteurs peuvent inclure des éléments relatifs à la ressource tels que la vitesse du vent ou la densité de puissance du vent à hauteur de moyeu, le coefficient de cisaillement du vent, la température de l'air et la pression atmosphérique. Des éléments de conception et d'opération tels que la capacité électrique et les données de la production de l'éolienne, la hauteur de moyeu, la surface balayée, le nombre de turbines, les pertes par effet de sillage, les pertes au niveau des pales, les pertes diverses (p. ex. les pertes dues à la consommation parasite d'électricité, les pertes électriques le long des câbles de raccordement, les pertes dues à un faible taux d'absorption d'énergie éolienne) et la disponibilité de l'éolienne. Le modèle pour énergie éolienne du logiciel *RETScreen* permet d'évaluer la production et les économies d'énergie, les coûts, les réductions d'émissions de gaz à effet de serre, la viabilité financière ainsi que les risques pour des projets de centrales éoliennes hors réseau ou raccordées à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité. Pour l'étude de notre parc éolienne en calcul les besoins en électricité afin de nous permettre d'adapter la centrale électrique éolienne adéquate.

a.Coefficient de cisaillement du vent :

Le coefficient de cisaillement est un nombre sans dimension exprimant le taux de variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur par rapport au sol. Plus la rugosité du terrain avoisinant est faible et plus le coefficient est faible, tandis qu'un coefficient élevé représente généralement un terrain qui comporte des obstacles importants. Cette valeur sert à calculer la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne. Le coefficient de cisaillement du vent varie généralement de 0,10 à 0,40. La limite inférieure de la plage correspond à un relief peu accidenté, par exemple la mer, le sable et la neige, qui correspondent à un coefficient de 0,10 à 0,13. Un coefficient de cisaillement de 0,25 correspond à un relief accidenté avec des obstacles importants. La limite supérieure de la plage (0,40) correspond à un environnement urbain. Si les caractéristiques du site ne sont pas

encore déterminées, un coefficient de 0,14 constitue une première approximation acceptable. Gipe, 1995

b. Diamètre du rotor par turbine :

C'est le diamètre du cercle formé par la rotation des pales de l'éolienne. Les éoliennes disponibles sur le marché ont, en général, des diamètres de rotor allant de 7 à 120 m ou plus.

c. Surface balayée par turbine :

C'est l'aire perpendiculaire à la direction du vent que le rotor balayera durant une rotation complète. La puissance et l'énergie fournie d'une éolienne dépendent largement de la surface balayée de son rotor. La surface balayée des éoliennes s'étend généralement entre 35 et 11 310 m².

d. Facteur de forme :

De façon générale le facteur de forme s'étend entre 1 et 3. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un plus faible facteur de forme est indicateur d'une densité d'énergie plus élevée. Généralement, il en découlera une production d'énergie plus élevée, exception faite des sites ayant une vitesse moyenne du vent élevée, pour lesquels la production énergétique sera cependant limitée à cause de la fréquence d'occurrence des vitesses de vent supérieures à la vitesse d'arrêt.

e. Facteur d'utilisation :

Le facteur d'utilisation représente le ratio de la puissance moyenne annuelle produite par la centrale de production d'électricité par rapport à sa capacité électrique installée.

VI 3 Modules photovoltaïques :

Les modules photovoltaïques (PV) ou panneaux solaires produisent de l'électricité à l'aide du rayonnement solaire (énergie solaire renouvelable). La performance énergétique d'un système photovoltaïque est influencée par un certain nombre de facteurs. Par exemple, ces facteurs peuvent inclure des éléments de conception et relatifs à la ressource tels que la quantité d'énergie solaire que reçoivent les capteurs solaires, le type, la capacité électrique, la surface et le rendement des capteurs, la température nominale des cellules en opération, le coefficient de température, ainsi que le type de système de positionnement solaire (c.-à-d., fixe, uniaxial, biaxial ou azimutal), l'inclinaison et l'azimut (l'orientation) des collecteurs solaires.

Chapitre VII : Résultats & Discussions

VII . Résultats et discussions

VII .1 Modèle énergétique (production) :

Dans cette section du logiciel de gestion d'énergies propres *RETScreen*, la feuille de calcul *Modèle énergétique* est utilisée pour simuler la consommation d'énergie de divers types d'installations, y compris des systèmes et mesures individuels. Notre modèle est composé de :

Energie production	Chaleur (MWh)	Froid (MWh)	Electricité (MWh)
Enveloppe du bâtiment	11	56667	
Eclairage			172
Eau chaude	1,2		
Pompe de circulation			2
Ventilateur			313
Total	12,2	56667	486

Tableaux VII 1 : énergie produite par la pompe à chaleur.

Nous remarquons que notre besoin en énergie thermique est de 99% pour la climatisation, cela est dû aux conditions climatiques de la région d'Adrar qui est considéré comme zone 1 B, très chaude et sèche, cependant le chauffage est de 0,3%, aussi, ces conditions climatiques influent sur les longueurs des saisons de chauffage et de climatisation.

a. Pompe à chaleur

La performance énergétique d'un système de pompe à chaleur est influencée par un certain nombre de facteurs. Ces facteurs peuvent inclure des éléments de conception tels que la capacité de la pompe à chaleur, le rendement saisonnier en chauffage et/ou le coefficient de performance (COP) saisonnier en refroidissement, ainsi que la source de chaleur et/ou « froid » (c.-à-d., air ou sol). Dans le cas des pompes à chaleur géothermiques (c.-à-d., dont la source est le sol), la performance énergétique peut aussi être influencée par le type d'échangeur de chaleur dans le sol (c.-à-d., boucle fermée horizontale ou verticale ou eaux souterraines) et sa longueur, ainsi que les caractéristiques du site telles que la nature et la température du sol. La grosseur et le type de charge de chaleur/froid (c.-à-d., chauffage/climatisation et/ou procédé, une seule ou plusieurs zones, une seule ou plusieurs serres) peuvent également faire partie de ces facteurs.

- Rendement saisonnier :

Cette valeur est généralement plus faible que le « rendement en régime permanent » car elle est calculée sur une base saisonnière. Ainsi, le « rendement en régime permanent » est valable pour les conditions de pleine charge tandis que le « rendement saisonnier » tient compte des conditions de charge partielle durant L'année. Les valeurs typiques du rendement saisonnier pour les systèmes de production de chaleur sont comprises entre 55 % pour les chaudières ou générateurs de chaleur standards et 350 % pour une pompe à chaleur dont la source est le sol. Des valeurs typiques de rendement d'un système de production de chaleur

sont présentées dans le tableau Rendements saisonniers typiques de systèmes de production de chaleur. Les rendements des trois premiers systèmes de la liste sont basés sur le pouvoir calorifique supérieur du gaz naturel.

Système de production de chaleur	Rendement saisonnier typique %
Chaudière fournaise avec flamme directe	55- 65
Chaudière fournaise a rendement moyen avec allumage électronique	65 -75
Chaudière fournaise a moyen rendement à condensation	75 -85
Chauffage électrique	100
Pompe à chaleur source air	130 -200
Pompe à chaleur source sol	250 -350

Tableau VII .2 : rendement saisonnier de système de production de chaleur.

b. Utilisation finale :

Dans cette section, en indique les données caractérisant les serres du cas de référence et du cas proposé. En doit cliquer dans le ruban sur le type d'utilisation finale qu'il veut décrire (Enveloppe du bâtiment, Ventilation, Éclairage, etc.) pour accéder aux formulaires permettant de caractériser ces différentes installations. Dans ces formulaires, en entre les informations relatives aux installations du cas de référence et du cas proposé, incluant, si c'est le cas, les mesures d'efficacité énergétique ou de contrôle de l'utilisation d'énergie.

c. Enveloppe du bâtiment :

<i>Paramètres énergétiques</i>	U (w/m²)/°C	R (w/m²)/°C	Débit (L/s)
<i>Eléments de conceptions</i>			
Murs	6,42		
Fenêtre	6,42		
Toit	6,42		
Puits de lumières	6,42		
Dalle de fondation		1,61	
Plancher			
Infiltration d'air			51680

Tableaux VII .3 : facteurs de performance énergétique influencent sur la serre.

La performance énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment est influencée par un certain nombre de facteurs. Par exemple, ces facteurs peuvent inclure des éléments de conception tels que l'orientation du bâtiment par rapport aux points cardinaux et la quantité d'ensoleillement pénétrant dans les zones habitables et les espaces de travail. Les caractéristiques de transfert de chaleur (pertes et gains) et l'endroit où se situent les éléments de l'enveloppe du bâtiment, incluant les murs, les fenêtres, les portes, les planchers ainsi que le toit, peuvent également faire partie de ces facteurs. De plus, la performance énergétique d'un bâtiment peut aussi être influencée par les infiltrations naturelles d'air à travers l'enveloppe du bâtiment (p. ex. les fissures). Le modèle pour enveloppes du bâtiment du logiciel *RETScreen* permet d'évaluer la consommation et les économies d'énergie, les coûts, les réductions d'émissions de gaz à effet

de serre, la viabilité financière ainsi que les risques pour des projets de mesures d'efficacité sur l'enveloppe du bâtiment. Le modèle tient également compte de l'impact d'un ou plusieurs horaires d'utilisation pour le bâtiment du cas de référence et du cas proposé, et modélise l'effet croisé des autres mesures d'efficacité utilisées dans la serre (c.-à-d., l'impact de l'installation d'un système efficace d'éclairage sur le chauffage et la climatisation). De plus, la résistance thermique effective globale (valeur R) ou la conductance thermique effective globale (valeur U) d'une conception donnée d'enveloppe de bâtiment peut être calculée à l'aide de l'outil optionnel de Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment. Aussi, un outil détaillé de Caractéristiques des fenêtres est fourni pour déterminer les caractéristiques (c.-à-d., surface, valeur U et coefficient d'apport de rayonnement solaire) des fenêtres utilisées et leurs coûts.

- Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment :

L'outil Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment permet de calculer la résistance thermique effective globale (valeur R) ou la conductance thermique effective globale (valeur U) d'une conception donnée d'enveloppe de bâtiment, en fonction des matériaux choisis et de leur épaisseur, avec la possibilité de superposer des couches de matériaux différents. Le modèle permet aussi de prendre en considération différents types de ponts thermiques, Comme une dalle de béton qui se prolonge jusqu'à l'extérieur du bâtiment.

-La résistance thermique notée R est la capacité du matériau à résister aux variations de chaleur, c'est-à-dire au chaud comme au froid. Elle est exprimée en $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$. Plus R est grande et plus la qualité en tant qu'isolant du matériau sera bonne.

Dans notre cas : $R = 1,612 (w/m^2)/^\circ C$

-La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau à transférer la chaleur. C'est le rapport de l'énergie **thermique** (quantité de chaleur) transférée par unités de temps (donc homogène à une puissance, en Watt) et de surface au gradient de température. Dans notre cas $6,42 (w/m^2) /^\circ C$.

- Nord du bâtiment :

On entre l'angle, mesuré en degrés, entre le nord du bâtiment et le Nord géographique, zéro étant la valeur correspondant à un bâtiment faisant face au Nord (une valeur approximative est suffisante). Lorsque la façade nord est orientée à 10° vers l'est, on entre $+10^\circ$, lorsqu'elle est orientée à 10° vers l'ouest, on entre -10° . La valeur à indiquer pour l'azimut doit être celle par rapport au Nord géographique et non par rapport au Nord magnétique. Le Nord indiqué par une boussole doit donc être corrigé en fonction de la déclinaison magnétique pour calculer la bonne valeur d'azimut.

- Surface nette :

Le modèle calcule la surface nette des murs en soustrayant la surface des fenêtres et des portes de la surface brute des murs extérieurs.

- Coefficient d'apport de rayonnement solaire :

On entre la valeur globale du Coefficient d'Apport de Rayonnement Solaire (CARS) des fenêtres en incluant les effets du cadre, pour chacun des côtés du bâtiment. Le CARS est parfois mentionné dans la littérature canadienne comme SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) ou CGCS (Coefficient de Gain de Chaleur Solaire). C'est un nombre sans dimension. C'est le rapport entre l'énergie solaire qui pénètre effectivement dans le bâtiment (et s'y transformera en chaleur) et l'énergie solaire incidente dans le plan et sur la surface totale des fenêtres. La valeur effective doit tenir compte de l'« opacité » du cadre de fenêtre. Il peut être nécessaire de procéder à une analyse encore plus détaillée si on veut bien prendre en considération le blocage du rayonnement solaire par le cadre de la fenêtre. Il est à noter que le « coefficient d'ombrage », *Shading Coefficient (SC)*, est une donnée parfois publiée par les fournisseurs à la place du CARS. Le SC peut être converti en CARS en le multipliant par 0,87.

- Infiltrations naturelles d'air :

Le renouvellement de l'air qui s'infiltré par les fissures de l'enveloppe du bâtiment, par exemple par les cadres des portes ou des fenêtres, par la jonction entre le mur extérieur et le plancher, augmente les charges de chauffage et de climatisation car il faut chauffer ou refroidir l'air extérieur qui entre dans le bâtiment. Pour calculer l'utilisation annuelle d'énergie que ces infiltrations induisent, il faut commencer par évaluer le taux de renouvellement d'air naturel dans le bâtiment. L'évaluation de ces infiltrations n'est pas évidente et peut impliquer des mesures physiques comme un test *d'infiltrométrie* avec un ventilateur mettant le bâtiment en dépressurisation artificielle. Si on connaît le taux d'infiltrations naturelles, suite à un test d'infiltrométrie, en indiquera simplement la valeur connue en utilisant la méthode dans la cellule en-dessous. Si cette valeur est non connue, on peut l'estimer grâce aux différentes méthodes proposées dans la liste déroulante. La méthode des infiltrations « calculées » nous permet de décrire le niveau de fuites des murs, des portes et des fenêtres en choisissant 3 niveaux pour chacun de ces éléments : non étanche, moyen ou étanche. Le modèle calcule ensuite les infiltrations naturelles d'air, moyennes globales. Le niveau de fuite des murs et fenêtres et portes. C'est une appréciation subjective, typiquement fonction du type de bâtiment et de son année de construction.

d. Ventilation :

Caractéristique	quantité	Capacité (KW)	Facteur de Charge globale (%)	Nombre d'heures d'opération (h/ an)	Consommation électrique (MWh)
Ventilateur	68	0,75	70	8760	313

Tableau VII 4 : Caractéristique ventilateur.

La performance énergétique d'un système de ventilation est influencée par un certain nombre de facteurs. Par exemple, ils peuvent inclure des éléments de conception tels que le débit d'air et la quantité d'air neuf introduite dans la serre. La conception du système de ventilation dépend du type d'application considérée, ces applications peuvent inclure :

- le contrôle d'admission d'air frais ;
- le contrôle de la redistribution d'air ;
- la diffusion et la stratification de l'air ;
- le maintien d'un certain confort ;
- le maintien de la qualité de l'air dans les limites acceptables en contrôlant les odeurs ainsi que la teneur en gaz carbonique et en oxygène ;
- la purification de l'air contaminé par des procédés spécifiques ;
- le maintien d'une régulation spéciale de l'air dans la serre abritant de l'équipement et des procédés spéciaux.

Le Modèle pour ventilation du logiciel *RETScreen* permet d'évaluer la consommation et les économies d'énergie, les coûts, les réductions d'émissions de gaz à effet de serre, la viabilité financière ainsi que les risques pour des projets de mesures d'efficacité sur les systèmes de ventilation.

e. Eclairage :

Caractéristique	Rendement (lumen/watt)	Charge électrique par lampe (A)	Nombre de lampe	Nombre heures d'opération (h/ an)	Consommation électrique (MWh)
Eclairage	100	325	440	1200	172

Tableau VII 5 : caractéristique éclairage.

La performance énergétique d'un système d'éclairage est influencée par un certain nombre de facteurs. Parmi ces facteurs, on retrouve typiquement :

- le niveau d'éclairage requis pour le type d'endroit à éclairer ;
- le type d'éclairage choisi (p. ex. incandescent vs fluorescent compact) ;
- l'efficacité lumineuse et la charge électrique de chaque lampe ;
- le nombre total d'appareils d'éclairage, et ;

- le nombre d'heures où les lumières sont allumés.

Le Modèle pour éclairage du logiciel *RETSscreen* permet d'évaluer :

- la consommation et les économies d'énergie ;
- les coûts ;
- les réductions d'émissions de gaz à effet de serre ;
- la viabilité financière ainsi que les risques pour des projets de mesures d'efficacité sur les systèmes d'éclairage.

Le logiciel *RETSscreen* inclut une base de données d'efficacité lumineuse pour différents types d'éclairage tels que les lampes à incandescence, halogènes, fluorescentes, à vapeur de sodium à basse et haute pression, à vapeur de mercure, aux halogénures métalliques et à diodes électroluminescentes (DEL). Le modèle calcule également l'effet croisé des autres mesures d'efficacité utilisées dans l'établissement c'est-à-dire, l'impact de l'installation d'un système efficace d'éclairage sur le chauffage et la climatisation. L'utilisateur entre dans ces formulaires les renseignements relatifs aux installations des projets du cas de référence et du cas proposé, incluant les mesures d'économie d'énergie qui sont proposées pour réduire la consommation d'énergie. Ces renseignements permettent de calculer la consommation annuelle d'électricité nécessaire à l'éclairage.

-Buts de l'éclairage en serre :

- suppléer la lumière naturelle pour obtenir davantage de photosynthèse donc raccourcir les cycles de production et obtenir des plantes en meilleure santé ;
- contrôler la photopériode pour une initiation florale au moment voulu ;
- apporter des changements morphologiques.

e. Pompe :

Caractéristique	Rendement (%)	Puissance (KW)	Nombre d'heure d'opération	Consommation électrique (MWh)
Pompe	75	0,79	3000	2
Moteur	87	1,1	3000	2

Tableau VII 6 : Caractéristique pompe.

La performance énergétique d'un réseau de pompage est influencée par un certain nombre de facteurs. Parmi ces facteurs, on retrouve typiquement le rendement de la pompe, le débit (p.ex. variable vs constant), le type de régulation du débit (par étranglement vs à vitesse variable) et le nombre d'heures où la pompe fonctionne. Le rendement du moteur à plein régime, qui dépend du type de moteur c'est-à-dire à rendement moyen, à haut rendement et à très haut rendement, la capacité du moteur et le facteur de charge c'est-à-dire le ratio entre la charge moyenne du moteur pendant les heures d'opération et la puissance nominale du moteur peuvent, également, faire partie de ces facteurs.

VII .2 Le taux de déshumidification :

VII .2.1 La condensation :

L'air contient une certaine quantité d'eau sous forme gazeuse, cette quantité exprimée en pourcentage s'appelle l'humidité relative. À une certaine pression donnée plus on refroidit l'air plus le taux d'humidité relative augmente. La condensation est un phénomène physique qui représente le passage d'un corps de l'état gazeux à l'état liquide. Pour que la vapeur d'eau contenue dans l'air change d'état, il faudra atteindre le point de rosée c'est-à-dire atteindre la température à laquelle la vapeur d'eau présente dans l'air se transformera en eau. Les trois conditions qui régissent ce phénomène physique dépendent :

- du taux d'hygrométrie (humidité relative) ;
- de la pression atmosphérique ;
- de la température.

Dans une installation de climatisation, quand l'air traverse l'évaporateur, la température de surface de cet échangeur est inférieure à la température de rosée, alors l'humidité contenue dans l'air se transforme en eau et s'écoule le long de la batterie jusqu'au bac à condensat. La quantité d'eau produite par ce phénomène peut être très importante de quelques litres à plusieurs dizaines de litres en fonction de la taille et de la puissance de l'installation. [166].

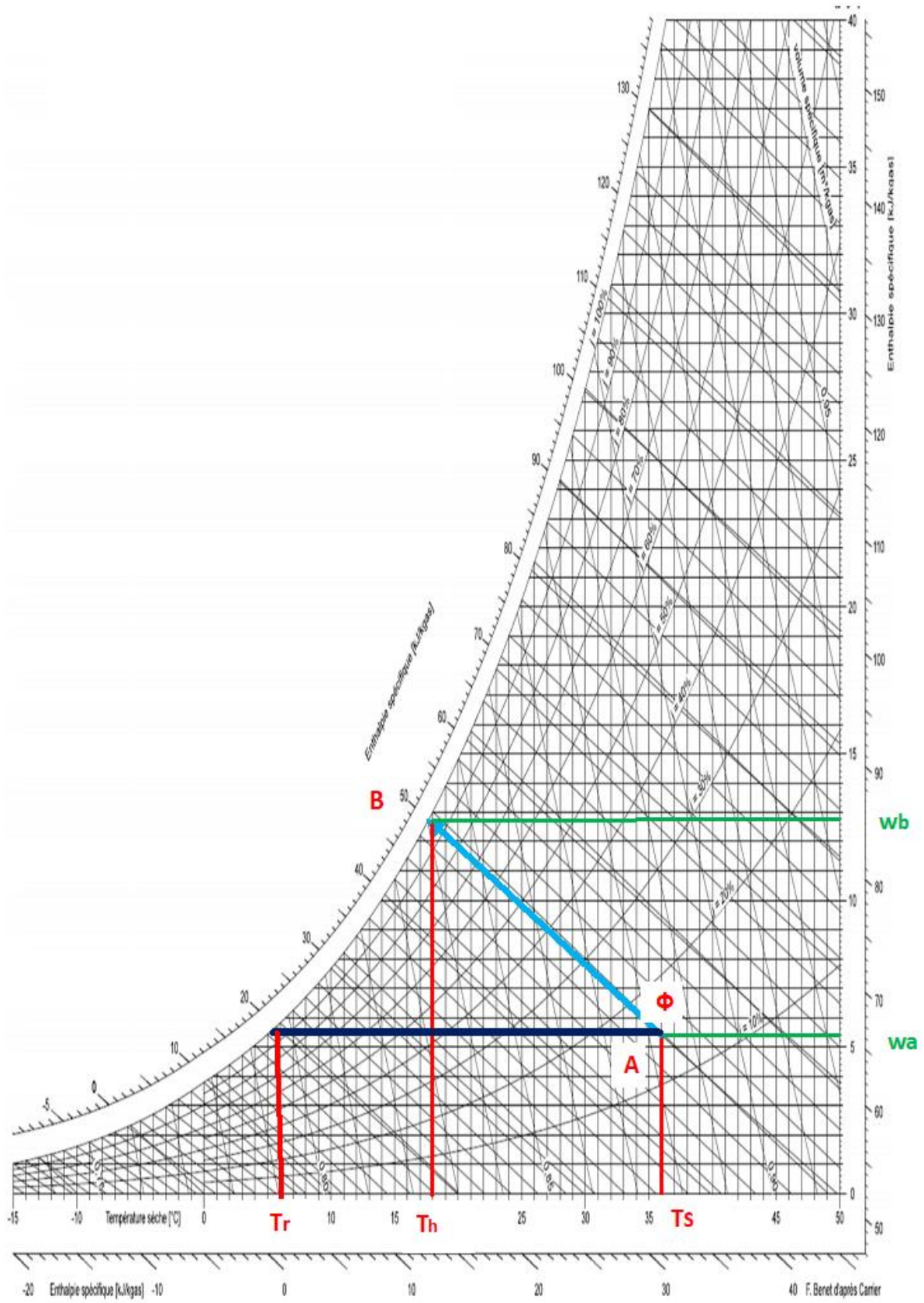


Figure VII.1 : Diagramme de l'air humide

a. Résultats :

Du diagramme de l'air humide, ci-dessus, en peut tirer.

- L'humidité relative (l'hygrométrie) ϕ est de 14,7.
- L'humidité absolue w_a est de 5,5 g/kg d'air sec.
- L'humidité absolue w_b est de 12,9 g/kg d'air sec.
- La température sèche T_s est de 36,0°C.
- La température humide T_h est de 18°C.
- La température de rosée T_r est de 6°C.
- L'enthalpie de l'air H_a est de 50 kJ/kg d'air sec.

-Formules de base

Dès lors, les débits d'eau d'humidification sont donnés par :

$$q_{ma} = q_{va} \times \rho = v \times s \times \rho \quad VI.1$$

$$q_{m\epsilon} = q_{ma} \times (x_2 - x_1) \quad VI.2$$

Où :

- q_{ma} est le débit massique de l'air (en kg d'air sec/s)
- q_{va} est le débit volumique de l'air (en m³/s)
- q_{me} est le débit massique de l'eau (en kg d'eau/s)
- ρ est la masse volumique de l'air (en première approximation : 1,2 kg/m³)
- x_1 est l'humidité absolue de l'air avant humidification (en gr d'eau/kg d'air sec)
- x_2 est l'humidité absolue de l'air après humidification (en gr d'eau/kg d'air sec)
- s section transversale de la conduite 0,25 m²
- vitesse air moyenne dans la conduite 1,4m/s

b. Application :

$$q_{ma} = 1,4 \times 1,2 \times 0,25 = 0,42 \text{ Kg/s}$$

Le débit de vapeur est donné par :

$$x_1 = 5,5 \text{ gr/kg (air ext. } 36^\circ\text{C } 14,7 \% \text{ HR).}$$

$$x_2 = 12,9 \text{ gr/kg (air int. } 18^\circ\text{C } 100 \% \text{ HR) (voir diagramme de l'air humide).}$$

$$q_{m\epsilon} = 0,42 \times (0,0129 - 0,0055) = 11,18 \text{ kg eau/h}$$

Donc la quantité d'eau condensée est 11 litres d'eau par heure.

VII.2.2 Horaires :

Température	Température de consigne – chauffage (occupé)	Température de consigne – climatisation (occupé)	Température de consigne – chauffage (non occupé)	Température de consigne – climatisation (non occupé)	Température de transition
Serre	23 c ⁰	24 c ⁰	23 c ⁰	24 c ⁰	16 c ⁰

Tableau VII 7 : températures à l'intérieur de la serre

a. Description :

Le logiciel nous donne une description détaillée des heures de marche et plusieurs autres paramètres utiles pour le calcul du modèle énergétique.

b. Température de consigne – occupé

En indique, pour chaque horaire considéré, quelle sera la température de consigne en chauffage et en climatisation nécessaire.

c. Température de transition chauffage/climatisation

Le logiciel calcule à quelle température extérieure (température de l'air) la serre est en équilibre énergétique, c'est à dire la température à partir de laquelle le système de CVC (chauffage, ventilation, climatisation) n'a plus de charge de chauffage mais peut commencer à avoir à combler des besoins de climatisation et vice-versa.

d. Longueur de la saison de chauffage :

Le modèle calcule la longueur de la saison de chauffage à partir des données météorologiques et climatiques, entrées dans la feuille de calcul *Lieu* et de la température de transition chauffage/climatisation. Pour notre cas 49,1 jours de chauffage c'est-à-dire la pompe à chaleur fonctionne en mode de chauffage.

e. Longueur de la saison de climatisation :

Le modèle calcule la longueur de la saison de climatisation à partir des données climatiques entrées dans la feuille de calcul *Lieu* et de la température de transition chauffage/climatisation. Pour notre cas 316 jours de refroidissement c'est-à-dire la pompe à chaleur fonctionne en mode de climatisation. Si une installation électrique d'une puissance d'1 MW fonctionnait de façon permanente à pleine puissance, sa production serait de 8760 MWh par an (24 heures pendant 365 jours). $1 \times 365 \times 24 = 8760$ MWh

VII .3 Modèle énergétique (consommation):

Dans cette section du logiciel de gestion d'énergies propres RETScreen, la feuille de calcul *Modèle énergétique* est utilisée pour simuler la consommation d'électricité de la serre.

Energie Consommation	Chaleur (MWh)	Froid (MWh)	Electricité (MWh)
Enveloppe du bâtiment	5,6	28333	
Eclairage			172
Eau chaude	0,6		
Pompe de circulation			2
Ventilateur			313
total	6,2	28333	486

Tableau VII.8 : consommation énergie.

Reetscreen nous permettra de calculer la consommation annuelle en électricité qui est de 28825 MWh .On peut constater que la consommation annuelle électrique du système de chauffage est de 6,3 MWh et la consommation annuelle électrique du système de refroidissement et climatisation est de 28333 MWh. Nous constatons que 1 MWh d'électricité consommé nous donne 2MWh d'énergie thermique pour chauffer notre serre et 2 MWh pour la refroidir.

Avec un rendement saisonnier de 200%, notre pompe à chaleur restituera en moyenne sur un hiver complet 2MWh de chaleur pour chaque kilowattheure d'électricité consommé et un Coefficient de Performance (COP) de 2 qui est le rapport entre l'énergie produite et la consommation d'électricité utilisée par la PAC. Notre pompe à chaleur récupérera en moyenne sur un été complet 2MWh de chaleur pour chaque kilowattheure d'électricité consommé. La seule dépense électrique de la pompe à chaleur est celle du compresseur qui sert à extraire les calories de l'air extérieur.

Pour 1 KWh consommé par le compresseur, la PAC réversible produit 2KWh de chaleur et 2KWh de froid. Elle utilise en fait l'énergie gratuite produite par le soleil pour chauffer la serre, ou la rafraichir.

Nous remarquons aussi que la consommation et l'énergie thermique de refroidissement est plus grande que celle de chauffage cela est dû essentiellement à la longueur de la saison de climatisation qui est plus longue que la saison de chauffage.

VII .4 Système de production d'électricité

VII.4.1 Éolienne :

Dans cette section, on indique les données caractérisant les équipements du système de production d'électricité du cas proposé. On doit cliquer dans le ruban sur le type d'équipement qu'on veut décrire (photovoltaïque, éolienne, etc.) pour accéder aux formulaires permettant de caractériser ces différentes installations. Dans ces formulaires, on entre les informations relatives aux équipements du système de production de chaleur et d'électricité du cas proposé. Par exemple dans notre cas en sélection une éolienne puis en entre ces caractéristiques

Vue les conditions climatiques et métrologiques ainsi, que l'emplacement géographique stratégique de la région de Adrar (c'est la région la plus ventée d'Algérie), une installation d'un parc éolienne s'impose afin de couvrir notre besoin en électricité.

Le principe d'une éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Une courbe de puissance donne la puissance attendue de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent [167]. Ainsi, la quantité de puissance qu'une éolienne est capable de fournir est directement dépendante de la vitesse du vent. La relation entre puissance en sortie d'une turbine et vitesse du vent au niveau du moyeu est décrite par une courbe de puissance théorique propre à l'éolienne.

Vitesse du vent (m/s)	puissance (kw)	énergie (MW/h)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	387
4	38,51	1 148
5	133,50	2 316
6	249,04	3 749
7	418,49	5 259
8	644,42	6 707
9	913,99	8 020
10	1 178,43	9 166
11	1 560,98	10 137
12	1 774,07	10 927
13	1 887,03	11 539
14	1 925,55	11 979
15	1 966,62	12 259
16	1 982,03	
17	1 992,30	
18	2 000,00	
19	2 000,00	
20	2 000,00	
21	2 000,00	
22	2 000,00	
23	2 000,00	
24	2 000,00	
25	2 000,00	
26	2 000,00	
27	2 000,00	
28	2 000,00	

Tableau VII 9 : Vitesse du vent, puissance, énergie.

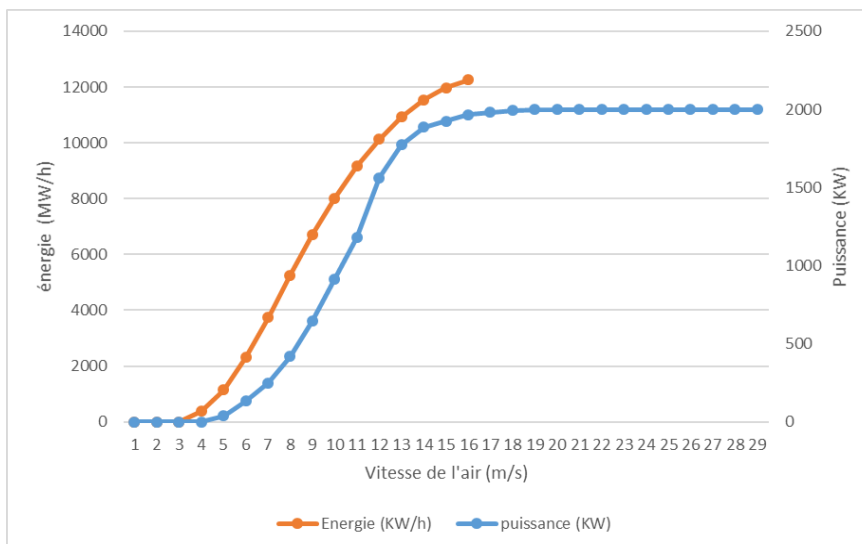


Figure VII.2 : Courbe de puissance et d'énergie.

La Figure VII 2, illustre une courbe de puissance énergie, dans le cas d'une éolienne de notre parc. On peut y constater trois vitesses de vent de référence :

- la vitesse de vent à partir de laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie (v_{cut-in}), 4,8m/s ;
- la vitesse de vent à partir de laquelle la puissance reste constante v_n 15m/s et ;
- celle à partir de laquelle l'éolienne arrête de produire 30 m/s.

Ces trois vitesses définissent quatre régions :

1- de 0 à v_{cut-in} (zone I) - 0 à 5m/s: c'est la région de faible vent, là où la production d'énergie est nulle ;

- de v_{cut-in} à v_n (zone II) - 4,8 à 15 m/s : elle augmente jusqu'à une certaine valeur de la vitesse dite nominale (entre 12 et 16 m/s), c'est la région du milieu de courbe, là où la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse, v^3 . Cependant il sera nécessaire de freiner l'éolienne parce que le bout de la pale tourne à une vitesse excessive.

La relation de proportionnalité entre puissance et vitesse du vent au cube qui confère sa forme à cette partie de la courbe est définie par la relation théorique suivante :

$$PV = 1/2 \rho AV^3$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, A est la surface décrite par les pales de l'éolienne et V est la vitesse du vent au niveau du moyeu.

- de v_n à $v_{cut-out}$ (zone III) 15 à 30 m/s : région de fort vent où la puissance a la même valeur quelle que soit la vitesse de vent. La puissance est stationnaire pour des raisons physiques et mécaniques ; on sera donc obligés, au-delà de cette vitesse, à freiner l'éolienne et ainsi limiter la puissance de l'éolienne.

Il n'est pas rentable de récupérer toute la puissance aérodynamique disponible car ces vents n'ont pas une fréquence d'occurrence suffisante eu-égard au surcoût de dimensionnement (puissance chaîne de conversion, résistance mécanique des structures...) qui serait requis pour assurer une telle conversion.

C'est pourquoi, dans cette zone, on écrête la puissance mécanique en réduisant la portance des pales jusqu'à la vitesse de vent maximale exploitable par l'éolienne $V_{cut-out}$ - au-dessus de $V_{cut-out}$ (zone IV) 30m/s :

Au-delà de cette vitesse du vent, la turbine est arrêtée et la portance des pales est annulée (mise en drapeau des pales) pour protéger la mécanique de l'éolienne région de vent fort où la production est nulle, de manière générale, on arrête les éoliennes parce qu'on ne peut plus les freiner.

Donc l'électricité annuelle produite par le parc éolienne est 36866 MWh (voir annexe figure VII .14), où elle couvre nos besoins en électricité 28825 MWh

VII .5 Émission de gaz à effet de serre

a.Analyse des émissions :

Au niveau mondial, les émissions du secteur agricole représentent 10 à 12 % des émissions totales. Cependant, ce secteur se caractérise par l'émission de gaz causant un réchauffement plus important que le dioxyde de carbone CO_2 , soit le méthane CH_4 et soit le protoxyde d'azote N_2O .

Dans cette section du logiciel de gestion d'énergies propres *RETSscreen*, la feuille de calcul Analyse des Émissions permet d'estimer le potentiel de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'installation analysée.

Une éolienne n'émet ni GES ni particules pour produire de l'électricité. Les éoliennes ne sont pas à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre, leur production ne peut créer des rejets de CO_2 . De plus, elles ne possèdent aucun impact direct sur l'environnement.

GES	Facteur d'émission de CO ₂ Kg/GJ	Facteur d'émission de CH ₄ Kg/GJ	Facteur d'émission de N ₂ O Kg/GJ	Consommation électrique MWh	Facteur d'émission GES Kg CO ₂ /KWh	émission de GES tCO ₂
Electricité	130,7	0,0025	0,0024	36866	0,473	17435,6
Eolien	0	0	0	36866	0	0

Tableau VII 10 : émission des effets de serre.

b. Interprétation :

Ce projet nous permettra une réduction de 100% des gaz à effet de serre qui sont de l'ordre de 17435 TCO₂, c'est-à-dire, équivalent aux émissions de 3193 automobiles (voir annexe figure VII .16). Une éolienne n'émet ni GES ni particules pour produire de l'électricité. Les éoliennes ne sont pas à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre, leur production ne peut créer des rejets de CO₂. De plus, elles ne possèdent aucun impact direct sur l'environnement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusions et recommandations :

Cette étude a montré que les technologies de dessalement peuvent être intégrées aux systèmes d'énergie renouvelable tels que la mise en place d'une distillation à membrane couplée à une unité de dessalement par serre d'humidification-déshumidification.

En particulier, les préoccupations environnementales, le potentiel du marché et les facteurs réglementaires des systèmes doivent tous faire partie du processus décisionnel.

Le logiciel « RETScreen plus » nous a permis d'évaluer les différents potentiels énergétiques du sud Algérien (Éolien) dans la région de Adrar. Riche de ces données, et en utilisant le même logiciel, une étude technico-environnementale très réaliste du projet a été faite ce qui nous a permis de constater la faisabilité d'utiliser une des énergies renouvelables disponibles pour piloter cette serre qui est dotée d'une pompe à chaleur, telle que la technique de humidification déshumidification.

Ce travail a mis en évidence l'intérêt énergétique, environnemental de l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité.

Les résultats ont montré qu'une quantité de condensat récupéré au niveau de la pompe à chaleur peut être utilisée dans l'irrigation. Le potentiel en énergie éolienne semble une solution favorable aux besoins électriques de la serre dans les régions arides et semi-arides.

Aussi, il est intéressant de noter que cette solution au manque d'eau dans le monde n'est pas de produire plus d'eau, mais d'employer moins d'eau dans l'irrigation. *

L'origine de notre réflexion était : « comment les énergies renouvelables pouvaient-elles être utilisées dans les régions arides et isolées pour mener une activité agricole rentable ? ». Nous avons vu que cela est possible moyennant un investissement modéré. En plus de l'activité agricole, vu les gigantesques gisements solaire et éolien, sur l'ensemble du territoire du pays, nous devons, aussi, œuvrer pour maîtriser ces potentiels afin de pouvoir piloter des installations de dessalement des eaux saumâtres de taille moyenne.

Vu la tendance à la hausse des prix du baril de pétrole, notre pays devrait accélérer cette nécessaire mutation. Les énergies renouvelables sont passées du statut de choix coûteux à celui de secteur concurrentiel. Cela s'explique par la baisse des coûts de production et la constante amélioration des performances des technologies utilisées. Une fois la solution choisie et, puisque il n'y a aucun réseau électrique dans ces régions, deux challenges sont à lever pour le couplage idéal des serres avec une énergie propre disponible à profusion :

- 1- Que les ER assurent une production constante, pour cela il faut étudier la possibilité de stocker l'énergie quand ces ER sont à bas régime ;
- 2- Tout cela en tenant compte des spécificités de la région du lieu d'installation de la serre.

De plus puisque le logiciel RETScreen est une parfaite réponse aux hésitations des investisseurs dues aux incertitudes créées par le manque d'information et le manque de

données et d'analyses transparentes sur les ER. Ce logiciel nous à donner des résultats prometteurs :

- 3- Vu que la vitesse de l'air est de l'ordre de 6,3m/s, on pourrait produire de l'électricité, à partir de cette énergie éolienne, afin d'alimenter la technique de refroidissement et de déshumidification de la serre ;
- 4- L'utilisation de la pompe à chaleur, permettra de récupérer une quantité d'eau, qui nous permettra aussi d'utiliser, la technique de distillation membranaire (MD), pour la production d'eau douce à partir de la nappe albiennaise ;
- 5- Les éoliennes ne sont pas à l'origine d'émissions CO₂ qui est un gaz à effet de serre, De plus, elles ne possèdent aucun impact néfaste direct sur l'environnement.

Il est à noter aussi que nous avons la possibilité d'utiliser la technique de distillation membranaire (MD), pour la production d'eau douce, et nous pouvons également envisager la possibilité de produire de l'électricité en utilisant une autre source d'énergie renouvelable, le solaire ou la géothermie,

Cette étude a montré donc que les technologies de dessalement par ER évoquées peuvent être couplées à une serre d'humidification-déshumidification.

Pour mener à bien une telle opération, les préoccupations environnementales, le potentiel du marché et les facteurs réglementaires des systèmes doivent tous faire partie du processus décisionnel. Nous avons mené une étude technico-environnementale très réaliste du projet qui nous a permis de constater la faisabilité d'utiliser une des énergies renouvelables disponibles pour piloter cette serre qui est dotée d'une pompe à chaleur.

Ce travail a mis en évidence l'intérêt énergétique, environnemental de l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité dans le grand Sud algérien. Les résultats ont montré qu'une quantité de condensat récupéré au niveau de la pompe à chaleur peut être utilisée dans l'irrigation. Le potentiel en énergie éolienne semble une solution favorable aux besoins électriques de la serre dans les régions arides et semi-arides.

Aussi, il est intéressant de noter que cette solution au manque d'eau dans le monde n'est pas de produire plus d'eau, mais d'employer moins d'eau dans l'irrigation.

Référence bibliographique :

- [1] B. Mouhouche, Maîtrise de la pratique de l'aridoculture comme palliatif au manque d'eau en Algérie, *Journal of Horticulture and Forestry*, 3(2011), 342-346.
- [2] WHO/UNICEF Joint Water Supply, and Sanitation Monitoring Programm Progress on sanitation and drinking water : 2015 update and MDG assessment. World Health Organization, 2015.
- [3] G. Romain, K. Kenmogne. L'eau une responsabilité partagée ,2ème Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 7.2 (2006).
- [4] Ch .Mahmoudi, Investigation of characteristics and performance of polyvinylchloride (PVC) ultrafiltration membranes impregnated with silica oriented carbon nanotubes, MS thesis. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, (2019) ,120-121.
- [5] M. DOUMANE, Phosphatases-mediated control of phosphatidylinositol 4, 5-biphosphate [PI (4, 5) P2] in plant cells, Thèse de doctorat, Université de Lyon(2020) 135-136.
- [6] L.GUIMARD, Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires, Thèse de doctorat, Université de Lyon, (2019) 11-12
- [7] M. MUKIIBI, R. FEATHERS, Membrane technology: A breakthrough in water treatment. *Water Conditioning & Purification*, 51.2 (2009).
- [8] K .Delphine, J. KUNTZ, Eau potable : enjeux géopolitiques. Le dessalement est-il une solution d'avenir, *Dessalement d'eau de mer*, (2012).
- [9] H .Cherif, J.Belhadj, Large-scale time evaluation for energy estimation of stand-alone hybrid photovoltaic–wind system feeding a reverse osmosis desalination unit, *Energy*, 36.10 (2011) : 6058-6067.
- [10] L. LEITNER, Etude d'un procédé de filtration membranaire à sélectivité variable ET contrôlée utilisant des membranes de polydiméthylsiloxane en milieu organique, application à la séparation de peptides, these de doctorat université de lorraine, (2013)455-456.
- [11] H .STRATHMANN, GIORNO, Lidietta, DRIOLI, Enrico, et al, Introduction to membrane science and technology, Weinheim, Germany : Wiley-VCH, 544(2011).
- [12] A. TOUFFET, Impact de la qualité de la ressource, des prétraitements et des lavages chimiques, Thèse de doctorat université de Poitiers, (2014)
- [13] P. Bastien, Analyse multi-échelle de la dégradation de membranes d'ultrafiltration en polyethersulfone/poly (N-vinyl pyrrolidone) en conditions d'usage, Thèse de doctorat Université de Toulouse, (2013).
- [14] Berland, Jean-Marc, J. Catherine, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique FNDAE ,14 (2002).

- [15] A. Maurel, Techniques séparatives à membranes. Osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration tangentielle : Considérations théoriques, Techniques de l'ingénieur Génie des procédés ,3.J2790 (1993).
- [16]. A.ROMDHANE, Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nanocristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat université de Grenoble, (2014).
- [17] Wang, Junfeng, et al,Recent development of ionic liquid membranes,Green Energy & Environment ,1.1 (2016) 43-61.
- [18] N .Dahou, traitement membranaire des rejets industriels, thèse de master université de Mostaganem, (2016)112-113.
- [19] M.De Falco, et al, Reformer and membrane modules (RMM) for methane conversion powered by a nuclear reactor, Nuclear Power Deploy. Oper. Sustain, (2011).
- [20] M. METAICHE, Technologie Membranaire génie civil ssa metaiche mehdi, (2014).
- [21]. Li, King Wo, Membranes polymères pour le traitement d'eau de production sur plateforme offshore, Thèse de doctorat Université Montpellier, (2018).
- [22] Liu, Xiao, and How Yong Ng, Fabrication of layered silica–polysulfone mixed matrix substrate membrane for enhancing performance of thin-film composite forward osmosis membrane, Journal of Membrane Science ,481 (2015): 148-163.
- [23] M.Crini, Nadia, C .Grégorio, and Laurent Roy, Eaux industrielles contaminées, Presses universitaires de Franche-Comté, (2017).
- [24] M. KHIATI, K. MIMOUN, Elaboration et caractérisation des supports membranaires à base d'argile, Thèse de doctorat université ibn khaldoun-tiaret, (2018).
- [25] I. BENAMOR, Elaboration des membranes céramiques de microfiltration, Thèse de doctorat. (2016).
- [26] A. Chenan, S. Ramya, R. P. George, and U. Kamachi Mudali, “Hollow mesoporous zirconia nanocontainers for storing and controlled releasing of corrosion inhibitors,” Ceramics International, 40. 7, (2017) 10457–104.
- [27] C. Sanchez, Chimie des matériaux hybrides, Collège de France, 111, (2012) 177-209.
- [28] A. Rahmouni, A. Harrane and M. Belbachir, Structure et propriétés physico-chimiques de la poly aniline synthétisée en présence d'un catalyseur d'argile de Maghnite en couches Montmorillonite algérienne, Université Tlemcen thèse de Master, (2013)
- [29] J. BHADRA, A .ABDULKAREEM, N. AL-THANI, Nanotechnology in decontamination In Composite Nanoadsorbents, Elsevier, (2019) 119-137.
- [30] G. Gnaneswar, Emerging technologies for sustainable desalination handbook, elsevier, (2018).

- [31] M-J. Han, S-T. Nam, Variation thermodynamique et rhéologique de la solution de polysulfone par PVP et son effet dans la préparation de la membrane d'inversion de phase, thèse de doctorat (2002) p 55-61.
- [32] Yin, Jun, D. Baolin, Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment, *Journal of membrane science*, 479 (2015) : 256-275.
- [33] T. Nguyen, Phuong, et al, Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications, *International Journal of Corrosion*, 2018 (2018).
- [34] Pourzare, Kolsoum, Yaghoub Mansourpanah, and Saeed Farhadi, Advanced nanocomposite membranes for fuel cell applications, a comprehensive review, *Biofuel Research Journal*, 3.4 (2016): 496-513.
- [35] M. Zenasni, Synthèse et caractérisation des nanocomposites biodégradables élaborés par trois procédés (intercalation en solution, polymérisation in situ et par voie fondue), Thèse de doctorat Université de Lorraine, (2015).
- [36] A. Kaboorani, et al, Mechanical properties of UV-cured cellulose nanocrystal (CNC) nanocomposite coating for wood furniture, *Progress in Organic Coatings* 104 (2017): 91-96.
- [37] Bu, Aiming, et al, Corrosion behavior of ZrO₂-TiO₂ nanocomposite thin films coating on stainless steel through sol-gel method, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 81 (2017): 633-638.
- [38] C. Sanchez, P. Belleville, M. Popall, and L. Nicole, Hybrid materials themed issue, *Chemical Society Reviews*, 40 (2011) 453–1152.
- [39] Pourzare, Kolsoum, Yaghoub Mansourpanah, and Saeed Farhadi, Advanced nanocomposite membranes for fuel cell applications : à comprehensive review, *Biofuel Research Journal* 3.4 (2016) : 496-513.
- [40]. Bogdanović, V. Vodnik, M. Mitrić et al, Nanomaterial with high antimicrobial efficacy—copper/polyaniline nanocomposite, *ACS Applied Materials & Interfaces*, (2015) 1955–1966.
- [41]. M. Shabani.N, Electrode position of polyaniline-montmorillonite nanocomposite coatings on 316L stainless steel for corrosion prevention, (2014).
- [42]. Pourzare, Kolsoum, Yaghoub Mansourpanah, and Saeed Farhadi, Advanced nanocomposite membranes for fuel cell applications : à comprehensive review, *Biofuel Research Journal* 3.4 (2016) : 496-513.
- [43] S. CHAOUI, Elaboration et caractérisation de nanocomposite à matrice polymère : Approche expérimentale, Thèse de doctorat, (2018).
- [44] S. Hosseini, et al, Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review, *Journal of Water Process Engineering* 9 (2016): 78-110.

- [45] Li, Dan, Yushan Yan, and Huanting Wang, Recent advances in polymer and polymer composite membranes for reverse and forward osmosis processes, *Progress in polymer science* 61 (2016): 104-155.
- [46] Yin, Jun, and Baolin Deng, Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment, *Journal of membrane science* 479 (2015): 256-275.
- [47] Zhu, Hu, Templating gold nanoparticles on nanofibers using block copolymer thin films, (2019).
- [48] C. Huang, Réalisation et caractérisation des revêtements à base de laiton, Thèse de doctorat Université Bourgogne Franche-Comté, (2018).
- [49]. S. Vepřek, Nouveaux matériaux de revêtement ultra-durs thermodynamiquement stables et résistants à l'oxydation, *Technologie des surfaces et des revêtements*, (1996) 394–401.
- [50] M. Ramazani, F. Ashrafizadeh, and R. Mozaffarinia, Optimization of Composition in Ni (Al)-Cr₂O₃ Based Adaptive Nanocomposite Coatings, *Journal of thermal spray technology* 23(2014): 962-974.
- [51] A. Omar, et al., Influence of post-treatment on the microstructural and tribomechanical properties of suspension thermally sprayed WC–12 wt% Co nanocomposite coatings, *Tribology letters* 65.2 (2017): 33.
- [52] F. Wang, Préparation électrochimique et caractérisation de films composites nickel / PTFE ultra-dispersés à partir d'une solution aqueuse, (2004) 1311–1316
- [53] S. Dong, Résistance à l'usure du sable du revêtement nanocomposite électrolytique au pinceau dans l'huile et son application à la remise à neuf, (2005) 176-180,
- [54] Shabani-Nooshabadi, Mehdi, et al, Electrodeposition of polyaniline-montmorillonite nanocomposite coatings on 316L stainless steel for corrosion prevention, *Journal of Polymer Research*, 21 (2014) : 1-10.
- [55]. X. Shi, TA Nguyen, Z. Suo, Y. Liu et R. Avci, Effet des nanoparticules sur l'anticorrosion et les propriétés mécaniques du revêtement époxy, *Surface & Coatings Technology*, (2009).
- [56] Arzate, Alfa, Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire, *Revue de littérature. Entre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole. Canada* (2008).
- [57] S. LACHEBI, Valorisation des rejets de l'industrie Laitière par techniques membranaires ultrafiltration, Thèse de doctorat, (2009).
- [58] Lau, W. J., et al., A review on polyamide thin film nanocomposite (TFN) membranes: History, applications, challenges and approaches, *Water research* 80 (2015): 306-324.
- [59] Arzate, Alfa, Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire, *Revue de littérature. Entre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole. Canada* (2008).
- [60] F. BENSIFI, Traitement des effluents liquides par des supports céramiques. Thèse de doctorat UNIVERSITE Abdelhamid Ibn Badis MOSTAGANEM, (2014).

- [61] A. Bouchoux, Étude de la nanofiltration pour son intégration dans les procédés de production d'acides organiques. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, (2004).
- [62]. Barbar, Reine. , Contribution à la mise au point de nouveaux matériaux membranaires pour la filtration de milieux complexes : étude physico-chimique de membranes d'acétate de cellulose et de méthylcellulose partiellement alkylée obtenues par immersion-précipitation, Autre, Institut National Polytechnique de Lorraine, Français. pdf (2006) 44.
- [63] J. BIKAI, Etude l'évolution des propriétés de surface d'un matériau minéral à porosité contrôlée lors de sa mise en oeuvre dans des tests d'ultrafiltration et de nanofiltration, Thèse de doctorat. Université de Haute Alsace-Mulhouse, (2015).
- [64].www.degremont.com
- [65] Y. Mandri, Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide : Parametric study of sea water desalination process by indirect freezing Thèse de doctorat Université Claude Bernard–Lyon I, (2011).
- [66] F.DAHMANI, Etude computationnelle de la déminéralisation des eaux par osmose inverse, Thèse de doctorat .12-11-(2017).
- [67]. M Selmi, Mohammed J. Al-Khawaja, and Abdulhamid Marafia, Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector, Renewable energy 33.3 (2008) : 383-387.
- [68] M. METAICHE, Technologie Membranaire génie civil ssa metaiche mehdi,(2014).
- [69] Berland, JEAN-MARC, and C. A. T. H. E. R. I. N. E. Juery, Procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Document Technique FNDAE N 14, (2002) 71.
- [70] http://perso.wanadoo.fr/jose.braun/separation/uf_et_oi.htm.
- [71] Berland, Jean-Marc, and Catherine Juery, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique FNDAE 14 (2002).
- [72]. Pellegrin, Bastien, Analyse multi-échelle de la dégradation de membranes d'ultrafiltration en polyethersulfone/poly (N-vinyl pyrrolidone) en conditions d'usage, Thèse de doctorat Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.
- [73] Berland, Jean-Marc, and Catherine Juery, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique FNDAE 14 (2002).
- [74] METAICHE, Mehdi, Technologie Membranaire génie civil ssa metaiche mehdi, (2014).
- [75]. Aptel, Philippe, and Chris A. Buckley, Categories of membrane operations, Water treatment membrane processes (1996): 2-1.
- [76]. Abidi, Abdenabi. ÉTUDE DE MÉCANISMES DE TRANSFERT DES ORTHOPHOSPHATES À TRAVERS UNE MEMBRANE DE NANOFILTRATION EN MODE BATCH. EFFET DE LA MATRICE EXPÉRIMENTALE SUR LA SÉLECTIVITÉ ET MODÉLISATION PHÉNOMÉNOLOGIQUE Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra, (2014).
- [76] I. BENAMOR, Elaboration des membranes céramiques de microfiltration, Thèse de doctorat. (2016).
- [77]<https://synderfiltration.com/learning-center/articles/introduction-to-membranes/phase-inversion-membranes-immersion-precipitation>
- [78] O. CEPERKOVIC, Propriétés des membranes homogènes composées de SPEEK/PI pour la séparation de la vapeur d'eau Thèse de doctorat. Université Laval, (2007).

- [79] Ray, S. Sinha, and M. Okamoto, Nanocomposites polymère/silicate en couches : un examen de la préparation au traitement, *Progress in Polymer Science* 28 (2003) : 1539-1641.
- [80]. NADOUR, Meriem, Etude d'un procédé hybride à membrane pour le traitement des effluents industriels Thèse de doctorat. Faculté de Chimie, (2018).
- [81] Z. BOUDJNANE, Synthèse des membranes à base de polymères et d'argile, Thèse de doctorat, (2018).
- [82] Yang, Yanan, et al, The influence of nano-sized TiO₂ fillers on the morphologies and properties of PSF UF membrane, *Journal of Membrane Science* 288.1-2 (2007): 231-238.
- [83]. https://synderfiltration.com/learning_center/articles/introduction-to-membranes/phase-inversion-membranes-immersion-precipitation
- [84]. Reculosa, Stéphane. Synthèse de matériaux d'architecture contrôlée à base de silice colloïdale. Thèse de doctorat Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, (2004).
- [85]. Lalia, Boor Singh, et al, A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship, *Desalination* ,326 (2013): 77-95.
- [86]. Henderson, K. Richard, et al, Expanding GSK's solvent selection guide—embedding sustainability into solvent selection starting at medicinal chemistry, *Green Chemistry* 13.4 (2011): 854-862.
- [87] M. Faize, et al, Genome wild analysis and molecular understanding of the aquaporin diversity in olive trees (*Olea Europaea* L.), *International Journal of Molecular Sciences* 21.11 (2020): 4183.
- [88]. Jantaporn, Waritha. Technologies membranaires innovantes pour la réutilisation des eaux Thèse de doctorat Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2016.
- [89]. Mid-term review report for ERANETMED2-72-357 project IDEA, (2018).
- [90] M. Khayet, Souhaimi, and M. Takeshi, Membrane distillation : principes and applications, (2011).
- [91] M. Michaud, Contacteur membranaire innovant pour la cristallisation : application aux systèmes de type diffusion/réaction, Thèse de doctorat Université de Lyon, (2019).
- [92] N. Jongen, et al, Development of a Continuous Segmented Flow Tubular Reactor and the "Scale-out" Concept—In Search of Perfect Powders, *Chemical Engineering & Technology : Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology* 26.3 (2003) : 303-305.
- [93] E. Simone, et al, Preventing crystal agglomeration of pharmaceutical crystals using temperature cycling and a novel membrane crystallization procedure for seed crystal generation, *Pharmaceutics* 10.1 (2018) : 17.
- [94]. Zarkadas, M. Dimitrios, and Kamalesh K. Sirkar, Antisolvent crystallization in porous hollow fiber devices, *Chemical engineering science* 61.15 (2006): 5030-5048.
- [95] A. Amer, D. Enrico and M. Francesca, Membrane distillation : Recent developments and perspectives, *Desalination*, 356 (2015) 56-84
- [96] C. Quist-Jensen, A. Amer, A study of membrane distillation and crystallization for lithium recovery from high-concentrated aqueous solutions, *Journal of Membrane Science*, 505 (2016) 167-173.
- [97] J. Kim, Hong, Distillation à membrane (MD) intégrée à la cristallisation (MDC) pour le traitement de l'eau de production de gaz de schiste (SGPW), *Desalination*, (2017).

- [98] Ong, Yee Kang, et al. , Recent membrane development for pervaporation processes, *Progress in Polymer Science* 57 (2016): 1-31.
- [99] www.globalmvp.org. Programme de conception conceptuelle de dessalement de 3ème génération
- [100] Unicef, Fonds des Nations Unies pour l'enfance, Organisation Mondiale de la Santé, (2015).
- [101] Luo, Tianyi, Y. Robert, and Paul Reig, Aqueduct projected water stress country rankings' Technical Note 16 (2015).
- [102] Kalogirou, A. Soteris, Seawater desalination using renewable energy sources, *Progress in energy and combustion science* ,31.3 (2005) : 242-281.
- [103] GUIMARD, Laura, Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires, Thèse de doctorat Université de Lyon, (2019).
- [104].Birkett, D. James, The history of desalination before large-scale use, *History, Development and Management of Water Resources*, EOLSS (2010).
- [105] Bandelier, Philippe, et al. , MED seawater desalination using a low-grade solar heat source, *Desalination and Water Treatment* 57.48-49 (2016) : 23074-23084.
- [106] S. Loeb, The Loeb-Sourirajan membrane : How it came about, (1981). 1-9.
- [107] J .PASTOR, and Anne-Marie PAULI, Dialyse, *Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation* 2.P1525 (1995) : p1525-1.
- [108].Birkett, J.D., The History of Desalination Before Large-Scale Use, 2012. J. D. Birkett, The History of Desalination Before Large-Scale Use, *Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE)*, (2012).
- [109]. Casimiro, Sérgio, et al. , MED parallel system powered by concentrating solar power (CSP). Model and case study : Trapani, Sicily, *Desalination and water treatment* 55.12 (2015): 3253-3266.
- [110].Glade, H., Genthner, K. The problem of Non-condensable gas release in evaporators, 2000. H Glade, and Klaus Genthner, The problem of Non-condensable gas release in evaporators, *Desalination* ,49 (2000) : 357-365.
- [111] Hou, Hao, et al, Distribution characteristics of falling film thickness around a horizontal tube, *Desalination* 285 (2012) : 393-398.
- [112] J. Cooper, and R. Dooley, International association for the properties of water and steam: Release on the iapws formulation 2008 for the viscosity of ordinary water substance, IAPWS Release, IAPWS Secretariat (2008).
- [113]. Méricq, Jean-Pierre. 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 de doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2009).
- [114] Bandelier, P., Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres, *Encyclopédie de l'Énergie*. URL : <http://encyclopedie-energie.org/articles/le-dessalement-d%E2%80> (2016).
- [115] F. MADJI, et I. BENAICHA, Automatisation et supervision d'une station de dessalement Thèse de doctorat, (2022).
- [116] F. Tata-Ducru, Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes Agro paris techniques, (2009).

- [117] <http://dessalementunisie.e-monsite.com/pages/sous-partie/1-3-distillation-par-compression-de-vapeur-vapor-compression-ou-vc.html>.
- [118] D.MOUDJEBER, Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : cas de l'Algérie, Thèse de doctorat, (2015).
- [119] O. Aliku, Desalination : à means of increasing irrigation water sources for sustainable crop production." Desalination (2017) : 1755-1315.
- [120] L. GUIMARD, Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires, Thèse de doctorat Université de Lyon, (2019)
- [121] F. KEDDARI, Concept et paramètres de traitement de l'eau de mer par la Station de Dessalement de Ténès, (2020).
- [122] <http://gr-ea.weebly.com/uploads/2/2/4/0/22402368/cours>.
- [123] <http://osmose-tpe.e-monsite.com/pages/a-le-fonctionnement>
- [124] <http://osmose-tpe.e-monsite.com/pages/a-le-fonctionnement-de-la-centrale>.
- [125] Garcia, R. Adrian, Etude de la congélation comme technique de traitement des eaux : applications spécifiques, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2004).
- [126] Benabdallah, Samira, et al, Simulation du fonctionnement d'une unité de distillation membranaire sous vide de l'eau de mer fonctionnant totalement à l'énergie solaire (Simulation of the operation of the vacuum membrane distillation unit coupled with solar energy), The 2nd Congress of Thermal Association of the Maroc. (2012).
- [127] M. Benblidia, and Gaëlle Thivet. "Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique de l'offre." Les Notes d'analyse du CIHEAM 58 (2010) : 15.
- [128] <http://udes.cder.dz> ERSAb : Journées sur la Recherche et l'Innovation au Service du Développement Agricole et Aquaculture. Unité de Développement des Equipements Solaires, (2016).
- [129] N. F. R. I. K. H. A., et al. Conception d'une installation de distillation membranaire sous vide de l'eau de mer fonctionnant totalement à l'énergie solaire Design of plant for vacuum membrane distillation of seawater functioning totally with solar energy (2011).
- [130] A.Sadi, Le Dessalement Solaire-Considérations Techniques, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport (2000).
- [131] R .Zarrit, Etude d'un distillateur solaire à effet de serre, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables Ghardaïa, Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, (2012).
- [132] BRAHIM, Lotfi, and Slim CHOUCHE, Fabrication et Expérimentation d'un Distillateur solaire sphérique, (2014).
- [133] Kaabi, A., and Nafila Smakdji. "Impact de l'écart de température eau capteur sur l'efficacité globale d'un distillateur solaire, (2017).
- [134] A. Ziyadou, étude et conception d'un distillateur solaire à effet de serre, mémoire de magistère en Physique Nucléaire, Physique Théorique et Physique Appliquée, université d'Antananarivo 4.08 (2011).

- [135] Khechekhouche, Abderrahmane, and Guehef Chouaib. Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan pour une communauté saharienne, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-oued, (2016).
- [136] T.Tahri, et al. "Dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire en vue de l'irrigation d'une serre agricole, Faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, Université de Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie (2010).
- [137] Verlag, F. R. A. U. N. H. O. F. E. R. Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy. ProDes, (2010).
- [138] Salomon, Jean-Noël. "Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir." Revista de geografia e ordenamento do territorio 1.1 (2012) : 237-a.
- [139] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Éditions Tec & Doc, (2001).
- [140] A.Chaker, and G. Menguy, Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique, Rev. Energ. Ren. Journées de Thermique (2001) : 53-5853.
- [141] Khechekhouche, Abderrahmane, and Guehef Chouaib, Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan pour une communauté saharienne, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-oued, (2016).
- [142] N. Bellel, and I. Tabet, Etude, réalisation et simulation numérique d'un distillateur solaire à cascade, Revue des Energies Renouvelables SIENR 12 (2012) : 49-57.
- [143] S. Fedali, modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales Thèse de doctorat Université de Batna 2, 2008.
- [144]. A. Khedim, Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur, Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique (2003)1-12.
- [145] Saida .Fedali, modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales Thèse de doctorat Université de Batna 2, 2008.
- [146] Manwell, F.James Jon G. McGowan, and Anthony L. Rogers. Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons, 2010.
- [147] V .Franzitta, et al, The desalination process driven by wave energy: A challenge for the future, Energies 9.12 (2016): 1032.
- [148] D. Cheddie, et al.Transient modeling of wave powered reverse osmosis, Desalination 260.1-3 (2010) : 153-160
- [149] Farid, TATA-DUCRU, Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques, bilan économique, analyse critique en fonction des contextes, (2009).
- [150]. <https://www.ulevante.fr> Antoine .O, Le dessalement d'eau de mer, une fausse bonne idée, (2018).
- [151] M .AMITOUCHE, and B. Remini, Operation of Cap Djinet desalination plant and dilution of brine with power station cooling water,Desalination and Water Treatment 57.8 (2016): 3514-3521.
- [152] M. AMITOUCHE, Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur, Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra, (2016)

- [153] Monitoring, Coordinated Mediterranean Pollution, Sea water desalination in the Mediterranean: assessment and guidelines= Dessalement de l'eau de mer en Méditerranée: évaluation et lignes directrices,(2003).
- [154] Elimelech, Menachem, and William A. Phillip, The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment, *science* 333.6043 (2011): 712-717.
- [155] HADJALI, Yassine. Impact des stations de dessalement de l'Eau de mer sur le littoral cas de la Station Plage EL Hilel (AIN Témouchent), Thèse de doctorat (2012).
- [156] M. VALLIÈRES, Comparaison de méthodes de refroidissement et de déshumidification pour une production en serre de tomates biologiques. Thèse de doctorat. Université Laval. (2018).
- [157] Bucklin, R. A., Richard W. Henley, and Dennis Brooks McConnell, Fan and pad greenhouse evaporative cooling systems, Circular (Florida Cooperative Extension Service)(USA) (1993).
- [158] M .Allouane, M. Nouari, and A. MEDJBER, Contrôle climatique de la température et d'humidité sous serre agricole en été, (2022).
- [159] Colorado State University. "Unit 3 -Greenhouse Cooling part 1." [http : //campus.extension.org/pluginfile.php/45752/mod_resource/content/0/Lecture_Notes/Lecture%2008%20-%20Greenhouse%20Cooling.pdf](http://campus.extension.org/pluginfile.php/45752/mod_resource/content/0/Lecture_Notes/Lecture%2008%20-%20Greenhouse%20Cooling.pdf), (2012).
- [160] Netafim "Agriculture Mist Emitters." [http : //www.netafim.fr/product-category/agriculture-mist-emitters](http://www.netafim.fr/product-category/agriculture-mist-emitters), (2013).
- [161] De Halleux, D., and L. Gauthier, Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under northern latitudes, *Journal of Agricultural Engineering Research* 69.1 (1998): 35-42.
- [162] Chassériaux, Gérard. "Déshumidification de l'air." *Serres horticoles et énergie*, présentation (2008) 30.
- [163] M .Yanadori, and Masayoshi H, Study on the heat-flow controllable heat exchanger (2nd report): Dehumidification in the greenhouse by the ventilation type dehumidifier with heat-flow controllable heat exchanger, *Solar energy* 53.1 (1994): 117-123.
- [164] T .Boulard, et al, Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer, *Agricultural and Forest Meteorology* 125.3-4 (2004): 225-239.
- [165] M. M .Rathore, and R. Kapuno, *Engineering heat transfer*, Jones & Bartlett Publishers, (2010).
- [166] <https://www.abcclim.net/les-condensats.html>.
- [167] R. LEPVIRIER, Analyse des sous-performances énergétiques d'éoliennes en utilisant des cartes de contrôle EWMA, Thèse de doctorat. École de technologie supérieure, (2014).
- [168] A.K. Misra, Climate change and challenges of water and food security, *Int. J. Sustainable Built. Environ.*, 3 (2014) 153–165, doi: 10.1016/j.ijsbe.2014.04.006.
- [169] G. Konapala, A.K. Mishra, Y. Wada, M.E. Mann, Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation, *Nat. Commun.*, 11(2020) 1–10, doi: 10.1038/s41467-020-16757-w.
- [170] C. He, Z. Liu, J. Wu, X. Pan, Z. Fang, J. Li, B.A. Bryan, Future global urban water scarcity and potential solutions, *Nat. Commun.*, 12 (2021) 1–11, doi: 10.1038/s41467-021-25026-3.
- [171] Z. Matar, A. Dwiartama, G. Suantika, The effect of implementing the integrated management system in desalination plants in conflict zones: case study on the Gaza Strip, *Future Cities Environ.*, 7 (2021), doi: 10.5334/fce.119.

- [172] J. Bundschuh, M. Kaczmarczyk, N. Ghaffour, B. Tomaszewska, State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: present and future prospects, *Desalination*, 508 (2021) 115035, doi: 10.1016/j.desal.2021.115035.
- [173] N. Ghaffour, J. Bundschuh, H. Mahmoudi, M.F.A. Goosen, Renewable energy-driven desalination technologies : à comprehensive review on challenge and potential applications of integrated systems, *Desalination*, 356 (2015) 94–114.
- [174] F.E. Ahmed, A. Khalil, N. Hilal, Emerging desalination technologies : current status, challenges and future trends, *Desalination*, 517 (2021) 115183, doi: 10.1016/j.desal.2021. 115183.
- [175] A. Ali, R.A. Tufa, F. Macedonio, E. Curcio, E. Drioli, Membrane technology in renewable-energy-driven desalination, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 81 (2018) 1–21.
- [176] H. Chamani, J. Woloszyn, T. Matsuura, D. Rana, C.Q. Lan, Pore wetting in membrane distillation : à comprehensive review, *Prog. Mater. Sci.*, 122 (2021) 100843, doi : 10.1016/j.pmatsci.2021.100843.
- [177] H. Mahmoudi, S.A. Abdul-Wahab, M.F.A. Goosen, S.S. Sablani, J. Perret, A. Ouagued, N. Spahis, Weather data and analysis of hybrid photovoltaic-wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries, *Desalination*, 222 (2008) 119–127.
- [178] H. Mahmoudi, N. Spahis, M.F. Goosen, S. Sablani, S.A. Abdul- Wahab, N. Ghaffour, N. Drouiche, Assessment of wind energy to power solar brackish water greenhouse desalination units: a case study from Algeria, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 13 (2009) 2149–2155.
- [179] C. Paton, A. Davies, The Seawater Greenhouse for Arid Lands, *Proc. Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production*, Santorini, 1996.
- [180] H. Mahmoudi, N. Spahis, M.F. Goosen, N. Ghaffour, N. Drouiche, A. Ouagued, Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit : a case study from Algeria, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14 (2010) 512–517.
- [181] D.-E. Moudjeber, A. Ruiz-Aguirre, D. Ugarte-Judge, H. Mahmoudi, G. Zaragoza, Solar desalination by air-gap membrane distillation: a case study from Algeria, *Desal. Water. Treat.*, 57 (2016) 22718–22725.
- [182] H. Mahmoudi, N. Spahis, S.A. Abdul-Wahab, S.S. Sablani, M.F.A. Goosen, Improving the performance of à Seawater Greenhouse desalination system by assessment of simulation models for different condensers, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14 (2010) 2182–2188.
- [183] M.F.A. Goosen, H. Mahmoudi, N. Ghaffour, Today's and future challenges in applications of renewable energy technologies for desalination, *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.*, 44 (2014) 929–999.
- [184] E.A. Grubert, A.S. Stillwell, M.E. Webber, Where does solar- aided seawater desalination make sense ? A method for identifying sustainable sites, *Desalination*, 339 (2014) 10–17.
- [185] M. Frondel, S.A. Schubert, Carbon pricing in Germany's road transport and housing sector : options for reimbursing carbon revenues, *Energy Policy*, 157 (2021) 112471, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112471.
- [186] M. Frondel, C. Marggraf, S. Sommer, C. Vance, Reducing vehicle cold start emissions through carbon pricing : evidence from Germany, *Environ. Res. Lett.*, 16 (2021) 034041.
- [187] M. Frondel, N. Ritter, C.M. Schmidt, C. Vance, Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies : the German experience, *Energy Policy*, 38 (2010) 4048–4056.

Annexes

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Choisir le lieu des données climatiques... Analyseur d'énergie virtuel... Ouvrir

Afficher carte Afficher données Afficher graphique Afficher notes Aide Apprentissage virtuel Flux de travail Code de couleurs

Étape 1 - Conditions de référence du site Options Aide

Conditions de référence du site

Lieu des données climatiques: Algérie - Adrar/Tout Lieu des installations: Algeria - Adrar - Adrar

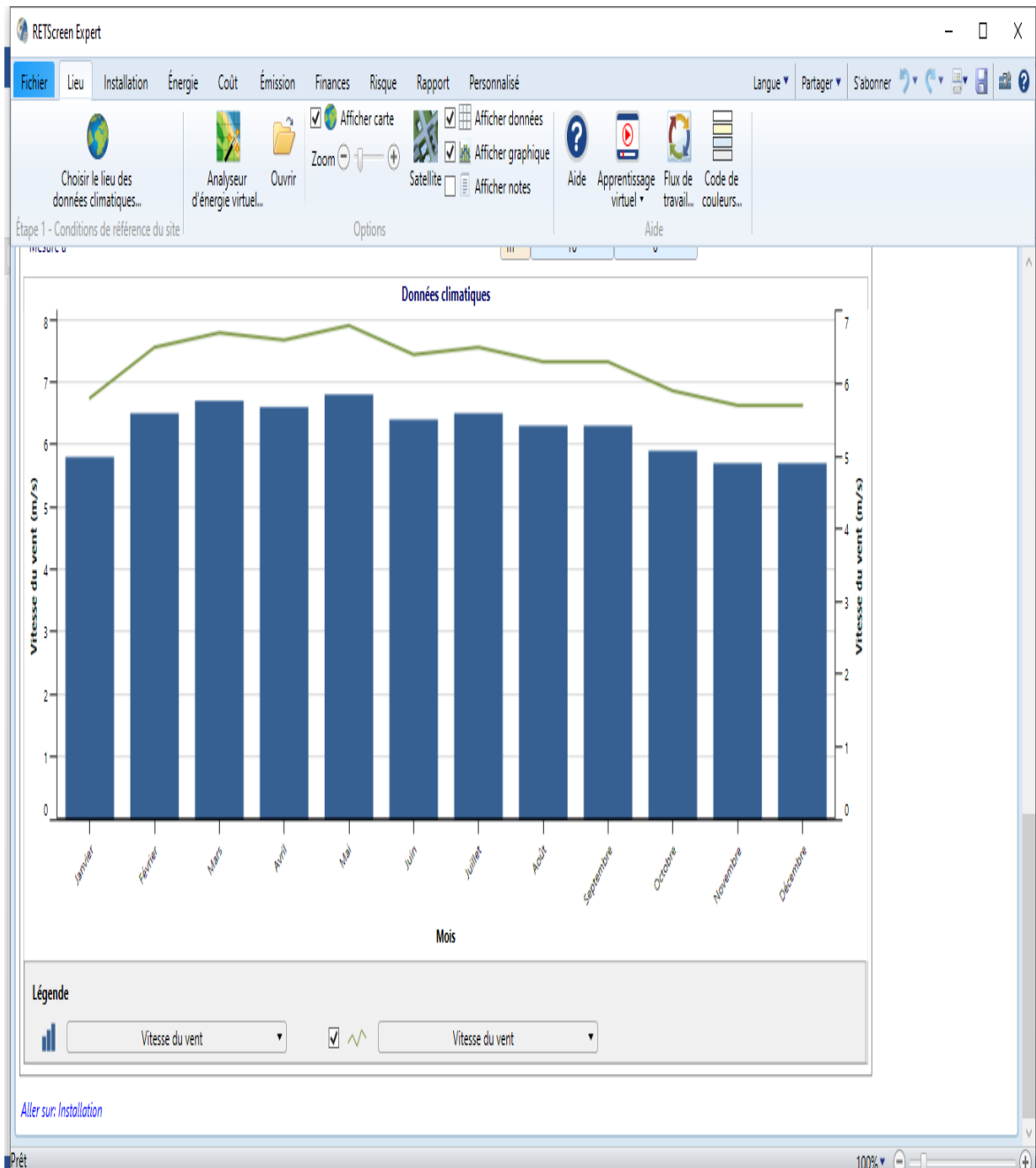
	Unité	Lieu des données climatiques	Lieu des installations	Source
Latitude		27,9	27,9	
Longitude		-0,2	-0,2	
Zone climatique		18 - Très chaud - Sec		Sol+NASA
Élévation	m	283	277	Sol - Carte
Température extérieure de calcul de chauffage	°C	4,2		Sol
Température extérieure de calcul de climatisation	°C	45,9		Sol
Amplitude des températures du sol	°C	27,0		NASA

Mois	Température de		Précipitation	Rayonnement solaire quotidien -		Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Température du sol	Degrés-jours	
	Air	Humidité relative		horizontal	atmosphérique				de chauffage	de climatisation
	°C	%	mm	kWh/m ² /j	kPa	m/s	°C	18 °C	10 °C	
Janvier	12,4	38,6%	5,27	4,42	98,8	5,8	12,0	174	74	
Février	16,0	31,7%	2,80	5,22	98,6	6,5	15,4	56	168	
Mars	19,4	26,5%	4,65	6,50	98,3	6,7	20,4	0	291	
Avril	23,6	23,2%	3,60	7,22	97,9	6,6	25,7	0	408	
Mai	28,1	20,1%	1,86	7,67	97,7	6,8	30,8	0	561	
Juin	33,6	17,5%	0,60	8,14	97,7	6,4	36,3	0	708	
Juillet	36,0	14,7%	0,62	8,03	97,6	6,5	38,8	0	806	
Août	35,4	16,8%	1,24	7,56	97,7	6,3	38,0	0	787	
Septembre	31,6	22,3%	4,50	6,50	97,9	6,3	33,9	0	648	
Octobre	25,0	29,4%	7,13	5,36	98,2	5,9	27,0	0	465	
Novembre	18,2	36,3%	3,00	4,42	98,5	5,7	19,0	0	246	
Décembre	12,9	41,5%	3,41	3,83	98,7	5,7	13,4	158	90	
Annuel	24,4	26,5%	38,68	6,24	98,1	6,3	25,9	388	5 253	
Source	Sol	Sol	NASA	Sol	Sol	Sol	NASA	Sol	Sol	
Mesuré à					m	10	0			

Prêt 90,7%



A[1]: humidité relative et température de l'air en fonction des mois d'une année.



A[02] : vitesse du vent en fonction des mois d'une année.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires combustibles Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

RETScreen - Modèle énergétique Abonné : Visionnement

Agricole - Serre - Serre

Combustibles et horaires

Électricité et combustibles

Bois - copeaux - Défini par l'utilisateur

Horaires

Équipement

Chaleur

pompe à chaleur

Froid

Pompe à chaleur

Utilisation finale

Éclairage

Éclairage

Eau chaude

Eau chaude

Pompes

Pompe de circulation

Moteurs

Ventilateurs - Circulation

Optimiser l'approvisionnement

Sommaire

Inclure la mesure?

Comparaison

Afficher: Énergie Chaleur Froid Électricité Retour simple Inclure la mesure?

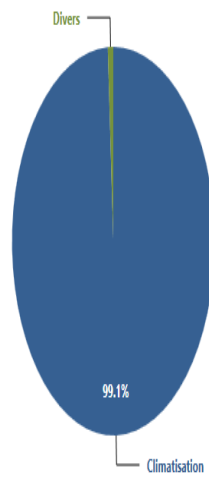
Énergie - cas proposé MWh MWh MWh an

	Chaleur	Froid	Électricité	Retour simple	Inclure la mesure?
Chaleur					
pompe à chaleur					<input type="checkbox"/>
Froid					
Pompe à chaleur					<input type="checkbox"/>
Enveloppe du bâtiment					
Enveloppe du bâtiment	11	56 667			<input type="checkbox"/>
Éclairage					
Éclairage			172		<input type="checkbox"/>
Eau chaude					
Eau chaude	1,2				<input type="checkbox"/>
Pompes					
Pompe de circulation			2		<input type="checkbox"/>
Moteurs					
Ventilateurs - Circulation			313		<input type="checkbox"/>
Total	12,2	56 667	486		

Activer Windows
Accédez aux paramètres pour activer Windows.

A[3]. : ruban énergie -liste déroulante énergie (cas proposé).

Énergie - cas de référence



Section	Énergie - cas de référence	
	MWh	%
Climatisation	56 665	99,1%
Divers	500	0,87%
Équipements mécaniques	316	0,53%
Éclairage	172	0,3%
Chauffage	11	0,02%
Eau chaude	1	0,002%

Activer Windows

Accédez aux paramètres pour activer Windows



A[4].: répartition des besoins en énergie

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Plancher

Mur - sous le niveau du sol

Dalle de fondation

Périmètre exposé	m	844	844
Description		Isolé / niveau du sol	Isolé / niveau du sol
Valeur R	m ² - °C/W	1,6129	1,6129
Surcoûts à l'investissement	DZD		

Infiltrations naturelles d'air

Méthode	Taux de renouvellement d'air		
Volume	m ³	326 400	326 400
Taux de renouvellement d'air	ca/h	0,57	0,57
Infiltrations naturelles d'air	L/s	51 680	51 680
Surcoûts à l'investissement	DZD		

Surcoûts à l'investissement - total	DZD		520 000
Économies d'exploitation et entretien	DZD		
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1
Choix du système		Chaleur et froid	Chaleur et froid
Système de production de chaleur		pompe à chaleur	pompe à chaleur
Chaleur	MWh	65,6	65,6
Système de production de froid		Pompe à chaleur	Pompe à chaleur
Froid	MWh	56 316	56 316

Éne écon

0 0% 0 0%

Activer Windows
Accédez aux paramètres pour activer Windows.

Toit

Surface	m ²	45 616	45 616
Valeur U	(W/m ²)/°C	6,42	6,42
Surcoûts à l'investissement	DZD		500 000

Puits de lumière

		1	2	3	4	1	2	3	4
Surface	m ²	22 808	22 808			22 808	22 808		
Valeur U	(W/m ²)/°C	6,42	6,42			6,42	6,42		
Inclinaison	°	24	24			24	24		
Azimut	°	95	-85			95	-85		
Coefficient d'apport de rayonnement solaire		0,8	0,8			0,8	0,8		
Portion ombragée - hiver	%	50%	50%			50%	50%		
Portion ombragée - été	%	0%	0%			0%	0%		
Surcoûts à l'investissement	DZD								

Plancher

Mur - sous le niveau du sol

Dalle de fondation

Périmètre exposé	m	844	844
Description		Isolé / niveau du sol	Isolé / niveau du sol
Valeur R	m ² - °C/W	1,6129	1,6129
Surcoûts à l'investissement	DZD		

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Enveloppe du bâtiment

Description Enveloppe du bâtiment

Note

Apprentissage virtuel

Enveloppe du bâtiment

	Cas de référence				Cas proposé			
Nord du bâtiment	5				5			
Horaire	Cas de référence				Cas proposé			
Surcoûts à l'investissement	DZD				20 000			

	Nord	Est	Sud	Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest
<input checked="" type="checkbox"/> Murs								
Surface	m ² 2 176	1 050	2 176	1 050	2 176	1 050	2 176	1 050
Surface nette	m ² 0	0	0	0	0	0	0	0
Valeur U	(W/m ²)/°C 6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42
Surcoûts à l'investissement	DZD							
<input checked="" type="checkbox"/> Fenêtres								
Surface	% 100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Valeur U	(W/m ²)/°C 6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42
Coefficient d'apport de rayonnement solaire	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Surcoûts à l'investissement	DZD							
<input checked="" type="checkbox"/> Ombrage - période d'utilisation								
Portion ombragée - hiver	% 50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Portion ombragée - été	% 0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Surcoûts à l'investissement	DZD							

A[5] : ruban énergie - liste déroulante enveloppe de bâtiment.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Combustibles et horaires

- Électricité et combustibles
 - Bois - copeaux - Défini par l'utilisateur
 - Horaires
- Équipement**
 - Chaleur
 - Chauffage
 - Eau chaude sanitaire
- Utilisation finale**
 - Enveloppe du bâtiment
 - Enveloppe du bâtiment
 - Éclairage
 - Éclairage
 - Eau chaude
 - Eau chaude
 - Pompes
 - Pompe de circulation
- Optimiser l'approvisionnement**
- Sommaire**
 - Inclure la mesure?
 - Comparaison

Moteurs

Description Ventilateurs - Circulation

Note

Méthode

Méthode 1 Méthode 2

Apprentissage virtuel

Moteurs - Méthode 1

Description	Quantité	Capacité KW	Cas de référence		Cas proposé		Surcoûts à l'investissement DZD
			Facteur de charge - global %	Nb. d'heures d'opération h/an	Facteur de charge - global %	Nb. d'heures d'opération h/an	
Ventilateurs - Circulation	68	0,75	70%	8 760	70%	8 760	
Total	68						0

	Cas de référence	Cas proposé	Énergie économisée
Surcoûts à l'investissement	DZD	0	
Économies d'exploitation et entretien	DZD		
Électricité	MWh	313	313 0 0%

Impact

Impact sur la climatisation 100%

Impact sur le chauffage des locaux 100%

Image Note - Moteurs - Ventilateurs - Circulation

A[6]. : Ruban énergie –liste déroulante utilisation finale.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Équipement

- Chaleur
 - pompe à chaleur
- Froid
 - Pompe à chaleur

Utilisation finale

- Éclairage
 - Éclairage
 - Eau chaude
 - Eau chaude
 - Pompes
 - Pompe de circulation
 - Moteurs
 - Ventilateurs - Circulation
- Optimiser l'approvisionnement
- Sommaire
 - Inclure la mesure?
 - Comparaison

Éclairage - Niveau 2

	Cas de référence	Cas proposé	Énergie économisée
<input checked="" type="checkbox"/> Éclairage - calculatrice			
Type de local	Entrepôt		
Éclairage - suggéré	Lux	100	
Éclairage	Lux		
Type d'éclairage	Diode électroluminescente (DEL)	Diode électroluminescente (DEL)	
Rendement	lm/W	100	
Charge électrique par lampe	W	325	
Nombre de lampes par luminaire		1	
Pertes diverses	W	0	
Charge électrique par luminaire	W	325	
Nombre de luminaires - suggéré		440	
Nombre de luminaires		440	
Nombre de lampes - total		440	
Éclairage - variance	%		
No. d'heures d'opération	h/an	1 200	
Méthode d'évaluation des coûts		Niveau 1	
Surcoûts à l'investissement	DZD		660 000
Économies d'exploitation et entretien			
Nombre d'unités		1	
Électricité	MWh	172	0 0%

Impact

Impact sur la climatisation 100%

Impact sur le chauffage des locaux 100%

Activer Windows
Accédez aux paramètres pour activer Windows

A[7]. : ruban énergie –liste déroulante utilisation finale –éclairage.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Chaleur pompe à chaleur Froid Pompe à chaleur

Utilisation finale

Éclairage Éclairage Eau chaude Eau chaude Pompes Pompe de circulation Moteurs Ventilateurs - Circulation

Optimiser l'approvisionnement

Sommaire Inclure la mesure? Comparaison

Pompes - Pompes

		Cas de référence	Cas proposé	Énergie économisée
Moteur				
Type		Haut rendement	Haut rendement	
Capacité	kW	1,5	1,5	
Rendement - plein régime	%	87,7%	87,7%	
Fabricant				
Modèle				
Facteur de charge	%	70%	70%	
Rendement - conditions d'opération	%	86,8%	86,8%	
Puissance à l'arbre moteur	kW	1,1	1,1	
Pompe				
Rendement	%	75%	75%	
Puissance hydraulique - plein débit	kW	0,79	0,79	
Type de débit		Variable	Variable	
Plage de débit		Élevé	Élevé	
Type de régulation du débit		Vitesse variable	Vitesse variable	
No. d'heures d'opération	h/an	3 000	3 000	
Surcoûts à l'investissement	DZD		1 000	
Économies d'exploitation et entretien	DZD			
Nombre de pompes		1	1	
Électricité	MWh	2	2	0 0%

Impact

Impact sur la climatisation 100%

Impact sur le chauffage des locaux 100%

Activer Windows
Accédez aux paramètres pour activer Windows.

A[8] : ruban énergie –liste déroulante utilisation –pompe.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalité Langue Partager Sabonner Aide Apprentissage virtuel

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Tableau de bord.. Utilisation finale.. Cible.. Copier référence dans proposé

Options

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Équipement

- Chaleur
 - Chauffage
 - Eau chaude sanitaire
- Utilisation finale
 - Enveloppe du bâtiment
 - Enveloppe du bâtiment
 - Éclairage
 - Éclairage
 - Eau chaude
 - Eau chaude
 - Pompes
 - Pompe de circulation
- Optimiser l'approvisionnement
- Sommaire
 - Inclure la mesure?
 - Comparaison

Horaires

Description 24/7 Cas de référence Cas proposé

Occupé

Température de consigne - chauffage °C 23 23 23

Température de consigne - climatisation °C 24 24 24

Non occupé

Température de consigne - chauffage °C 23 23

Température de consigne - climatisation °C 24 24

Taux d'occupation - quotidien

Jour	Unité	24/7	Cas de référence	Cas proposé
Lundi	h/j	24	24	24
Mardi	h/j	24	24	24
Mercredi	h/j	24	24	24
Jeudi	h/j	24	24	24
Vendredi	h/j	24	24	24
Samedi	h/j	24	24	24
Dimanche	h/j	24	24	24
Taux d'occupation - annuel	h/an	8 760	8 760	8 760
	%	100%	100%	100%

Température de transition chauffage/climatisation °C 16

Longueur de la saison de chauffage j 49,1

Longueur de la saison de climatisation j 316

A[9] : Ruban énergie- liste déroulante horaire.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Horaires Chaleur Froid Énergie Chaleur Électricité Inclure la mesure? Comparaison Options Aide

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Équipement Étape 3 - Utilisation finale Étape 4 - Optimiser Étape 5 - Sommaire

Combustibles et horaires
 ▲ Électricité et combustibles
 Bois - copeaux - Défini par l'utilisateur
 Horaires
 ▲ Équipement
 ▲ Chaleur
 pompe à chaleur
 ▲ Froid
 Pompe à chaleur
 ▲ Utilisation finale
 ▲ Enveloppe du bâtiment
 Enveloppe du bâtiment
 ▲ Éclairage
 Éclairage
 ▲ Eau chaude
 Eau chaude
 ▲ Pompes
 Pompe de circulation
 -
 ▲ Optimiser l'approvisionnement
 ▲ Sommaire
 Inclure la mesure?
 Comparaison

Afficher: Énergie

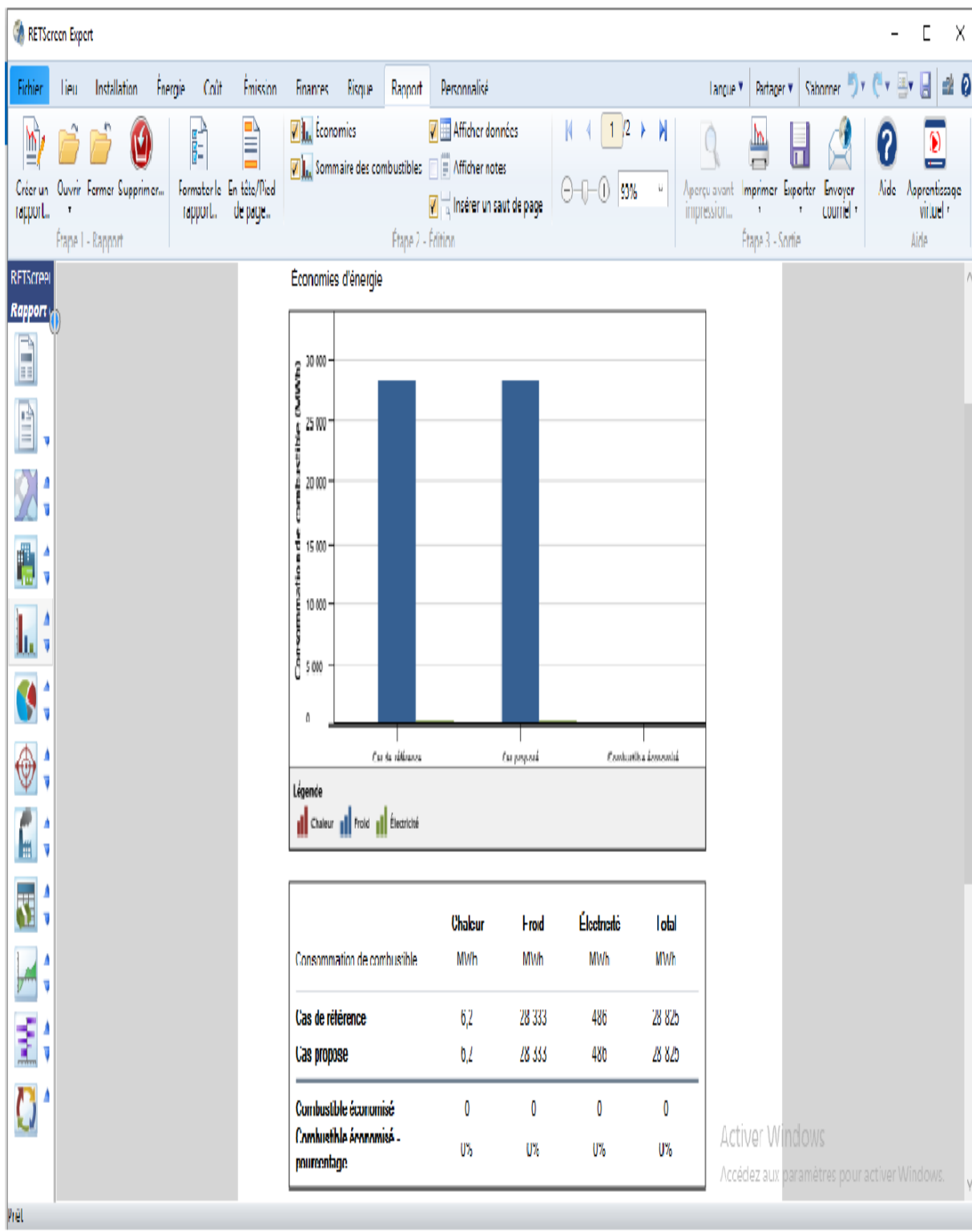
Consommation de combustible - cas proposé

	Chaleur	Froid	Électricité	Retour simple an	Inclure la mesure?
Chaleur					
pompe à chaleur					<input type="checkbox"/>
Froid					
Pompe à chaleur					<input type="checkbox"/>
Enveloppe du bâtiment					
Enveloppe du bâtiment	5,6	28 333			<input type="checkbox"/>
Éclairage					
Éclairage			172		<input type="checkbox"/>
Eau chaude					
Eau chaude	0,6				<input type="checkbox"/>
Pompes					
Pompe de circulation			2		<input type="checkbox"/>
Moteurs					
Ventilateurs - Circulation			313		<input type="checkbox"/>
Total	6,2	28 333	486		

Activer Windows
Accédez aux paramètres pour activer Windows.

Allez sur: Coût

A[10] : ruban énergie –liste déroulante consommation de combustible (cas proposé)



A[11] : Ruban rapport.

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Électricité Inclure le système? Combustibles Tableau de bord... Cible... Copier - Niveau 2->3 Aide Apprentissage virtuel

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Technologie Étape 3 - Sommaire Options Aide

Comburibles et horaires

- Électricité et combustibles
- Technologie
 - Électricité
 - Éolienne - 10000 kW (5,3m/s @10m)
 - Éolienne - 10000 kW (6,3m/s @10m)
 - Éolienne - 10000 kW (7,3m/s @10m)
 - Éolienne - 10000 kW (8,3m/s @10m)
 - Éolienne - 10000 kW (9,3m/s @10m)
 - Sommaire
 - Inclure le système?
 - Comparaison

Éolien

Description: Éolienne - 10000 kW (6,3m/s @10m)

Note:

Niveau: Niveau 1 Niveau 2 Niveau 3 Apprentissage virtuel

Éolien - Niveau 2

Évaluation des ressources

Méthode d'évaluation de la ressource: Vitesse du vent

Vitesse de vent - annuelle: m/s 6,2649

Mesuré à: m 10

Coefficient de cisaillement du vent: 0,14

Température de l'air - annuelle: °C 24,3923

Pression atmosphérique - annuelle: kPa 98,1264

Données climatiques: Algérie - Adrar/ Tout 6,3 10 24,4 98,1

Éolienne

Capacité électrique par turbine: MW 2

Fabricant:

A[12]: ruban énergie –liste déroulante électricité –éolienne

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Électricité Inclure le système? Combustibles Tableau de bord... Cible... Copier - Niveau 2->3 Aide Apprentissage virtuel

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Technologie Étape 3 - Sommaire Options Aide

Courbe de puissance et d'énergie

Vitesse du vent (m/s)	Courbe de puissance (kW)	Courbe d'énergie (MWh)
0	0	
1	0	
2	0	
3	0	387
4	38.51	1 148
5	133.5	2 316
6	249.04	3 749
7	418.49	5 259
8	644.42	6 707
9	913.99	8 020
10	1 178.43	9 166
11	1 560.98	10 137
12	1 774.07	10 927
13	1 887.03	11 539
14	1 925.55	11 979
15	1 966.62	12 259
16	1 982.03	
17	1 992.3	
18	2 000	
19	2 000	
20	2 000	
21	2 000	
22	2 000	
23	2 000	
24	2 000	
25	2 000	
26	2 000	
27	2 000	
28	2 000	
29	2 000	
30	2 000	

Courbe de puissance et d'énergie

Activer Windows Accédez aux paramètres

A[13] : Courbe de puissance énergie

RETScreen Expert

Fichier Lieu Installation Énergie Coût Émission Finances Risque Rapport Personnalisé Langue Partager S'abonner

Électricité et combustibles Électricité Inclure le système? Combustibles Tableau de bord... Cible... Copier - Niveau 2->3 Aide Apprentissage virtuel

Étape 1 - Combustibles et horaires Étape 2 - Technologie Étape 3 - Sommaire Options Aide

Pertes		
Pertes par effet de sillage	%	4%
Pertes au niveau des pales	%	2%
Pertes diverses	%	6%
Disponibilité	%	98%
Sommaire		
Facteur d'utilisation	%	35,1%
Coûts d'investissement	DZD/kW	0
	DZD	0
Coûts d'exploitation et entretien (économies)	DZD/kW-année	0
	DZD	0
Prix de l'électricité exportée	Prix de l'électricité exportée - annuel	
	DZD/kWh	1,70
Électricité exportée au réseau	MWh	36 866
Revenu d'exportation d'électricité	DZD	62 671 740
Autres informations		
		Par turbine
Production énergétique non corrigée	MWh	7 558
Coefficient de pression		0,969
Coefficient de température		0,968
Production énergétique brute	MWh	7 090
Coefficient de pertes		0,87
Rendement spécifique	kWh/m ²	1 109

A[14]: ruban énergie –liste déroulante production électricité –éolienne