



**Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem**  
**Faculté des sciences et de la technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



# **THÈSE DE DOCTORAT**

Présentée par

**Monsieur MOUDJEBER Djamel-Eddine**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR ès SCIENCES**

en

**Génie Mécanique**

Sujet de la thèse :

**Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement :**  
**Cas de l'Algérie**

Thèse présentée et soutenue à Mostaganem le 28 janvier 2015 devant le jury composé de :

SADOK Ahmed	Professeur	Université de Mostaganem	Président
SPAHIS Nawel	Professeur	Université de Chlef	Examinatrice
TALEB Safia	Professeur	Université de Sidi Belabbès	Examinatrice
HAOUT Samir	MC «A »	Université de Mostaganem	Examineur
MAHMOUDI Hacène	MC «A »	Université de Chlef	Directeur de thèse
DJENNAD M'hamed	Professeur	Université de Mostaganem	Co-directeur de thèse



## Sommaire

Nomenclature.....	i
Liste de tableaux .....	iii
Liste des figures.....	iv
Abstract.....	b
resume.....	c
Introduction.....	I

## Chapitre I

**Généralités sur les techniques de dessalement**

<b>I.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Qualité des EAUX MARINES ET SAUMATRES.....</b>	<b>1</b>
I.2.1. La salinité.....	1
I.2.2. La température .....	3
I.2.3. La teneur en matières en suspension (MeS) .....	3
<b>I.3. Qualité de l'eau potable .....</b>	<b>4</b>
<b>I.4. LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT DES EAUX.....</b>	<b>6</b>
<b>I.5. LES PROCEDES DE DISTILLATION.....</b>	<b>7</b>
I.5.1. Distillation à simple effet.....	7
I.5.2. Distillation à effet multiple : .....	8
I.5.3. Multi-effet avec compression de vapeur .....	10
I.5.3.1. Compression mécanique de la vapeur.....	10
I.5.3.2. Thermocompression de la vapeur.....	10
I.5.4. Le procédé de distillation par détente successive (Multi-Stage Flash distillation MSF) .....	12
I.5.5. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).....	13
I.5.6. La distillation par compression de vapeur (VC) .....	14
I.5.7. Avantages de la distillation .....	14
I.5.7.1. Couplage avec groupe électrogène.....	15
I.5.7.2. Couplage avec une turbine à gaz,.....	15
I.5.7.3. Couplage avec centrale thermique à vapeur.....	15
<b>I.5.8. PROCEDE DE CONGELATION .....</b>	<b>16</b>
<b>I.6. PROCÉDÉS MEMBRANAIRES.....</b>	<b>16</b>
I.6.1. Dessalement par électrodialyse .....	16
I.6.2. L'osmose Inverse (RO).....	17
I.6.2.1. Les caractéristiques principales d'une installation d'osmose inverse .....	22
I.6.2.2. Avantages et contraintes de l'osmose inverse : .....	24

## Chapitre II

**Dessalement et énergies renouvelables**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>II.2. Application des énergies renouvelables dans le dessalement .....</b>	<b>27</b>
II.2.1. Introduction.....	27
II.2.2. Application de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau.....	28
II.2.3. L'énergie éolienne et le dessalement.....	39
II.2.4. Dessalement par Géothermie .....	42
<b>II.3. Considérations d'échelle et considérations économiques.....</b>	<b>44</b>
II.3.1. Facteurs influant sur l'échelle .....	44
II.3.2. Rapport coût-efficacité par rapport aux sources d'énergie conventionnelles : .....	44

II.3.3 Potentiel du marché.....	47
II.3.4 Processus de sélection et de gestion des risques.....	48
II.3.5 Promotion de la politique des énergies renouvelables et la réduction du recours à la production des énergies conventionnelles .....	50

### Chapitre III Le dessalement en Algérie

III.1-Introduction .....	54
III.2. Capacité de dessalement dans le monde .....	55
III.3. Le dessalement en algerie.....	56
III.3.1. Stratégie et avantages du dessalement en Algérie :.....	58
III.3.2. Différents programmes de dessalement et capacité de production en Algérie ...	59
III.3.2.1. Programme d'urgence de dessalement de l'eau de mer .....	59
III.3.2.2. Programme des Méga-Stations.....	60
III.5. future du dessalement en Algérie .....	64
III.6. Immobilisation et transfert Sud-Sud.....	67
III.7. Réutilisation des eaux usées .....	70
III.8. Capacité de mobilisation de l'Algérie.....	70

### Chapitre IV Partie expérimentale

IV.1 Introduction.....	72
IV.2. Caractéristiques de l'eau de la nappe Albienne et Normes de potabilité .....	74
IV. 3. Critères de base pour la conception d'une installation de dessalement.....	77
IV. 3.1. Considérations de conception d'usines de dessalement.....	77
IV.4. Expériences pilotes en laboratoire .....	78
IV. 4.1. Usine pilote expérimentale .....	79
IV.4.2. Performances des membranes à basses pression LPRO, effet de la vitesse du flux transmembranaire .....	83
IV.4.3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les simulations .....	85
IV.5 Étude de cas.....	89
IV.5.1. Détermination de la tendance à l'encrassement .....	89
IV.5.3. Analyse des coûts pour le choix de nombre optimal d'éléments LPSWM par enceinte pressurisée.....	95
IV.6. Exploitation intégrée des ressources en eau du réservoir Albien .....	97

### Chapitre V Utilisation des énergies renouvelables, cas de In Salah

V. 1. Introduction .....	100
V.2. Utilisation de l'énergie éolienne.....	100
V.3. DESCRIPTION DES EOLIENNES : .....	103
V.4. Etude THÉORIQUES des éoliennes.....	105
V.4.1. La distribution de Weibull .....	106
V.4.2. Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur .....	107
V.4.3. Production énergétique brute .....	107
V.4.4. Énergie renouvelable captée.....	108
V.4.5. Données météorologiques .....	108

<b>V.4.6. Le Potentiel éolien de l'Algérie.....</b>	<b>109</b>
<b>V.4.7. L'utilisation du logiciel RETScreen .....</b>	<b>114</b>
V.4.7.1. Cas de l'énergie éolienne [A1].....	115
V.4.7.2. Cas de l'énergie photovoltaïque [A2].....	115
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>119</b>
<b>References bibliographiques.....</b>	<b>122</b>

À ma très chère Maman, Allah yarhamha,  
À mon très cher Papa, Allah yarhamou,  
Je leur dédie mon travail !  
D'où ils sont, ils doivent être fiers de moi !

À ma femme  
À mes filles :  
Asma, Rym et Nawel

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 des ces trois années ;
- qui m'a encouragé et poussé à faire mes deux stages, dans d'imminents laboratoires, le premier en Grèce et le second en Espagne ;
- qui m'a fait partager sa perspicacité, sa rigueur scientifique et sa compétence ;
- qui a cru en moi...

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

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 Professeur Sadok Ahmed de l'Université de Mostaganem qui m'a grandement facilité ma toute première inscription 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 Anastasios J. Karabelas qui m'a accueilli dans son laboratoire « Chemical Process and Energy Resources Institut » en Thessalonique (Grèce) et qui m'a permis de mener à bien l'ensemble des mes essais sur un de leur pilote. Mes remerciements vont également à ses collaborateurs qui m'ont beaucoup aidé, le Docteur Dimitrios C. Sioutopoulos pour la manipulation du pilote et le Docteur Sultana T Mitrouli pour le coté simulation. Un grand merci également à notre ami Konstantinos Plakas pour son amabilité et son grand dévouement.

Que le Dr Guillermo Zaragoza trouve ici toute ma reconnaissance et mes remerciements pour m'avoir accueilli à la PSA (Plateforme Solaire d'Almeria-Espagne) et de m'avoir accompagné et facilité la tâche pour accomplir, pendant un mois, mes essais sur un pilote très performant de la PSA.

Enfin, comment ne pas me confondre en remerciements pour le Professeur Spahis Nawel de l'Université de Chlef, le Professeur Taleb Safia de l'Université de Sidi Belabbes ainsi que le Docteur Haout Samir de l'université de Mostaganem, pour les efforts qu'ils ont consentis pour examiner notre travail.



## NOMENCLATURE

Accronyme	Designation
A.D	Dessalement par d'Adsorption
A.D.E	Algérienne Des Eaux
A.E.C	Algerian Energy Company
A.N.B.T	Agence Nationale des Barrages et Transferts
B.O.O	Build Own Operate
B.W.G.H	Serre de dessalement d'eau saumâtre (Brackish Water Green House).
C.M.V	Compression Mécanique de la Vapeur
C.S.P	Energie Solaire à Concentration
C.V	Distillation par Compression de Vapeur
C.T	Compression Thermique
CERTH	Centre de Recherche en Energies Renouvelables de Thessalonique
D.B.O.O	Design Build Own Operate
E.D	Electrodialyse
E.D.R	Electrodialyse Reverse
EPR	Énergie Propre Renouvelable
E.R	Energies Renouvelables
F.I.T	Feed-in tariff
GOR	Gain Out Ratio
H.D	Humidification et déshumidification
H.P.B	Booster de Pression Hydraulique
L.P.R.O	Low Pressure Revers Osmosis (osmose inverse à basse pression)
L.P.S.W.M	Membrane de dessalement de l'Eau de Mer à Basse Pression
M.D	Distillation Membranaire
M.E.D	Multi Effects Distillation (distillation à multiples effets)
M.E.M	Ministère des Énergies et des Mines
M.E.N.A	Middle East and North Africa (Moyen Orient et Afrique du Nord)
M.R.E	Ministère des Ressources en Eau
M.S.F	Multi-Stage Flash distillation (distillation par détente successives)
MeS	Matières en suspension
O.M.S	Organisation Mondiale de la Santé
O.R.C	Cycle de Rankine Organique

P.V	Photovoltaïque
R.E.S	Système d'Énergie Renouvelable
R.O	Reverse osmosis (Osmose inverse O.I)
R.O.S.A	Reverse Osmosis System Analysis
R&D	Recherche et Développement
S.T.E.P	Station de Traitement et d'ÉPuration
S.W.R.O	Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse
T.D.S	Totalité des Sels Dissous
T.R.G	Tarif de Rachat Garanti
T.V	Thermo compression de la vapeur
W.E.C	Convertisseur d'énergie éolienne autonome

**LISTE DE TABLEAUX**

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b> : Composition standard de l'eau de mer	2
<b>Tableau I. 2.</b> Normes de potabilité selon l'OMS	4
<b>Tableau II.1.</b> La consommation mondiale d'énergie primaire en Exa Joules [EJ]	25
<b>Tableau II.2</b> La consommation d'énergie dans les grands procédés de dessalement	37
<b>Tableau II.3.</b> Productivité des différents procédés de dessalement par mètre carré de surface de capteurs solaires	38
<b>Tableau III. 1:</b> Liste des Les stations Mono blocs	60
<b>Tableau III.2:</b> Quelques stations de dessalement à usage industriel	61
<b>Tableau III. 3:</b> Liste des Méga-stations	62
<b>Tableau III.4:</b> Stations de déminéralisation dans le Sud algérien	63
<b>Tableau IV. 1</b> : Analyses chimiques de l'eau de l'aquifère albien (site d'In Salah)	76
<b>Tableau IV.2</b> : résultats expérimentaux de dessalement de l'eau saumâtre avec un élément LPSWM unique dans une unité pilote; salinité de l'eau ~ 1827 mg/L	82
<b>Tableau IV.3:</b> Les prévisions des données de performance de dessalement des éléments LPSWM (Dow XLE) dans 5 à 7 éléments de pression.	86
<b>Table IV. 4.</b> Composition chimique du perméat et de l'eau potable 'mélangée' en fin de process	92
<b>Table IV. 5.</b> Résumé des résultats des calculs de conception pour un seul passage pour le dessalement de l'eau saumâtre utilisant des trains de 5, 6 ou 7 LPSWM par élément de pression	93
<b>Tableau IV.6:</b> Analyse du coût de l'unité de dessalement pour 5, 6 ou 7 éléments par enceinte pressurisée. Capacité de l'usine est de 10.000 m <sup>3</sup> /jour obtenue par le mélange de 65% de la nappe avec 35% de l'eau dessalée	96
<b>Tableau V.1:</b> données des sites sélectionnés	113

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b> : principales techniques de dessalement	<b>6</b>
<b>Figure I.2.</b> Distillation à simple effet	<b>8</b>
<b>Figure I.3:</b> Schéma de principe d'un système de Distillation par détentes successives (MSF)	<b>8</b>
<b>Figure I.4.</b> Compression mécanique de vapeur à un seul effet	<b>10</b>
<b>Figure I.5.</b> Thermo compression à quatre effets	<b>11</b>
<b>Figure I.6.</b> Dessalement par distillation à effet multiple et compression de vapeur à Tripoli, Libye	<b>11</b>
<b>Figure I.7:</b> Schéma de principe de la distillation à multiple effet (MED)	<b>13</b>
<b>Figure I.8</b> : schéma de principe de la compression de la vapeur	<b>14</b>
<b>Figure I.9:</b> Unité d'électrodialyse alimentée en parallèle.	<b>17</b>
<b>Figure I.10.</b> Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	<b>18</b>
<b>Figure I.11:</b> Schéma d'un module spiral	<b>19</b>
<b>Figure I.12</b> : Principe de dessalement par membrane d'osmose inverse	<b>19</b>
<b>Figure I.13</b> : principe de fonctionnement de l'osmose inverse	<b>20</b>
<b>Figure I.14:</b> Schéma de principe d'un échangeur de pression	<b>21</b>
<b>Figure II.1:</b> Les différentes combinaisons possibles entre les sources d'énergie renouvelables avec les procédés de dessalement conventionnelles et innovantes	<b>27</b>
<b>Figure II.2.</b> Processus d'humidification-déshumidification (HDH)	<b>28</b>
<b>Figure II.3.</b> Les systèmes de dessalement solaire	<b>30</b>
<b>Figure II.4.</b> Étang solaire à des fins de chauffage en Australie	<b>33</b>
<b>Figure II.5.</b> Système solaire thermique utilisant une combinaison de capteurs solaires paraboliques pour la génération d'électricité et pour piloter une station de dessalement utilisant la RO	<b>36</b>
<b>Figure II.6.</b> Parc éolien	<b>40</b>
<b>Figure II.7.</b> L'AquaBuoy 2.0	<b>42</b>
<b>Figure II.8.</b> Production brute d'électricité en Allemagne en 2000 et 2008	<b>51</b>
<b>Figure III.1</b> : Différentes techniques de dessalement utilisées et différentes origines des eaux d'alimentation	<b>56</b>
<b>Figure III. 2</b> : Distribution géographique des 5 régions	<b>57</b>
<b>Figure III. 3</b> stratégies de transfert et de distribution de l'eau	<b>59</b>
<b>Figure III.4</b> : Localisation des grandes stations de dessalement de l'eau de mer	<b>64</b>
<b>Figure III. 5</b> : Top 10 des pays selon la capacité totale installée, depuis 1945	<b>65</b>
<b>Figure III. 6</b> : Top 10 des pays selon la capacité totale installée, depuis 2003	<b>65</b>

<b>Figure III. 7</b> : Capacité annuelle contractuelle, par région 2005-2010	<b>66</b>
<b>Figure III. 8</b> : Capacité annuelle contractuelle en Espagne, Australie et en Algérie 2005-2010	<b>66</b>
<b>Figure III.9</b> : Les champs de captage	<b>67</b>
<b>Figure III.10</b> : Stations de pompage et longueur des tronçons de conduite	<b>68</b>
<b>Figure III.11.</b> Transfert Sud-Nord	<b>69</b>
<b>Figure.VI.1.</b> Carte simplifiée du réservoir albien indiquant les contours d'égaux Concentrations	<b>75</b>
<b>Figure IV.2.</b> Photos du pilote (RO)	<b>79</b>
<b>Figure. IV.3.</b> Diagramme schématique de l'unité pilote pour la performance des essais de dessalement	<b>81</b>
<b>Figure IV. 4.</b> Les données expérimentales sur l'effet de la vitesse du courant transversal sur la performance de la membrane.	<b>84</b>
<b>Figure IV.5:</b> Comparaison des données expérimentales (caractéristiques de performance) avec les estimations théoriques (obtenue avec le logiciel de conception commerciale ROSA) pour la membrane basse pression (Filmtec XLE).	<b>88</b>
<b>Figure IV.6</b> : Indices de saturation des phases solides dans le rétentat pour l'eau non traitée et l'eau d'alimentation traitée (acidifié); les valeurs du pH à la sortie du rétentat, 7,1 et 6,1 respectivement pour l'eau d'alimentation traitée et non traitée	<b>91</b>
<b>Figure IV.7:</b> Profil du flux moyen de perméat pour chaque élément LPSWM dans un élément de pression, pour trois cas (5, 6 et 7 éléments de pression)	<b>94</b>
<b>Figure. V.1</b> : Utilisation de l'énergie éolienne dans le monde	<b>103</b>
<b>Figure V.2</b> : Comparaison des prix des différents procédés de production	<b>103</b>
<b>Figure V.3</b> : Schéma de principe d'une éolienne horizontale ( <i>Mahmoudi et al, 2008</i> )	<b>105</b>
<b>Figure V.4.</b> Vitesses moyennes mensuelles des différents sites algériens	<b>112</b>
<b>Figure V.5.</b> Fréquence des vitesses du vent et distribution de Weibull pour les sites sélectionnés	<b>114</b>

التصميم المقترح فعال من حيث التوافق مع الاستغلال الأمثل للموارد بشكل عام. يتم تنفيذ ~~التصميم~~ *Résumé* لتكلفة أيضا محطة إنتاج المياه الصالحة للشرب. أخيرا تقدم إمكانيات استغلال متكاملة من هذه المكامن الحرارية الأرضية، حيث يتم استخراج الطاقة بالإضافة إلى إنتاج مياه صالحة للشرب.

## **ABSTRACT**

A huge geothermal aquifer is located in the northern Algerian Sahara, with brackish water free from toxic inorganic compounds and organic matter. Therefore, this water is appropriate for good quality potable water production after partial desalination. This paper deals with the basic desalination plant design considerations in the context of overall optimal aquifer exploitation. The main types of criteria for such optimization are economic and environmental. Implementing the concept of “blending” reservoir water (at appropriate proportion) with desalinated water, allows cost-effective and environmentally attractive resource exploitation; the latter would be achieved by re-injecting the retentate (after desalination) free from any chemicals that may degrade the reservoir water quality by accumulation over the years. Results are summarized of a typical case study based on low pressure reverse osmosis membrane desalination. Key RO membrane performance data from a pilot unit are employed in support of this study. The results highlight the main features and the constraints in plant design and desalinated water recovery; constraints are mainly imposed by the need to avoid membrane scaling with no use of undesirable synthetic anti-scalants. The proposed cost-effective plant configuration and operating mode are in accord with the overall optimum resource exploitation. A cost analysis is also performed for a typical potable-water production plant. Finally, possibilities are outlined of integrated exploitation of this geothermal reservoir, whereby energy is extracted in addition to potable water production.

## **RESUME**

Une immense nappe albienne, géothermique, est située dans le nord-est du Sahara algérien. Cette nappe est constituée d'une eau saumâtre saine de tous composés inorganiques toxiques et de toutes autres matières organiques. Par conséquent, cette eau est toute à fait appropriée pour la production d'une eau potable de bonne qualité après une désalinisation partielle (une déminéralisation). Ce travail traite des hypothèses de base dont on doit tenir compte pour la conception d'une usine de dessalement à des fins d'une exploitation optimisée de cette nappe albienne. Les principaux types de critères pour une telle optimisation sont, évidemment, d'ordre économique et environnemental. La mise en œuvre du concept de " blending " qui consiste à mélanger, à des proportions appropriées, l'eau de la nappe avec de l'eau dessalée a été choisi. Cette technique nous permet une exploitation rentable des ressources et est une solution attrayante pour l'environnement. En effet, après dessalement, la saumure (retentat) est réinjectée dans le réservoir albien libre de tout produit chimique, évitant ainsi de dégrader, par accumulation au fil des ans, la qualité de l'eau du réservoir : On définit le retentat comme étant la quantité d'eau qui ne traverse pas la membrane dans une osmose inverse. Le concept de « blending » a fait l'objet d'une expérimentation qui a été menée au CERTH (Grèce) afin de déminéraliser l'eau. Après reconstitution de l'eau de la nappe albienne, selon des analyses en notre possession, nous avons procédé à sa déminéralisation. Des résultats de cette étude de cas typique sont présentés. Cette expérience de dessalement membranaire est basée sur l'Osmose Inverse (RO) à basse pression. Cette étude s'appuie sur des données expérimentales obtenues à partir d'un pilote à RO conçu par des chercheurs du CERTH eux mêmes. Les résultats mettent en évidence les principales caractéristiques et les contraintes dans, la conception d'usine de dessalement et dans le taux de conversion du perméat : on définit le perméat comme étant l'eau épurée qui ne comprend plus, ou presque plus, de matière en suspension, dans notre cas c'est l'eau dessalée. Les contraintes sont principalement imposées par la nécessité d'éviter, au moment de l'entartrage de la membrane, l'utilisation d'agents antitartre (anti-scalants) synthétiques si indésirables. La configuration de l'installation proposée est rentable et, de plus, le mode de fonctionnement est conforme pour une exploitation optimale des ressources de cette nappe. Une analyse du coût de production de l'eau douce a été menée. Enfin, les possibilités d'une exploitation intégrée de ce réservoir géothermique, sont décrites de sorte que l'énergie soit extraite, en plus de la production d'eau potable.

# **Introduction**

## **INTRODUCTION**

L'eau est un élément indispensable à toute forme de vie. Elle n'est, malheureusement, pas disponible en quantité infinie sur notre planète et elle pas toujours disponible là où on en a le plus besoin. Avec le développement de l'Homme et des mégapoles où il vit désormais, le problème de la disponibilité de l'eau se pose avec acuité et se posera d'avantage dans un avenir proche, ce qui constitue une perspective inquiétante. Il se pose en matière de qualité pour les pays du Nord et en matière de quantité pour les pays du Sud.

L'Algérie n'échappe malheureusement pas à cette situation de raréfaction de ce précieux liquide. Cette situation est due à un essor démographique très important, à un exode rural vers la zone côtière qui abrite les grandes villes, à une élévation du niveau de vie, à une agriculture irriguée croissante qui nécessite de grandes quantités d'eau et à une activité industrielle grandissante. De plus, les changements climatiques, qui provoquent de longue période de sécheresse, viennent augmenter la pression due au déficit en ressource en eaux.

Sans tenir compte des caprices de la météo, il s'agit, de tenter d'atteindre, de pourvoir au moins 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an et par habitant : le défi n'est pas simple à relever mais il n'est pas insurmontable non plus !

En effet, l'OMS considère qu'il y a stress hydrique lorsqu'un être humain dispose de moins de 1700 m<sup>3</sup> d'eau par an et pénurie lorsqu'il dispose de moins de 1000 m<sup>3</sup> par an. Malheureusement, de nos jours, plus de 1,4 milliards de personnes vivent avec moins de 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an (source BRGM - 2011).

Pour la résolution de cette problématique, en supposant qu'au préalable les reflexes 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 ». La plus importante méthode sur laquelle s'est basée l'excellente politique de notre Ministère des Ressources en Eaux (MRE) pour mettre fin à cette situation de crise, est la technique de dessalement de l'eau :

- Le dessalement de l'eau de la mer méditerranée, dont la salinité est de 35 mg/litre, pour alimenter en eau potable les villes de la zone côtière et ;
- le dessalement (déminéralisation) des eaux saumâtres, dont la salinité ne dépasse pas 0.35 mg/l, pour alimenter les régions enclavées et désertiques.

Parmi les nombreuses méthodes de dessalement ayant fait leurs preuves, l'Algérie a opté, dans la grande majorité des cas, pour la technique dite à Osmose Inverse (RO : Reverse Osmosis). C'est une méthode membranaire mûre, technologiquement bien maîtrisée avec des taux de recouvrement de plus de 60%. Le grand inconvénient qu'on lui attribue c'est d'être énergivore. Justement, afin d'atténuer cet inconvénient, nous proposons, dans cette étude, l'utilisation des énergies renouvelables (solaire, éolien) pour alimenter en énergie de petites installations isolées, non connectées au réseau électrique : l'enjeu est considérable, cela permet, à moindre frais, de stabiliser les populations éparses de l'immense Sahara algérien limitant ainsi leur exode vers le nord !

Si notre pays s'est considérablement investi dans le dessalement c'est, principalement, pour répondre aux besoins des populations, les besoins de l'agriculture, eux, sont couverts par l'eau des barrages. Même si de nos jours 70 barrages sont disponibles avec une capacité de stockage globale de 7,3 milliards de m<sup>3</sup> d'eau et qu'ils devraient être 84 en 2016, pour une capacité de stockage estimée à 8,4 milliards de m<sup>3</sup>, il y a lieu, impérativement, d'améliorer les méthodes d'irrigation.

À ce niveau les questions suivantes s'imposent :

- sommes-nous arrivés à résoudre le problème de la disponibilité de l'eau potable pour les populations avec le dessalement ? Est-ce là un développement durable ?
- les techniques utilisées sont-elles appropriées ?
- à quel prix cette eau dessalée arrive-t-elle à nos robinets ? quel est le futur énergétique du pays ? Les énergies renouvelables sont-elles vraiment une alternative aux énergies fossiles pour alimenter de telles installations ?
- est-ce que toutes les régions du pays sont équitablement alimentées ? Où en sommes-nous avec les transferts entre les différentes régions ?

Avant de répondre à l'ensemble de ces questions, il fallait, au préalable, mettre en relief « l'état de l'art » en matière de dessalement, c'est ce qui a été fait en collectant une bibliographie très fournie et actualisée. Ceci étant fait, nous avons planifiés notre travail comme suit :

Chapitre 1 *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, quelles soient membranaires, par distillation ou autres.

Chapitre 2 *Dessalement et énergies renouvelables* : Quelques possibilités de couplage entre les installations de dessalement et des dispositifs de récupération des énergies renouvelables sont présentées.

Chapitre 3 *Le dessalement en Algérie* : Un état des capacités de dessalement du pays, actuelles et futures, est présenté en précisant la localisation, la capacité nominale et la technique adoptée.

Chapitre 4 *Partie expérimentale* : Dans cette partie nous présentons les résultats de l'étude expérimentale que nous avons faite, en Mai 2013, sur un pilote du Centre de recherche en Energies Renouvelables CERTH de Thessalonique en Grèce. Nous avons reconstitués, au laboratoire, une eau saumâtre à 0,35 mg/l, identique à celle de l'eau de la nappe albien d'In Salah et nous avons utilisés une membrane dite « Low Pressure » (Basse pression) et optés pour la technique de « blending » (mélange). Ces choix sont faits dans le but de consommer le minimum d'énergie pour déminéraliser une telle eau saumâtre et pour étudier ainsi la possibilité de pourvoir en énergie, une telle technique, par le biais des énergies renouvelables (solaire, éolienne et géothermique) dont les gisements sont énormes sur le site d'In Salah. Les résultats sont probants et nous ont permis de valider un modèle numérique décrivant ce processus.

Chapitre 5 *Utilisation des énergies renouvelables, cas de In Salah* : Dans ce dernier chapitre, nous étudierons la possibilité d'alimenter la station de déminéralisation d'In Salah par les énergies renouvelables dont le potentiel est énorme dans le sud Algerien : le solaire et l'éolien. Grâce au logiciel « RETScreen » nous pourrons d'une part, chiffrer ces potentiels et d'autre part, esquisser une étude technico-économique pour voir la faisabilité de la chose et chiffrer les investissements.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les techniques de dessalement**

## **I.1. INTRODUCTION**

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1,4 milliards de km<sup>3</sup>. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km<sup>3</sup>. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres, principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le Water Resources Institute, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. On estime également que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau (*Shiklomanov et al, 2000*).

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années mais leur coût (de 1 à 2 euros / m<sup>3</sup>) limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant dans ces dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par m<sup>3</sup> ont connu une forte diminution.

## **I.2. QUALITE DES EAUX MARINES ET SAUMATRES**

Ce qui caractérise une eau de mer ou une eau saumâtre, c'est leurs salinités, leurs températures et leurs teneurs en matière en suspension (MeS). Ces trois paramètres sont déterminants car ils influent sur le fonctionnement de l'unité de dessalement et sa rentabilité. Voyons donc, dans un premier temps, ce qu'est la salinité.

### **I.2.1. La salinité**

La salinité mesure la concentration des sels dissous (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates), elle s'exprime le plus souvent en [g/l]. La salinité peut être différente d'une mer à une autre. Les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles ou dans les zones de fort apport d'eau douce.

La salinité augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des tropiques. Dans certaines zones telles que l'Arabie Saoudite, elle peut dépasser 45g/l. Ceci est dû aux faits que les eaux sont peu profondes et que la chaleur est excessive, ce qui favorise l'évaporation donc la concentration en sels. À titre d'exemple, citons quelques valeurs moyennes de salinité (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

- océan Atlantique : 35g/l ;
- mer Méditerranée : 38g/l ;
- mer Rouge : 40g/l ;
- Golfe Persique : 46g/l.

Dans le *tableau I.1*, nous avons la composition moyenne d'une eau de mer

**Tableau I.1** : Composition standard de l'eau de mer (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

Cations	Quantité [mg/l]	Anions	Quantité [mg/l]
Sodium	11035	Chlorures	19841
Magnésium	1330	Sulfates	2769
Calcium	418	Bicarbonates	146
Potassium	397	Bromures	68
Strontium	14	Fluorures	1,4
<b>Salinité totale : 36,047g/l</b>			

En analysant la répartition des ions principaux, nous notons que le chlorure de sodium (NaCl) représente 85% de la salinité totale, ce qui est tout à fait normal. Mais la présence des ions bicarbonates, calcium et sulfates n'est pas de bon augure. En effet, ces ions peuvent, sous certaines conditions de température, de concentration et de pH, causer l'entartrage du dispositif utilisé. Un choix judicieux de la température et du pH peut, dans une certaine mesure, limiter ce phénomène d'entartrage qui, du reste, demeure inévitable.

Pour les eaux saumâtres, leurs salinités sont inférieures à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre.

Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés.

Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le  $\text{CaCO}_3$ , le  $\text{CaSO}_4$ , le  $\text{MgCO}_3$  et le  $\text{NaCl}$ .

### **I.2.2. La température**

Le deuxième paramètre qui caractérise une eau de mer est sa température. Notons que ce sont les courants polaires qui influent sur la température des mers et des océans. Au niveau de la péninsule arabique la température de l'eau de mer peut atteindre  $35^\circ\text{C}$ . La température influence beaucoup plus les systèmes fonctionnant par RO que ceux fonctionnant par distillation à détente successive. En effet, la production des membranes augmente d'environ 3% par degré Celsius. En contrepartie, la qualité de l'eau produite diminue et le vieillissement de la membrane s'accélère. L'expérience montre que l'optimum se situe autour de  $25^\circ\text{C}$ . C'est pour cela que la capacité d'une unité d'osmose inverse (RO) devrait s'exprimer toujours pour une température donnée.

### **I.2.3. La teneur des matières en suspension (MeS)**

La troisième caractéristique d'une eau de mer est sa teneur en MeS. En effet, en plus des organismes vivants souvent microscopiques, l'eau de mer transporte des matières minérales telles que les sédiments et les morceaux de coquillage : il s'agit des MeS. De plus, la pollution par les rejets urbains et industriels ne peut pas, surtout de nos jours, être négligée. Pour toutes ces raisons, le site de la prise d'eau et sa conception seront choisis afin de minimiser toute pollution et éviter, quand cela est possible, les zones à forte teneur en matières en suspension.

Certes les membranes d'osmose arrêtent parfaitement toutes les matières en suspension mais cela se fait en provoquant leur colmatage diminuant ainsi leur taux de conversion. Pour conserver son efficacité, il est impératif d'alimenter les membranes avec une eau de mer aussi limpide que possible : c'est le but du prétraitement. Quand à la technique de distillation, elle est moins sensible aux matières en suspension, de ce fait, elle ne nécessite qu'un tamisage (0.5 à 2 mm) afin de protéger les pompes et les différents échangeurs.

Le contrôle de ses trois paramètres nous permet d'optimiser les installations de dessalement pour la production d'eau douce. Dans ce qui suit, nous allons définir ce qu'est une eau potable.

### I.3. QUALITE DE L'EAU POTABLE

Une eau potable est une eau qui peut être bue sans aucun danger pour la santé humaine. Partant de ce principe, les différents pays ont établis des normes de potabilité. Ces normes sont variables d'un pays à un autre. Pour l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) les critères de potabilité d'une eau donnée sont classés comme suit (*voir tableau I.2*) :

- l'aspect physique : température, limpidité, odeur, teneur en matières en suspension (MeS) ;
- les caractéristiques chimiques : salinité, chlorures, pH etc.

La salinité doit être inférieure ou égale à 1000 mg/l et les chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/l. Même si la salinité demeure le facteur le plus important, dans certains cas les teneurs en Bore (B), en Bromure (Br) et en métaux lourds tels le mercure (Hg) et le plomb (Pb) dépassent les limites autorisées par les normes. Dans ce cas, un post-traitement devient alors obligatoire. Ce dernier peut aussi devenir nécessaire pour diminuer l'agressivité de l'eau soit en corrigeant le pH soit en ajoutant une certaine quantité de chaux : on parle alors de reminéralisation.

**Tableau I. 2.** Les normes de potabilité selon l'OMS (OMS, 2013).

Elément/substance	Symbole /formule	Lignes directrices fixées par l'OMS
Turbidité	-	Non mentionnée
Dureté	mg/l CaCO <sub>3</sub>	200 ppm
TDS (total des solides dissous)	-	Pas de valeur guide mais optimum en dessous de 1000 mg/l
pH	-	Pas de valeur guide mais un optimum entre 6.5 et 9.5
Aluminium	Al	0,2 mg/l
Ammonium	NH <sup>4+</sup>	Pas de contraintes
Antimoine	Sb	0.02 mg/l
Arsenic	As	0,01 mg/l

Suite tableau I.2.

Baryum	Ba	0,7 mg/l
Bore	B	0.5mg/l
Cadmium	Cd	0,003 mg/l
Chlore	Cl	Pas de valeur mais on peut noter un goût à partir de 250 mg/l
Chrome	Cr <sup>+3</sup> , Cr <sup>+6</sup>	chrome total : 0,05 mg/l
Cuivre	Cu <sup>2+</sup>	2 mg/l
Cyanure	CN <sup>-</sup>	0,07 mg/l
Fluorure	F <sup>-</sup>	1,5 mg/l
Sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S	0.05 à 1 mg/L
Fer	Fe	Pas de valeur guide
Plomb	Pb	0,01 mg/l
Manganèse	Mn	0,4 mg/l
Mercure	Hg	inorganique : 0,006 mg/l
Molybdène	Mb	0,07 mg/l
Nickel	Ni	0,07 mg/l
Nitrate et nitrite	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	50 et 3 mg/l (exposition à court terme) 0.2 mg/l (exposition à long terme)
Sélénium	Se	0,01 mg/l
Argent	Ag	Pas de valeur guide
Sodium	Na	Pas de valeur guide
Sulfate	SO <sub>4</sub>	500 mg/l
Étain inorganique	Sn	Pas de valeur guide : peu toxique
Uranium	U	0.015 mg/l
Zinc	Zn	3 mg/l

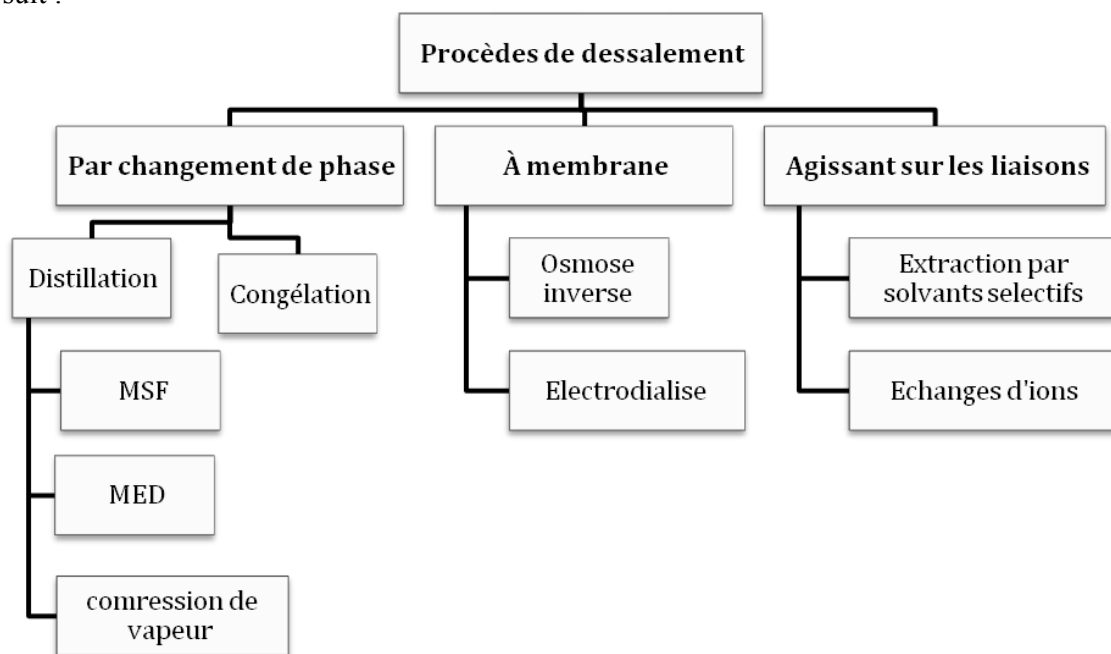
#### I.4. LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT DES EAUX

Il a été recensé 27 procédés différents de dessalement. Ces procédés peuvent être classés en trois grandes familles :

- Les procédés de distillation et de congélation ;
- Les procédés membranaires ;
- Échanges d'ions et extraction par solvant sélectif.

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

On peut classer les méthodes de dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres comme suit :



**Figure I.1** : principales techniques de dessalement

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

1. une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
2. un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
3. le procédé de dessalement lui-même,
4. le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

À l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

## **I.5. LES PROCÉDES DE DISTILLATION**

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

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet, pour transformer un kg d'eau liquide en un kg d'eau vapeur à température constante, il faut environ 2250 kilojoules. Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

### **I.5.1. Distillation à simple effet**

C'est un principe qui reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans un premier temps, l'eau de mer est portée à ébullition au contacte d'un premier serpentin dans lequel circule un fluide caloporteur (*voir figure. I.2*). Par le biais d'un second serpentin dans lequel circule de l'eau de mer froide, la vapeur ainsi produite se condense. Les sels dissouts n'étant pas vaporisables dans les mêmes conditions que l'eau, la vapeur ainsi obtenue est constituée d'eau pure.

Pour limiter au mieux l'entartrage en n'utilisant qu'un traitement antitartre simple, les constructeurs fixent la température maximale de ce procédé entre 60 et 65 °C. De plus, de telles températures limitent considérablement la corrosion.

Par cette méthode, on peut même obtenir une eau condensée très pure (jusqu'à 1 mg/L de sels) à l'aide de dispositifs spéciaux (filtres à gouttelettes) installés au-dessus de la zone de vaporisation.

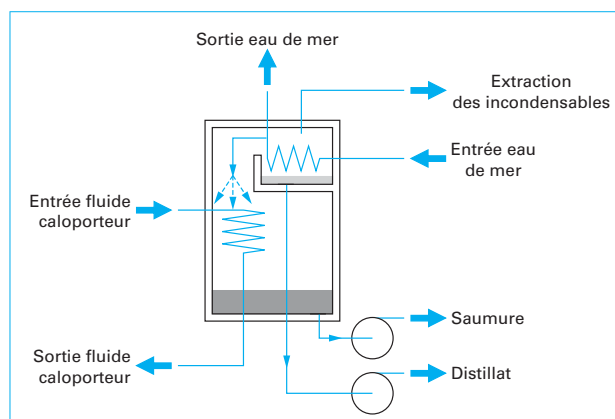


Figure I.2. Distillation à simple effet (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

### I.5.2. Distillation à effets multiples :

C'est un dispositif constitué par la juxtaposition de  $n$  cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (voir figure. I.3).

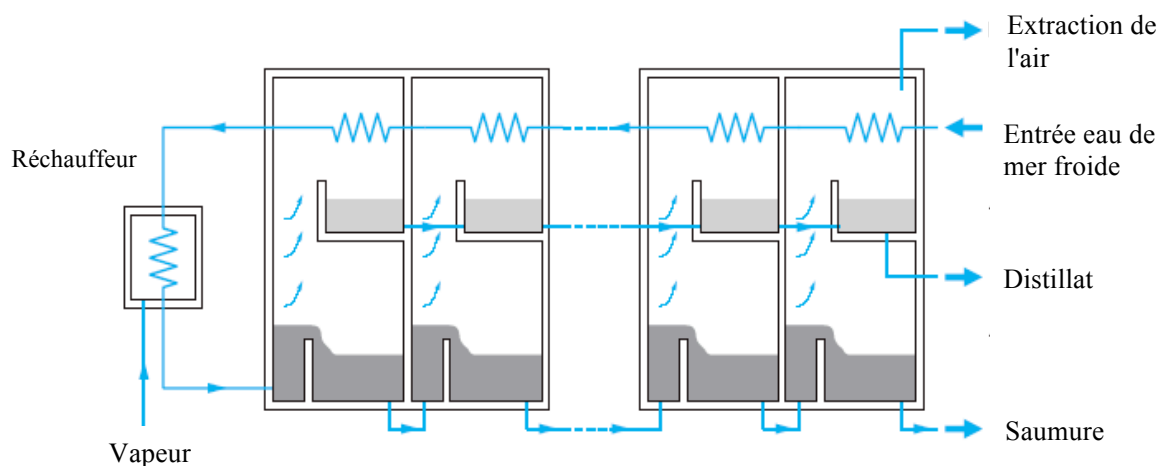


Figure I.3: Schéma de principe d'un système de Distillation par détentes successives (MSF) (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

Le fluide caloporteur porte à ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, qui est aussi la cellule où règne la plus haute température et donc la plus haute pression. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où le condenseur maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise une fraction de l'eau de mer présente dans cette deuxième cellule : c'est le deuxième effet.

Pour évaluer la consommation thermique de ce procédé, on supposera que  $n$  étant le nombre d'effets et  $D$  la production d'eau douce des  $n$  cellules, la production de chaque cellule est égale à  $D/n$ . Par ailleurs, on négligera les pertes thermiques. Dans ces conditions et en reprenant les symboles de la distillation à simple effet, la consommation d'énergie de la distillation à effets multiples est réduite à :

$$Q = k D_{cp} \Delta t + D \cdot \frac{r}{n} \quad (I.1)$$

$$Y = \frac{Q}{D} = k c_p \Delta t + \frac{r}{n} \quad (I.2)$$

Cette équation montre que la consommation d'énergie est presque égale à celle de la distillation simple, divisée par le nombre d'effets. En d'autres termes, le GOR (rapport de la masse d'eau douce sur celle de la vapeur) est presque égal au nombre d'effets. On a tendance donc à choisir le nombre d'effet le grand possible. Mais, vu l'augmentation des coûts d'investissement, on constate que l'optimum est vite atteint pour des  $n$  de 3 à 10.

La température maximale de fonctionnement d'un tel procédé se situe entre 60 et 65°C. Pour réchauffer l'eau de mer à l'intérieur de chaque cellule, on dispose de plusieurs méthodes :

- Échangeur immergé ;
- Échangeur à tubes verticaux ;
- Échangeur à tubes horizontaux.

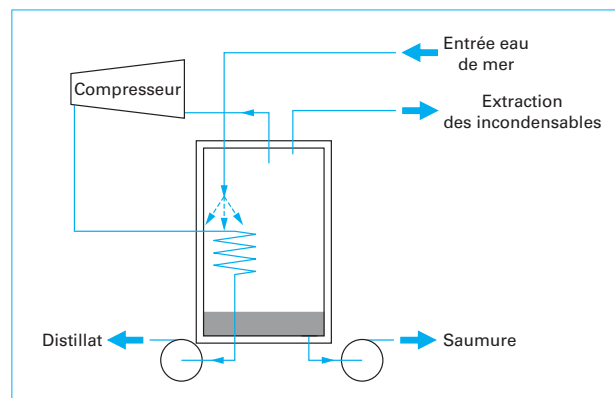
La mise en marche de ce type d'unités est rapide. De plus, ces unités ont une certaine souplesse de fonctionnement qui permet d'adapter la production d'eau douce à la demande.

### I.5.3. Multi-effets avec compression de vapeur

#### I.5.3.1. Compression mécanique de la vapeur

Pour améliorer la technique MED, on peut comprimer la vapeur produite et l'utiliser comme fluide caloporteur. Cette compression peut être mécanique ou thermodynamique.

Dans une cellule de distillation, on constate que l'enthalpie de la vapeur émise est peu différente de celle utilisée pour le chauffage, d'où l'idée de comprimer la vapeur émise et de s'en servir comme fluide chauffant (*voir figure I.4*). Ce procédé fonctionne uniquement avec de l'énergie électrique. Cependant, on peut lui associer un échangeur thermique pour récupérer d'éventuelles calories « basses températures » disponibles sur le site. On réchauffera ainsi à peu de frais l'eau de mer avant son admission dans l'évaporateur. La puissance nominale de ce compresseur est de l'ordre de 300 kW pour une unité capable de produire 600 m<sup>3</sup>/j. On comprend que ce procédé soit limité aux petites unités dans une fourchette de 100 à 1000 m<sup>3</sup>/j. On retiendra également que les meilleurs rendements sont obtenus au-dessus de 200 m<sup>3</sup>/j pour alimenter des « petites communautés » telles que centres de vacances, îles, plates-formes offshore, et aussi certaines applications industrielles.



**Figure I.4.** Compression mécanique de vapeur à un seul effet (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

#### I.5.3.2. Thermo compression de la vapeur

Dans ce cas, la vapeur produite par la cellule la plus froide est comprimée par un éjecteur à vapeur. Plus la pression de la vapeur motrice est élevée, plus l'enthalpie du mélange sortant est importante. Pour évaluer l'avantage de ce procédé, examinons le cas d'une unité comprenant quatre effets (*voir figure I. 5*).

L'éjecteur introduit la vapeur dans la cellule la plus chaude. Elle se condense à l'intérieur du faisceau de tubes du fait du ruissellement d'eau de mer froide à l'extérieur. La condensation dégage la chaleur nécessaire à l'évaporation d'une partie de l'eau de mer.

La vapeur émise est transférée dans la deuxième cellule où elle se condense à son tour tout en évaporant un deuxième volume d'eau de mer. Le phénomène se reproduit dans la troisième et la quatrième cellule. À la sortie de la dernière cellule, une partie de la vapeur est condensée pour servir d'appoint à la chaudière. Le complément est recyclé après compression par l'éjecteur.

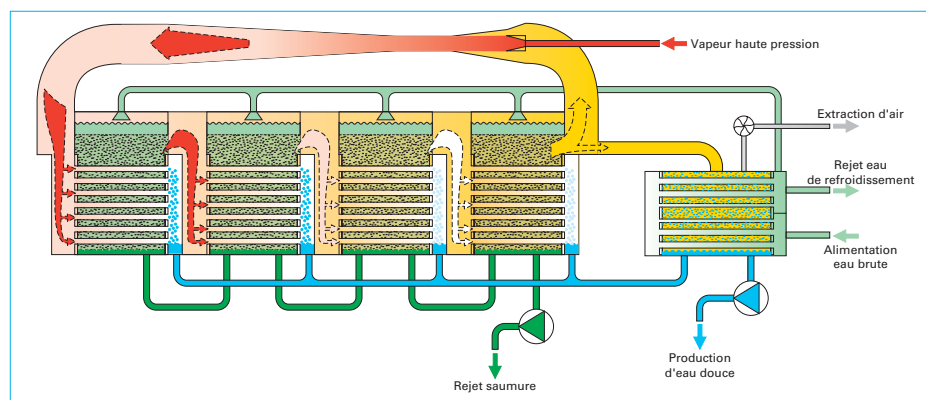


Figure I.5. Thermo compression à quatre effets (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

### I.5.3.2.1. Les avantages de la thermo compression

- à consommation de vapeur égale, une installation à multiples effets sans thermo compression produirait deux fois moins d'eau douce ;
  - la pression de la vapeur motrice de l'éjecteur peut être choisie sur une large gamme de pression de 1,5 à 45 bars ;
  - une unité à détentes successives aurait 16 à 20 étages pour obtenir le même rendement.
- Ces avantages expliquent le succès de cette technique, de nos jours, elle est utilisée dans des unités produisant 50 à 20 000 m<sup>3</sup>/j (voir figure I.6).



(a) vue latérale d'une unité



(b) vue aérienne des deux unités

**Figure I.6.** Dessalement par distillation à effet multiple et compression de vapeur à Tripoli, Libye  
(*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

#### **I.5.4. Le procédé de distillation par détentes successives (Multi-Stage Flash distillation MSF)**

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de  $120^{\circ}\text{C}$ , elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée « Flash ». Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

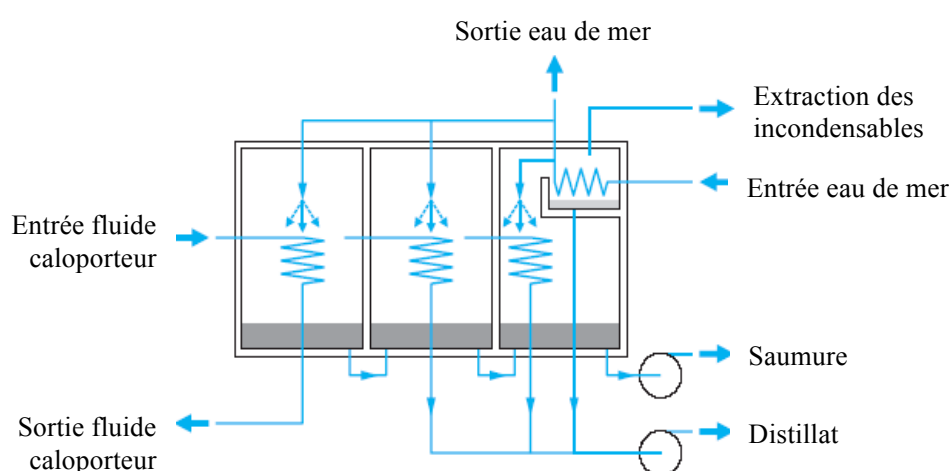
Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à  $120^{\circ}\text{C}$ , l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur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

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique (cogénération).

Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer. Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> d'eau dessalée par jour.

### I.5.5. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effects Distillation MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1<sup>er</sup> effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2<sup>ème</sup> effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2<sup>ème</sup> effet et ainsi de suite (voir figure I.7).



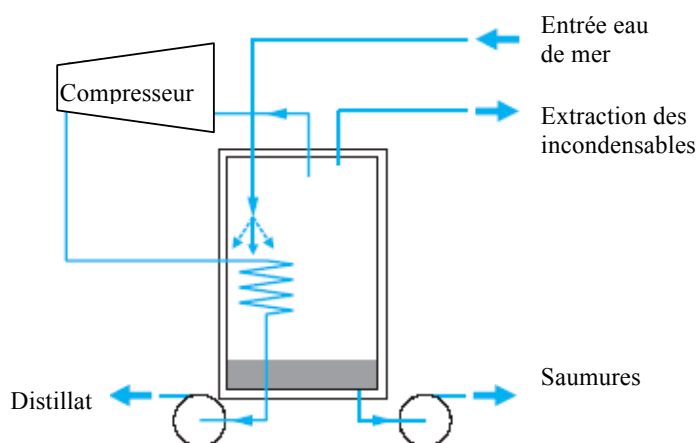
**Figure I.7:** Schéma de principe de la distillation à multiple effet (MED) (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite).

### I.5.6. La distillation par Compression de Vapeur (VC)

Son principe est celui d'une pompe à chaleur, l'eau de mer est évaporée après avoir été préchauffée dans un échangeur récupérateur de chaleur. La vapeur d'eau produite est compressée après avoir été débarrassée, par un séparateur, des gouttelettes entraînées.

Sa pression ayant été élevée, la vapeur se condense alors à une température supérieure à celle qui règne dans l'évaporateur ; grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée et le cycle d'évaporation condensation de l'eau douce est extraite ainsi que la saumure (voir figure I.8).



**Figure I.8** : schéma de principe de la compression de la vapeur (*Techniques de l'Ingénieur, 2010*).

### 1.5.7 Avantages de la Distillation

La production est de bonne qualité car, en théorie, on obtient de l'eau pure (eau distillée). En fait, il y a toujours des entraînements des gouttelettes dans la vapeur, si bien que l'eau condensée présente une salinité comprise normalement entre 20 et 80 mg/L. Ces valeurs sont très inférieures aux recommandations de l'OMS. Le distributeur d'eau a donc toute latitude pour reminéraliser l'eau en fonction des conditions locales : ajout de réactifs et/ou dilution avec de l'eau saumâtre (blending).

Mais en prévoyant des aménagements spéciaux (séparateurs de gouttelettes) dans les cellules de distillation, on obtient une eau dont la salinité est inférieure à 10 mg/L. La consommation d'énergie est relativement faible et est indépendante de la salinité de l'eau de mer.

Hormis le cas de la compression mécanique de vapeur, la distillation utilise de l'énergie thermique sans spécification très stricte. On peut donc récupérer de la chaleur souvent considérée comme « perdue » telles que :

#### ***1.5.7.1 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 1 000 kW pourra fournir 230 m<sup>3</sup>/j d'eau douce. Ce type d'unité équipe les navires et les communautés isolées vivant dans des îles.

#### ***1.5.7.2. Couplage avec une turbine à gaz***

Dans ce cas, une chaudière récupère la chaleur des gaz de combustion de la turbine et produit la vapeur nécessaire au fonctionnement de l'unité de distillation, La production prévisible est de 500 à 1 000 m<sup>3</sup>/j d'eau douce pour 1 000 kW d'énergie électrique produite.

#### ***1.5.7.3. Couplage avec 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 1 000 m<sup>3</sup>/j d'eau douce pour 1 000 kW d'énergie électrique produite.

Il est à noter que la technique de distillation nécessite un prétraitement dont :

- **La chloration** : dès la prise d'eau en mer, il faut bloquer la tendance à la prolifération des organismes vivants par injection de chlore sous diverses formes,
- **La filtration de l'eau de mer** pour protéger les pompes et assurer le bon fonctionnement des pulvérisateurs. Son objectif est de retenir toutes les matières de dimension supérieure à 0.5 mm,
- **L'antitartre** : la distillation favorise, malheureusement, la précipitation du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

Ce sel a tendance à se déposer sur la paroi des échangeurs réduisant ainsi la vitesse de transfert de chaleur. Pour éviter ce désagrément, les ingénieurs ont optés pour trois solutions :

- 1- Prévention par addition d'un inhibiteur d'entartrage ;
- 2- Prévention par décomposition des bicarbonates ;
- 3- Entretien par lavage périodique à l'acide ;
- 4- Détartrage physique.

### **I.5.8. PROCÉDE DE CONGELATION**

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 salée. Ce procédé est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau de mer est 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 la saumure, lavés du sel puis fondus : on obtient de l'eau douce (*Maurel et al, 2001*).

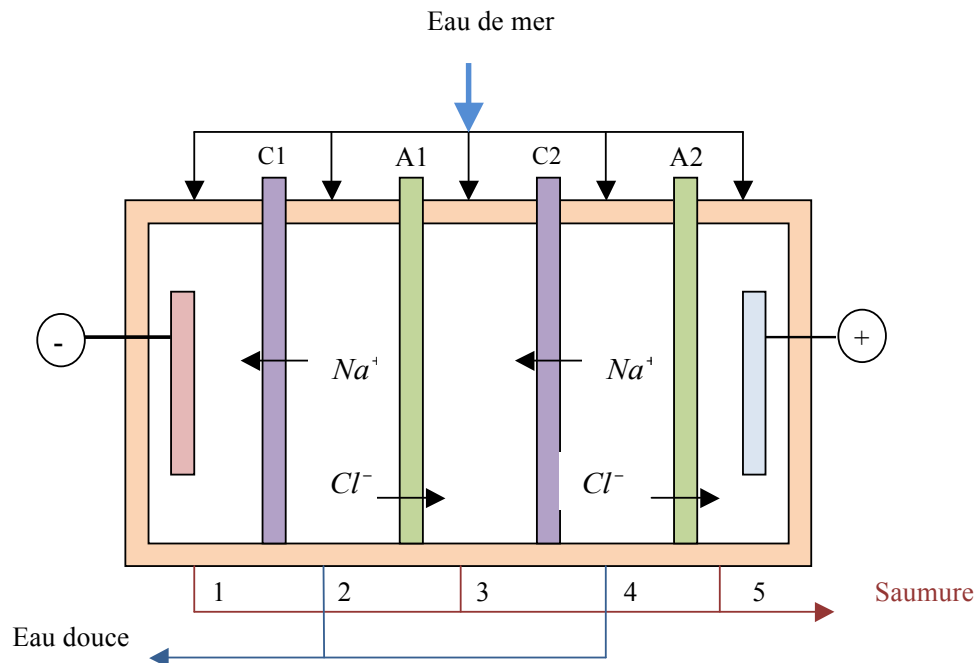
### **I.6. PROCÉDES MEMBRANAIRES**

Les techniques de séparation par membranes constituent une révolution dans le domaine du traitement de l'eau. Leur principe consiste non plus à éliminer chimiquement les microorganismes mais à les extraire physiquement. Elles n'utilisent aucun réactif chimique, sauf pour leur entretien. Très fiable, elles permettent de produire une eau très pure et de qualité constante (*Maurel et al, 2001*).

#### **I.6.1. Dessalement par électrodialyse**

L'électrodialyse est une technique électro - membranaire qui permet le transfert des ions à travers des membranes à perméabilité sélective. Le but de l'opération est d'extraire les sels d'une solution, d'où on obtient alors, d'un côté une solution saumure très concentrée et de l'autre une solution dessalée (*voir figure I.9*).

Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes, les ions  $Na^+$  sont attirés vers l'électrode négative et les ions  $Cl^-$  vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes seuls les ions  $Na^+$  peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et seuls les ions  $Cl^-$  peuvent traverser les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments.



**Figure I.9:** Unité d'électrodialyse alimentée en parallèle.

### I.6.2. L'Osmose Inverse (RO)

L'osmose est un processus physique naturel qui peut être observé dans la nature. Quand une membrane semi-perméable est placée entre deux solutions de concentrations moléculaires en sel différentes et à la même pression, une diffusion à travers cette membrane se produit à partir de la solution de salinité inférieure vers la solution la plus concentrée, cette diffusion se produit grâce à la pression osmotique naturelle qui, pour une eau à 35 g/l de salinité, peut être égale à 24,1 Bar (voir figure I.10 a). L'osmose peut donc être définie comme étant le transfert de l'eau (en tant que solvant) à travers une membrane sous l'action d'un gradient de concentration moléculaire. La pression osmotique  $\pi$  est telle que :

$$\pi = C.R.T \text{ [Bar]} \quad (I.3)$$

Avec :  $\pi$  = pression osmotique ;

$C$  = concentration ionique [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ] ;

$R$  = constante des gaz parfaits [ $8,314 \text{ J}/\text{mol}/\text{K}$ ] ;

$T$  = température [K].

La pression osmotique transmembranaire différentielle est telle que :

$$\Delta\pi_{tm} = \frac{(\pi_{pure} - \pi_c)}{2} - \pi_p \quad (I.4)$$

Avec :  $\pi_{pure}$  = pression de l'eau pure ;

$\pi_c$  = pression de la solution concentrée ;

$\pi_p$  = pression du perméat.

Mais, si une pression externe, supérieure à la pression osmotique, 50 à 75 Bar, est appliquée à la solution concentrée, le phénomène physique appelé « osmose inverse » se produit : l'eau fraîche s'écoule dans le sens opposé au processus naturel, laissant derrière elle la solution salée avec une concentration qui ne cesse de s'accroître (voir figure I.10 b, c).

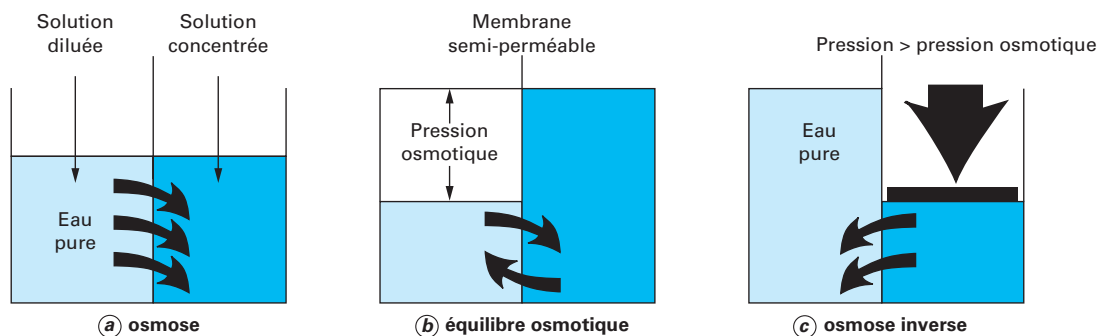
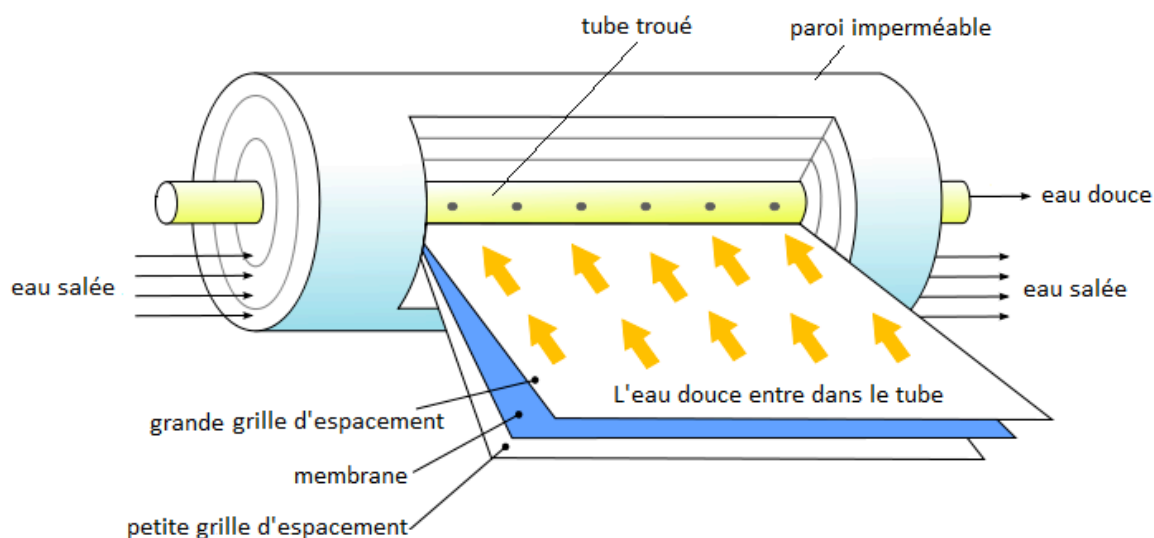


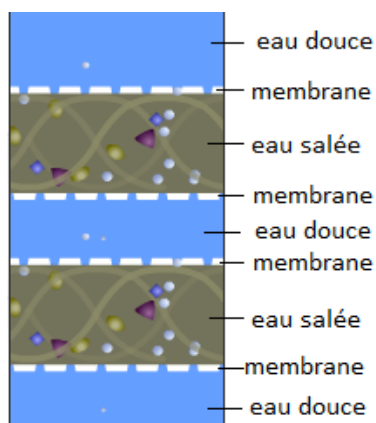
Figure I.10. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse (Techniques de l'Ingénieur, 2010).

L'osmose inverse a été découverte en 1950 par Reid à l'Université de Floride (États-Unis). Son développement s'est fait grâce à la découverte, vers 1960, par Loeb et Sourirajan d'un nouveau type de membrane à structure asymétrique : les membranes TFC. De telles membranes, sont très fines, 100 à 200  $\mu\text{m}$ . Ce qui leur donne un avantage certain puisque la perméabilité d'une membrane est inversement proportionnelle à son épaisseur. C'est ce qui a permis, en 20 ans, d'augmenter le taux de rejet de 98.6 à 99.6%. De plus, le prix a beaucoup baissé au cours des 20 dernières années, passant de 40  $\$/\text{m}^2$  à 9  $\$/\text{m}^2$ .

Pour être utilisées les membranes sont montées dans des modules pressurisés (vessels en anglais) de différents types, modules tubulaires, modules fibres creuses, modules plans et modules spirales. C'est ce dernier type qui s'est imposé dans le dessalement avec 95% du marché mondial (voir figure I.11)



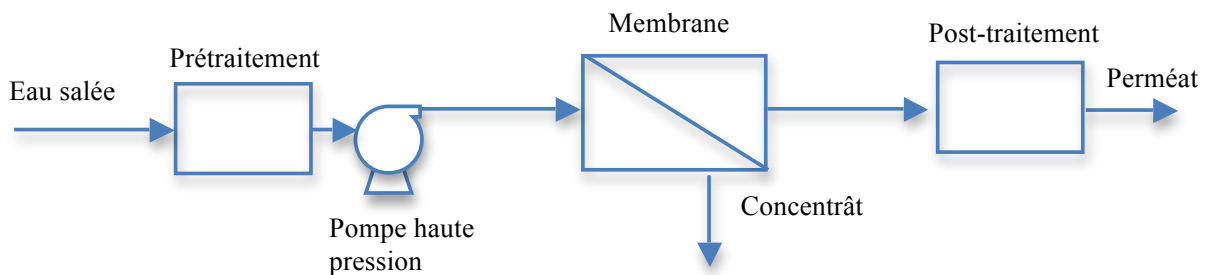
**Figure I.11:** Schéma d'un module spirale  
(Techniques de l'Ingénieur, 2010).



**Figure I.12 :** Principe de dessalement par membrane d'osmose inverse  
(Techniques de l'Ingénieur, 2010).

Le principe de fonctionnement est le suivant : l'eau d'alimentation (feed water) constituée d'eau de mer, est pompée dans un récipient fermé (vessel). Là, une pompe à haute pression fournit la pression nécessaire (60 à 80 bar) pour permettre à une partie de cette eau d'alimentation de passer à travers la membrane (perméat ou eau douce) provoquant ainsi la rejection des sels.

L'eau d'alimentation est ainsi mise sous pression contre la membrane qui est enroulée en spirale dans un module normalisé (voir figure I. 12). Comme seulement une partie de l'eau traverse la membrane (perméat), l'eau restante, à cause de la réjection des sels, voit sa teneur en sel augmentée, elle est alors évacuée sans passer à travers la membrane : c'est ce qu'on appelle le rétentat ou la saumure (eau salée ou brine) (voir figure I.13).



**Figure I.13** : principe de fonctionnement de l'osmose inverse

La capacité de production moyenne de ce procédé est d'environ 6 000 m<sup>3</sup>/j et la capacité maximale en service est de 500.000 m<sup>3</sup>/j à Magtaa, Mostaganem (Algérie) : elle constitue la plus grande usine de dessalement au monde utilisant la technique RO.

Les membranes sont denses et n'ont pas de pores, leur seuil de coupure est de 10<sup>-7</sup>mm (0.1 nm), ce qui fait de ce procédé le seul qui permette la rétention des ions et donc également des antibiotiques, des virus ou des bactéries types Escherichia Coli (1 µm) et même les métaux lourds comme le mercure (Hg).

La pression opératoire est supérieure à 30 bars avec un maximum d'environ 80 bars, les membranes ne résistant pas à des pressions supérieures. Plus précisément, cette pression va de 17 à 22 bar pour l'eau saumâtre et de 52 à 69 bar pour l'eau de mer.

Dans le procédé d'osmose inverse (RO) pour le dessalement de l'eau de mer, environ 40 à 45% de l'eau d'alimentation est récupéré en tant qu'eau douce (perméat) : il s'agit du taux de conversion (Recovery). Les 55-60% restants (saumure) sont rejetés dans la mer à une pression légèrement inférieure à la pression qu'ils avaient avant d'entrer dans le module. C'est



### I.6.2.1. Les principales caractéristiques d'une installation d'osmose inverse

#### I.6.2.1.1. Le taux de conversion Y

C'est la fraction du débit qui traverse réellement la membrane, il est tel que :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_{al}} [\%] \quad (I.5)$$

Avec

$Q_p$  = débit du perméat ;

$Q_{al}$  = débit d'alimentation.

D'une façon générale, l'ordre de grandeur de ce facteur est tel que :

- de 35 à 45% pour une eau de mer (30,0 à 50,0 g/l) ;
- de 65 à 85% pour une eau saumâtre (0,1 à 10,0 g/l).

Il est à noter que le débit du perméat à travers la membrane augmente avec la température d'environ 3% par degré Celsius. Ce même débit diminue avec l'augmentation de la concentration.

#### I.6.2.1.2. La sélectivité de la membrane

Elle est définie comme étant le taux de rétention que cette membrane est censée retenir, elle est telle que :

$$TR = \frac{C_0 - C_p}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0} [\%] \quad (I.6)$$

Avec :

$C_0$  : concentration de l'espèce (NaCl pour notre cas) à retenir dans la solution;

$C_p$  : concentration de la même espèce dans le perméat.

Notons que la sélectivité diminue avec une augmentation de la concentration. Quand cette concentration atteint la limite de solubilité des sels, un colmatage se produit dû justement à la précipitation de ces sels ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$  par exemple) ;

**I.6.2.1.3. La pression transmembranaire différentielle**

Elle est définie par la formule suivante :

$$\Delta P_{tm} = \frac{P_{al} + P_{sau}}{2} - P_p [Bar] \quad (I.7)$$

Avec  $p_{al}$  = pression d'alimentation ;

$p_{sau}$  = pression de la saumure ;

$p_p$  = pression du perméat.

Elle s'écrit aussi :

$$\Delta P_{tm} = \frac{Q}{A} + \Delta \pi_{tm} [Bar] \quad (I.8)$$

Avec

Q = flux du perméat et ;

A = coefficient de transport de l'eau.

**I.6.2.1.3. La pression de travail**

Elle est telle que :

$$\Delta P_{tr} = \Delta P_{tm} - \Delta \pi_{tm} [Bar] \quad (I.9)$$

**I.6.2.1.4. Le flux du perméat**

La production d'eau douce est caractérisée par le flux du perméat qui s'exprime comme suit :

$$Q = (\text{débit de production})/S \quad [l/h/m^2]$$

S étant la surface de la membrane.

D'une façon générale, l'ordre de grandeur de ce facteur est tel que :

- de 10 à 18 l/h/m<sup>2</sup> pour une eau de mer (30,0 à 50,0 g/l) ;
- de 15 à 25 l/h/m<sup>2</sup> pour une eau saumâtre (0,1 à 10,0 g/l).

**I.6.2.1.4. la perméabilité de la membrane,  $L_p$ ,**

Elle s'exprime en [l/h/m<sup>2</sup>/bar], elle est telle que :

$$L_p = \frac{Q}{\Delta P_{tr}} \quad (I.10)$$

Pour mesurer l'efficacité d'une installation de dessalement il est bon de savoir quel est le taux de réjection des sels, il est tel que :

$$R_{sels} = 1 - \frac{C_p}{C_{al}} [\%] \quad (I.11)$$

Avec

$c_p$  = concentration du perméat ;

$C_{al}$  = concentration de l'eau d'alimentation .

On en déduit le taux de passage des sels qui est tel que :

$$P_{sels} = 1 - R \quad [\%]$$

**I.6.2.2. Avantages et contraintes de l'osmose inverse :**

*Parmi les avantages de l'Osmose Inverse, on notera :*

1- le procédé est totalement modulaire, les grandes unités regroupent plusieurs dizaines de milliers de modules. La production sera donc très souple et s'adaptera facilement à la demande ;

2- n'utilisant que de l'énergie électrique, l'osmose est le procédé le moins énergivore des procédés de dessalement (3 à 5 kWh/m<sup>3</sup> tout compris dont 2,8 à 3,5 par le poste d'osmose proprement dit). Cette consommation varie avec la température et la salinité de l'eau.

3- la salinité du perméat avant reminéralisation est de l'ordre de 200 à 300 mg/L (plus élevée que celle d'un distillateur : 10 à 30 mg/L) et des systèmes à deux passes peuvent être nécessaires pour obtenir de meilleures salinités totales ou pour limiter, dans l'eau produite, la teneur en ion particulier tel que le bore. Lorsqu'une 2<sup>ième</sup> passe est requise, celle-ci peut n'être que partielle et de toute façon constituée de modules « eau saumâtre » exploités à basse pression (8-15 bar), c'est là un avantage certain.

# **Chapitre II**

## **Dessalement et énergies renouvelables**

## II.1. INTRODUCTION

Avec la demande mondiale en énergie sans cesse croissante, beaucoup de recherches se sont orientées pour relever le challenge d'utiliser les énergies renouvelables tant pour des fins commerciales que domestiques. Le côté économique des énergies renouvelables (tels que, la géothermie, le solaire, la houle, l'éolien.), l'importance de leur potentiel et leurs avantages écologiques sont mis en exergue dans plusieurs études récentes (*Cataldi et al, 1999 ; Huang, 2010 ; Lund, 2007 ; Mahmoudi et al, 2010 ; Serpen et al, 2010 ; Stefanson, 2005*).

Comme le montre le *tableau II.1*, le système énergétique mondial actuel est dominé par les combustibles fossiles. Au cours des 40 dernières années, les sources d'énergie renouvelables n'ont été utilisées qu'à hauteur de 13% seulement de la consommation mondiale totale d'énergie. À ce stade on peut se poser les questions suivantes :

« Pour combien de temps encore cette tendance peut-elle continuer sans que l'on se heurte à des contraintes, sous forme de réserves limitées, ou de tarissement, des combustibles fossiles ? »

De plus, c'est le CO<sub>2</sub> et le méthane CH<sub>4</sub> qui se dégagent qui sont à l'origine du changement climatique mondial et de la pollution de l'air. « Jusqu'à quand allons-nous ignorer ces graves problèmes environnementaux provenant de leur combustion ? »

**Tableau II.1.** La consommation mondiale d'énergie primaire en Exa Joules (EJ), 1970-2006

(D'après Moriarty et Honnery, 2009).

En décrivant les budgets nationaux ou mondiaux de l'énergie, il est courant d'utiliser des unités à grande échelle basées sur l'Exa Joules; 1EJ = 10 <sup>18</sup> J.					
Source d'énergie	1900	1980	1990	2000	2006
Charbon	64.2	75.7	93.7	98.2	129.4
Pétrole	94.4	124.6	136.2	148.9	162.9
Gaz naturel	38.1	54.9	75.0	91.8	107.8
<b>Total</b>	<b>196.7</b>	<b>255.1</b>	<b>305.0</b>	<b>339.0</b>	<b>400.1</b>
Nucléaire	0.7	6.7	19.0	24.5	26.6
Renouvelables	29.4	37.6	48.5	55.6	66.2
Toute énergie	216.8	299.5	372.4	419.0	492.9
<b>Renouvelables [%]</b>	<b>13.6</b>	<b>12.6</b>	<b>13.0</b>	<b>13.3</b>	<b>13.4</b>

Le couplage des sources d'énergies renouvelables (ER) avec les systèmes de dessalement est très prometteur pour les régions limitées en eau potable telle que la région MENA (Middle East and North Africa) (*Goosen et al, 2010, 2011; Goosen et Shayya, 1999; Khamis, 2009; Mahmoudi et al, 2008, 2010; Misra, 2010; Serpen et al, 2010; Stock Trading, 2010; Tester et al. , 2007*).

Les systèmes de dessalement axés sur les énergies renouvelables se répartissent en deux grandes catégories (*voir figure II.1*):

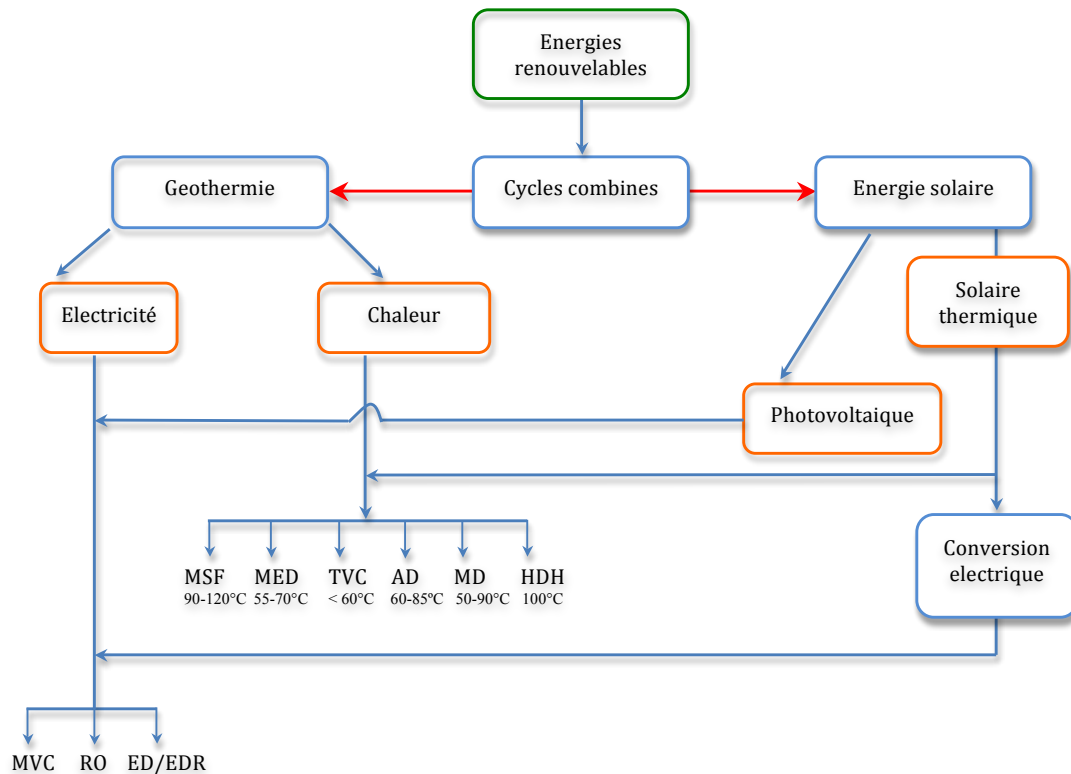
La première comprend les procédés de distillation suivants:

- Le Multi Étapes Flash (MSF),
- le Multi-Effet de Distillation (MED),
- la Compression de Vapeur thermique (TVC)

Tandis que la seconde comprend :

- Les techniques membranaires (Exemple : l'osmose inverse (O.I)),
- l'électrodialyse (ED) et,
- des procédés de distillation (mécanique par compression de vapeur (MVC)) entraînée par l'électricité ou l'énergie mécanique produite par le Système d'Énergie Renouvelable (RES).

En outre, les systèmes hybrides donnent également des résultats très prometteurs avec, par exemple, de la saumure géothermique utilisée directement dans la technologie de distillation par membrane (*Houcine et al, 1999*). Un autre exemple du système hybride, l'eau saumâtre souterraine géothermique a été utilisée pour alimenter un alambic solaire installé dans le sud de l'Algérie (*Bouchekima, 2003*).

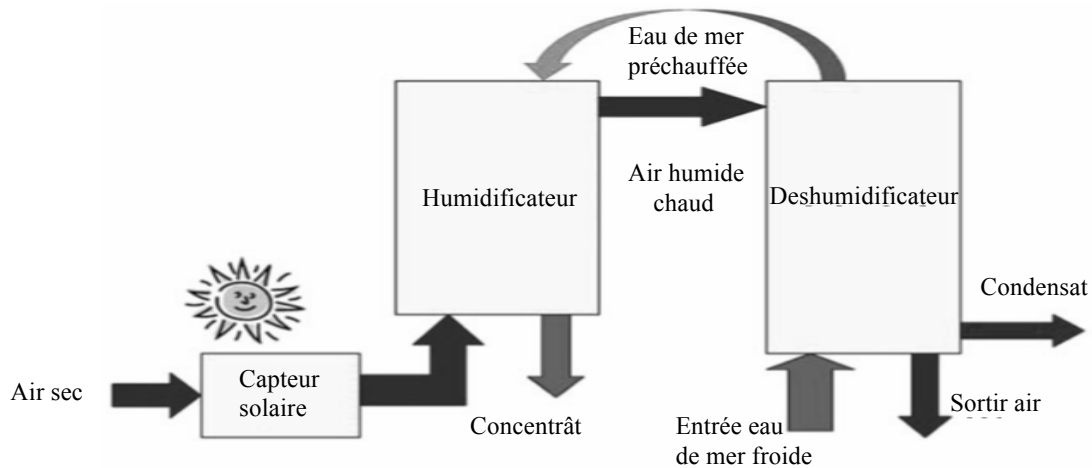


**Figure II.1:** Les différentes combinaisons possibles entre les sources d'énergie renouvelables avec les procédés de dessalement conventionnelles et innovantes (Ghaffour et al, 2014).

## II.2. APPLICATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS LE DESSALEMENT

### II.2.1. Introduction

Pour plus de sécurité, les éoliennes ainsi que le système de dessalement peuvent être reliés au réseau (Eltawil et al, 2009). L'usine de dessalement de Kwinana, par exemple, située au sud de Perth en Australie Occidentale, produit près de  $140.10^3 \text{ m}^3$  d'eau potable par jour, répondant ainsi à la demande de toute la région métropolitaine de Perth (BlurbWire, 2010). L'électricité dont a besoin cette usine est produite par un parc éolien de 80 MW situé à Emu Downs dans l'ouest de l'état. Un autre exemple d'utilisation de l'énergie solaire, basée sur l'humidification et la déshumidification, dans une unité de dessalement de petite taille a été signalé par Narayan et al. (2010) et Bourouni et al. (1999, et 2001) voir figure II. 2 Ce type de production d'eau décentralisée peut être installé, sans grandes difficultés, dans des régions reculées.



**Figure II.2.** Processus d'humidification-déshumidification (HDH) (*adapté de Narayan et al., 2010*) « eau de mer préchauffée »

Après avoir fourni un aperçu sur le dessalement utilisant les énergies renouvelables, les tailles et le coté économique de telles installations doivent être, à présent, considérés. De nombreuses questions demeurent entières telle que : ces technologies de dessalement utilisant des énergies renouvelables sont-elles économiquement viables, à une échelle réelle, pour la production d'eau douce ?

Le but de ce chapitre est de fournir une analyse critique des tendances récentes en matière de dessalement de l'eau en utilisant les énergies renouvelables (RES). Une étude de cas spécifique est présentée ainsi que l'évaluation de son impact sur l'environnement et sa durabilité. Le chapitre se terminera en mettant en relief les critères permettant de faire le choix de la technologie la plus appropriée pour la production d'eau douce en tenant compte de la réglementation et des considérations juridiques.

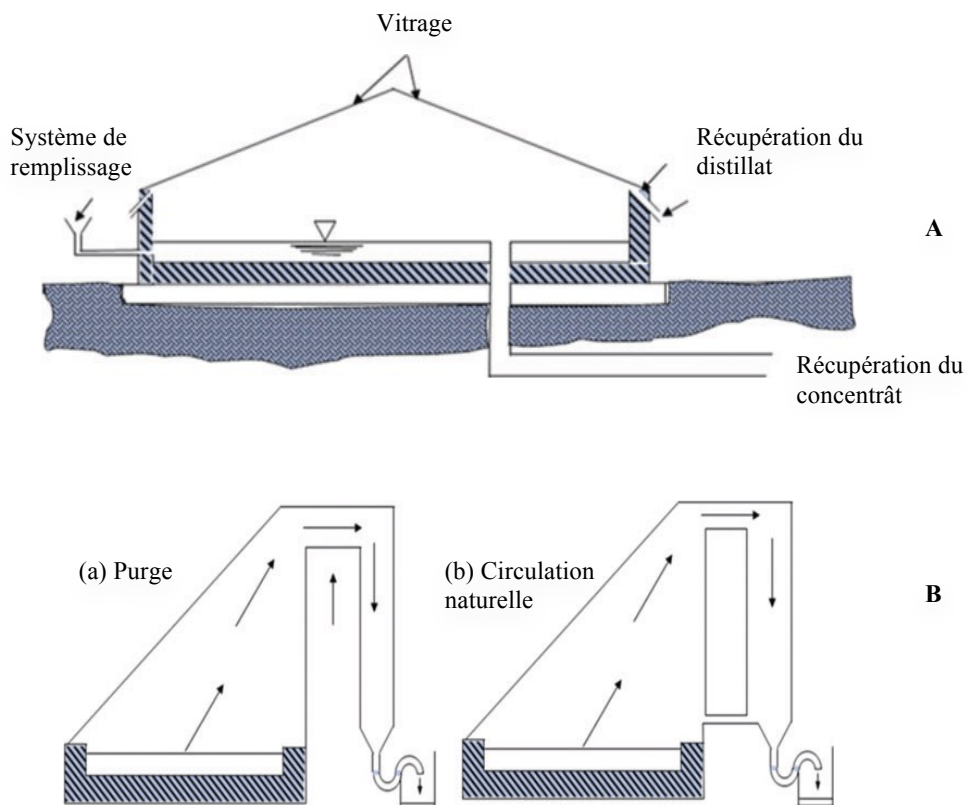
### II.2.2. Application de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau

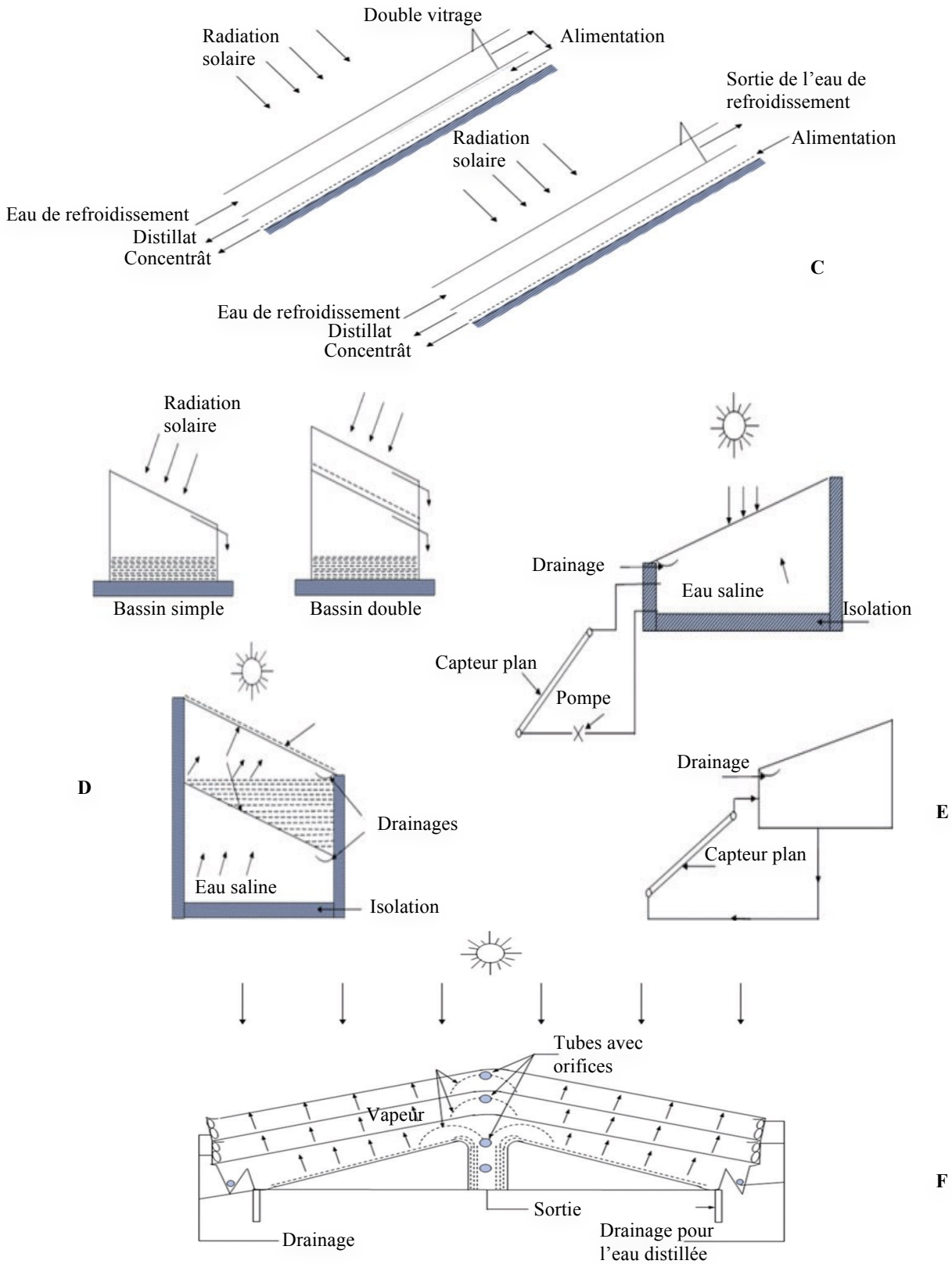
Le dessalement par voie de l'énergie solaire en utilisant les méthodes conventionnelles peut être une alternative appropriée pour fournir de l'eau douce, en particulier pour les régions rurales et éloignées où de petites quantités d'eau, pour la consommation humaine, sont nécessaires (*Al-Hallaj et al, 1998*). En effet, d'immenses potentialités existent dans le fait d'associer les énergies renouvelables avec les systèmes de dessalement destinés à l'amélioration de l'approvisionnement en eau potable des régions arides (*Mahmoudi et al, 2008, 2009, 2010*).

Pour ce faire, l'attention doit être portée vers l'amélioration :

- de l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire,
- des technologies de dessalement elles mêmes et,
- de l'optimisation de leur couplage.

De telles améliorations doivent rendre cette association économiquement viable pour des applications de petites et moyennes échelles. Afin de piloter une petite unité d'osmose inverse (RO), l'énergie électrique peut être produite à partir de l'énergie solaire directement avec du matériel photovoltaïque (PV) de conversion ou, par l'intermédiaire d'une centrale thermique solaire. Une variété d'arrangements possibles peut être envisagée entre, les approvisionnements en énergies renouvelables et, les technologies de dessalement (*Rodriguez et al, 1996*).





**Figure II.3.** Les systèmes de dessalement solaire (Goosen et al, 2000; Adapté du Fath, 1998). A: alambic à bassin à simple effet. B: alambic à une seule pente à condensateur passif. C: refroidissement de la couverture de verre par le flux de retour (a), et (b) à contre-courant. D: distillateur solaire à double-bassin: (a) Schéma d'alambic simple et à double-bassin et (b) alambic fixe à double bassin avec l'eau qui coule en permanence dans le bassin du haut. E: Collecteur à plaques planes à chauffage direct (a) à circulation forcée et (b) à circulation naturelle. F: Collecteur solaire à multi-effet typique.

Les distillateurs solaires qui ont été utilisés ces dernières décennies, présentent une variété d'options (Fig. II.3) (Goosen et al., 2000). Le distillateur solaire simple (Fig. II.3. A) est un système de petite production qui donne en moyenne 2 à 5 litres par jour. Il peut être utilisé là où la demande d'eau douce est faible et l'acquisition des terrains n'est pas chère. De nombreuses modifications visant à améliorer les performances des alambics solaires ont été faites. Il s'agit notamment d'améliorer le processus de dessalement avec les collecteurs d'énergie solaire (Fig. II.3. E) en incorporant un certain nombre d'effets pour récupérer la chaleur latente de condensation (Fig. II.3. D et II.3.F) et en optimisant les configurations et les modèles de flux pour augmenter le taux de transfert de chaleur (Fig. II.3. B, II.3.C, II.3.E, II.3.F) et en utilisant des matériaux peu coûteux dans la construction afin d'en réduire le coût. Néanmoins, ces systèmes ne sont pas économiquement viables pour une application à grande échelle. Un des dispositifs les plus efficaces de dessalement solaire est le distillateur à multiple-effets (Fig. II.3.F) (Al-Hallaj et al., 1998). Ainsi, afin d'accroître la production d'eau distillée améliorant ainsi l'efficacité du système, la chaleur latente de condensation est récupérée, en deux étapes ou plus (d'où son nom, multi-effets).

Une meilleure compréhension de la thermodynamique régissant l'utilisation multiple de la chaleur latente de condensation dans le distillateur à multi-effet (d'humidification et de déshumidification solaire) est essentielle pour l'amélioration globale de l'efficacité thermique (Al-Hallaj et al. 1998). De plus, même si un système peut être techniquement très efficace, il peut ne pas l'être du côté économique, le coût de production d'eau étant trop élevé (Fath, 1998). Par conséquent, aussi bien l'efficacité et l'économie doivent être considérées lors du choix d'un système de dessalement. Nous pouvons en outre avancer que les unités de dessalement alimentées par des systèmes d'énergies renouvelables sont particulièrement recommandées pour fournir de l'eau et, par la même, de l'électricité dans des zones reculées où les infrastructures font défaut.

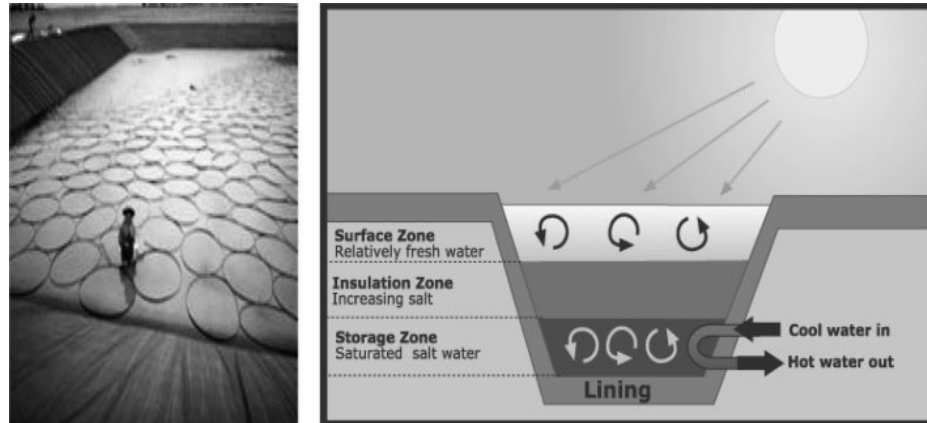
Les éléments qui contribuent grandement à l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire sont les collecteurs (capteurs) solaires. Ils sont généralement classés en fonction du niveau de température atteinte par le fluide caloporteur (Kalogirou, 2005).

- **Les collecteurs à basse température**, à plaques planes non vitrées, fournissent de la chaleur à basse température, quelques degrés seulement au-dessus de la température ambiante.

- **Les collecteurs à température moyenne** fournissent un liquide chauffé à plus de 43°C. Il s'agit de collecteurs à plans vitrés ainsi que les collecteurs à tubes sous vide utilisant l'air ou un liquide primaire comme fluide caloporteur. Ils peuvent être utilisés pour fournir de la chaleur à un échangeur de chaleur dans les procédés de dessalement thermique par chauffage indirect.
- **Les collecteurs à haute température** se présentent sous diverses formes, les cylindro-paraboliques, les plats ou ceux intégrés dans un système de réception central. En général, ils concentrent le rayonnement solaire incident sur un point focal, à partir duquel un récepteur capte l'énergie en utilisant un fluide caloporteur. L'énergie à haute température peut être utilisée soit comme source d'énergie thermique dans les procédés de dessalement thermique ou, peut être utilisée pour produire de l'électricité en utilisant une turbine à vapeur. Comme la position du soleil varie au cours de la journée et l'année, un système de poursuite du soleil est nécessaire pour veiller à ce que le collecteur soit toujours maintenu dans le foyer du réflecteur pour en améliorer l'efficacité.

Les étangs solaires (*Fig. II.4*) peuvent être utilisés pour fournir de l'énergie pour de nombreuses applications. L'étang solaire combine la collecte de l'énergie solaire avec un stockage à long terme. Les étangs de petites tailles sont utilisés principalement pour le chauffage des espaces de vie et pour la production d'eau chaude domestique, tandis que les étangs de plus grandes tailles sont proposés pour les besoins industriels, la production d'énergie électrique, et le dessalement. Le gradient de concentration du sel dans le bassin aide à stocker l'énergie. En effet, tandis que la température dans la zone supérieure est proche de la température ambiante, une température de 90°C peut être atteinte à la partie inférieure du bassin où la concentration en sel est la plus élevée (*Fig. II.4 (à droite)*). La différence de température entre la couche supérieure et inférieure de l'étang est assez grande pour fournir en énergie une unité de dessalement, ou pour entraîner un générateur de vapeur d'un moteur à cycle de Rankine organique (*Wright, 1982*). Le cycle de Rankine convertit la chaleur en travail. La chaleur est fournie extérieurement à une boucle fermée, contenant habituellement de l'eau. Ce cycle génère environ 80% de toute la puissance électrique utilisée dans le monde entier, y compris presque toutes les centrales productrices d'énergies quelles soient, solaire thermique, biomasse, charbon ou nucléaire (*Wright, 1982*). Le Cycle de Rankine Organique (ORC) utilise un fluide biologique tel que le pentane ou le toluène à la place de l'eau et de la vapeur. Ce fluide biologique permet

l'utilisation d'une source de chaleur à basse température obtenue à partir d'étangs solaires fonctionnant généralement à environ 70-90°C. L'efficacité du cycle est réduite en raison de la plage de température inférieure, mais cela peut être utile en raison de la baisse du coût impliqué dans la collecte de la chaleur à basse température.



**Figure II.4.** (Gauche) étang solaire à des fins de chauffage en Australie ([http://www.apf.gov.au/library/pubs/bn/sci/RenewableEnergy\\_4.jpg](http://www.apf.gov.au/library/pubs/bn/sci/RenewableEnergy_4.jpg)). (À droite) les étangs solaires (schéma): la teneur en sel de l'étang augmente de haut en bas. L'eau dans la « zone de stockage » est extrêmement salée. Quand le rayonnement solaire est absorbé, l'eau dans la « zone de gradient » ne peut pas s'élever au-dessus parce que l'eau de la « zone de surface » contient moins de sel et, par conséquent, est moins dense. De même, l'eau froide ne peut pas s'enfoncer, parce que l'eau en dessous a une teneur en sel plus élevée et donc une densité plus élevée. Par la suite, l'eau chaude dans la zone de stockage est canalisée, par exemple, vers une chaudière où elle est transformée en vapeur. Cette vapeur actionne une turbine qui est couplée à un alternateur (Wright, 1982)

Citons quelques exemples d'usines de dessalement où les étangs solaires sont couplés à un processus de MSF :

- Margarita de Savoya, Italie: la capacité de production de 50 à 60 m<sup>3</sup> par jour;
- îles du Cap-Vert: «Flash auto» d'Atlantis, la capacité de production 300 m<sup>3</sup> par jour;
- Tunisie: un prototype au Laboratoire de Thermique Industrielle, où un étang solaire de 1500m<sup>2</sup> couplé à un système de MSF pilote une installation d'une capacité de 0,2 m<sup>3</sup> par jour ;
- El Paso, au Texas: usine d'une capacité 19 m<sup>3</sup> par jour (Lu *et al*, 2000.)

Associé à des techniques membranaires, le système solaire photovoltaïque (PV) peut, également, être utilisé pour produire de l'eau douce. En effet, le PV permet de convertir directement la lumière du soleil en électricité par le biais de cellules solaires. Ces cellules solaires sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. D'autres semi-conducteurs peuvent également être utilisés.

Un certain nombre de cellules solaires sont généralement reliées entre elles et encapsulées ensemble pour former un module photovoltaïque. N'importe quel nombre de modules photovoltaïques peut être combiné pour former un réseau qui fournira la puissance requise par le système de dessalement. En plus du module PV, un équipement de conditionnement d'énergie (régulateur de charge, inverseurs) et un équipement de stockage d'énergie (batteries) sont nécessaires pour fournir de l'énergie à une usine de dessalement. Les régulateurs de charge sont utilisés pour la protection de la batterie contre d'éventuelles surcharges. Les inverseurs sont utilisés pour convertir le courant continu à partir du système de modules photovoltaïques en un courant alternatif. Le PV est une technologie bien maîtrisée avec une durée de vie de 20 à 30 ans. Les principaux types de systèmes PV sont les suivants:

- les systèmes autonomes (non connectés au réseau de distribution) qui fournissent, soit un courant continu soit un courant alternatif en utilisant un inverseur ;
- Le système « grilles- connectées » qui consiste en des panneaux photovoltaïques qui sont connectés au réseau électrique par l'intermédiaire d'un inverseur.

Dans les petites et moyennes entreprises, les systèmes « grilles- connectées » sont utilisés comme source d'énergie d'appoint, toute l'électricité excédentaire produite par le système PV est injectée dans le réseau. D'autre part, les systèmes autonomes sont des montages hybrides, ils sont composés de panneaux photovoltaïques en combinaison avec d'autres sources d'énergie, par exemple en combinaison avec un générateur diesel ou une autre source d'énergie renouvelable, éolienne, par exemple.

Il existe principalement deux procédés membranaires pilotés par le PV :

- l'osmose inverse (RO) et,
- l'électrodialyse (ED).

D'un point de vue technique, le PV, l'osmose inverse (RO) ainsi que l'électrodialyse (ED), sont des technologies matures et sont disponibles dans le commerce à l'heure actuelle.

La faisabilité du PV alimentant l'osmose inverse (RO) ou des systèmes ED, est une option valide pour des unités de dessalement situées dans des sites isolés (*Childs et al., 1999*). Le principal problème de ces technologies reste leurs coûts élevés et, pour le moment, la disponibilité de cellules photovoltaïques.

D'un autre côté, déjà en 2005, Burgess et Lovegrove ont comparé l'application de l'énergie solaire thermique pour le dessalement utilisant les membranes par rapport à celui qui utilise la technologie de distillation.

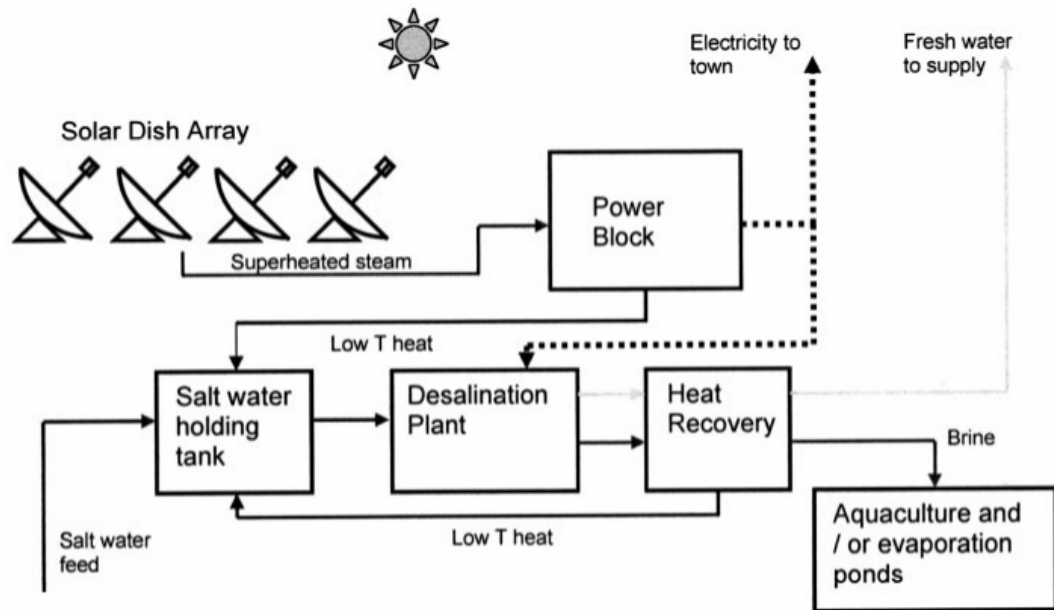
Ils ont signalé qu'un certain nombre de stations expérimentales et de prototypes de dessalement solaire ont été construits de par le monde. Dans ces cas, la technologie de dessalement a été conçue spécifiquement pour une utilisation en conjonction avec des capteurs solaires thermiques, qu'ils soient statiques ou munis de système de suivi. À ce jour, ces systèmes sont, soit de capacité très faible, et destinés à de petites communautés dans les régions éloignées, ou bien leur faisabilité, à une plus grande échelle, reste à démontrer.

Plusieurs systèmes, qui présentent un certain intérêt, ont été discutés par différents auteurs. *Schwarzer et al, en 2001*, ont décrit un système simple muni d'un collecteur à plaques planes qui utilise le pétrole comme fluide caloporteur. Ce système est couplé à une tour de dessalement dans laquelle l'eau s'évapore par étapes successives à différentes hauteurs (similaire à un système MSF montré dans la *figure II.3. F*). La condensation de la vapeur se produit à l'étage, à la face inférieure de l'étage suivant, transférant ainsi de la chaleur et augmentant le rendement du dispositif.

Il est important de se rappeler qu'une distinction claire doit être faite entre les systèmes où l'osmose inverse (RO) est adaptée pour être couplée (mécaniquement) avec l'énergie solaire thermique et ceux où, l'électricité est produite par l'énergie solaire thermique et où, l'osmose inverse standard (RO) est branchée à cette l'électricité.

La Société Vari-Power, basée en Californie, a développé un système de dessalement basé sur l'osmose inverse standard (RO) et qui est spécifiquement adapté pour fonctionner au solaire thermique (*Childs et al, 1999*). Ses ingénieurs ont développé et breveté un moteur d'entraînement direct (DDE) qui convertit la chaleur en une énergie hydraulique nécessaire au fonctionnement de l'osmose inverse (RO). Ainsi, la production d'eau douce, à l'aide de ce moteur DDE, devrait être trois fois plus grande que celle obtenue par un collecteur plan et à celle qui serait obtenue par RO entraînée par un véritable système de production d'électricité par énergie photovoltaïque. *Burgess et Lovegrove (2005)* ont noté que ce projet reste au stade de prototype et le moteur DDE n'est pas encore, de nos jours, disponible dans le commerce.

Le choix de la capacité d'une usine de dessalement par RO dépend des variations, journalières et saisonnières, des niveaux de rayonnement solaire, ainsi que des prix d'achat et de vente de l'électricité. L'influence des prix de transport des combustibles fossiles n'est pas négligeable non plus, particulièrement chez nous dans notre vaste Sahara. Une combinaison de paraboles solaires, constituant un système de production d'électricité pour une installation de dessalement par RO, est illustrée à la *figure II.5*.



**Figure II.5.** Système solaire thermique utilisant une combinaison de capteurs solaires paraboliques pour la génération d'électricité et pour piloter une station de dessalement utilisant la RO (Burgess et Lovegrove, 2005)

Un certain nombre de centrales solaires pilotes de dessalement ont été installées et la plupart d'entre elles fonctionnent avec succès avec très peu d'entretien (Reddy et Ghaffour, 2007). La quasi-totalité de ces centrales ont été conçues sur des sites spécifiques. Les données opérationnelles et l'expérience d'exploitation de ces installations pilotes peuvent être utilisées pour améliorer leur fiabilité et minimiser leurs coûts d'exploitation. Ces installations sont alimentées par des capteurs solaires qui produisent de l'énergie thermique ou électrique.

Ces types d'énergies produites par les systèmes de capteurs solaires peuvent être utilisés pour exécuter des processus de dessalement conventionnels tels que :

1. l'osmose inverse (RO),
2. l'électrodialyse (ED),
3. la détente étagée de distillation (MSF),
4. la distillation multi-effet (MED),
5. le processus d'humidification et de déshumidification (H/D).

Bien d'autres processus, aussi prometteurs les uns que les autres, sont en cours de développement tels que la distillation membranaire (MD) et le dessalement par d'adsorption (AD).

Le choix n'est pas toujours facile mais les facteurs qui doivent être considérés lorsqu'on opte pour un système de dessalement et le type spécifique d'énergie solaire qui l'accompagne sont :

- 1-la qualité requise de l'eau douce produite,
- 2-la qualité de l'eau d'alimentation,
- 3-la taille de l'unité,
- 4-les exigences en matière de puissance disponible,
- 5-le coté économique, et enfin,
- 6-l'exploitation et la maintenance.

Pour les petites installations, généralement de démonstration, plus de 80% de leur production sont obtenus par osmose inverse et MED (Reddy et Ghaffour, 2007). La consommation d'énergie pour les différentes technologies de dessalement est présentée dans le *tableau II.2*. Les technologies basées sur la distillation ont besoin d'énergie thermique et d'énergie électrique alors que les procédés membranaires, qui équipent les grandes usines commerciales, n'ont besoin que d'énergie électrique. Toutefois, les deux technologies sont très énergivores.

**Tableau II.2** La consommation d'énergie dans les grands procédés de dessalement (Mahmoudi et al 2009, Ghaffour 2009)

	Énergie thermique	Énergie électrique	Énergie totale	Qualité de l'eau produite
Procédés	[kWh m <sup>-3</sup> ]	[kWh m <sup>-3</sup> ]	[kWh m <sup>-3</sup> ]	[mg/l-1]
MSF	7.5–12	2.5–3.5	10-15.5	5–30
MED	4–8	1.5–3	5.5-11	
RO (eau de mer)	–	3–6	3–6	100–500
RO (eau saumâtre)	–	0.5–2.5	0.5–2.5	

Les dépenses en énergie peuvent dépasser 50% du coût de fonctionnement de chaque processus (Mahmoudi et al, 2009; Ghaffour, 2009). Le coût global incluant la production d'eau et la consommation d'énergie de ces systèmes dépend fortement des paramètres spécifiques de chaque technologie. Les détails des coûts de dessalement et les besoins en énergie pour chaque technologie ont été signalés par Reddy et Ghaffour (2007).

En outre, les efforts visant à réduire la consommation d'énergie ont été axés non seulement à réduire le coût de l'eau douce produite, mais aussi à réduire au minimum la dépendance des très coûteux combustibles fossiles, réduisant par la même les émissions de CO<sub>2</sub>. La quantité d'eau dessalée produite par différents procédés de dessalement et par mètre carré de surface de capteurs solaires nécessaire est donnée dans le *tableau II.3*.

**Tableau II.3.** Productivité des différents procédés de dessalement par mètre carré de surface de capteurs solaires (*Childs et Dabiri, 2000; Childs et al, 1999*)

Procédé de dessalement	Eau produite par mètre carré de surface de capteurs solaires
Capteur solaire simple	4-5
Procédés d'humidification deshumidification, collecteur solaire thermique de capacité moyenne	12
MSF, MED avec stockage de l'énergie thermique	40
l'eau de mer par osmose inverse-photovoltaïque	200
RO DDE-collecteur parabolique (Sterling)	1200

Il est important de noter qu'il existe encore plusieurs limites ou restrictions dans l'utilisation du dessalement solaire. Tout d'abord, pour des raisons techniques et/ou économiques, à l'heure actuelle, le dessalement solaire ne semble pas être une option viable pour des applications à très grande échelle. Cependant, il peut être utilisé pour des applications de taille petite ou moyenne pour l'approvisionnement en eau des endroits éloignés et où il n'y a pas de raccordement au réseau électrique. D'un autre côté, alors que les besoins énergétiques de toute unité de dessalement sont constants et continus, l'énergie solaire, elle, n'est disponible que pendant la journée avec un changement d'intensité du matin au soir, avec une intensité maximale l'après-midi. Or, il est connu que l'efficacité de tout processus de dessalement est faible si elle est exploitée à charge variable. Le fonctionnement variable affecte même la durée de vie de l'unité. C'est pour cela qu'un système de stockage d'énergie ou une source d'énergie alternative (groupe électrogène) sont donc nécessaires pour un fonctionnement permanent et à charge constante. Enfin, les procédés de dessalement conventionnels disponibles peuvent ne pas convenir, techniquement et économiquement, pour l'exploitation de l'énergie solaire dans les régions éloignées car, l'exploitation et la

maintenance de ces technologies nécessitent des opérateurs qualifiés (*Mahmoudi et al, 2009; Ghaffour, 2009*) qui ne sont pas toujours disponibles dans ces régions.

### II.2.3 L'énergie éolienne et le dessalement

Le vent est généré par les différences de pressions atmosphériques créées par l'énergie solaire. Dans un examen rigoureux sur les sources d'énergies renouvelables pour le dessalement, *Kalogirou (2005)* a noté que, sur une base purement théorique et, abstraction faite de l'inadéquation entre l'offre et la demande, l'énergie éolienne dans le monde pourrait fournir, à elle seule, une quantité d'énergie électrique égale à la demande d'électricité mondiale actuelle.

Les petites installations, décentralisées, de traitement des eaux, combinées à un système de convertisseur d'énergie éolienne autonome (WEC) (*Fig. II.6. (à gauche)*), montrent un grand potentiel pour la transformation de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre en eau potable (*Koschikowski et Heijman, 2008*). Aussi, dans les zones reculées où les ressources potentielles d'énergie éolienne sont importantes, telles que les îles, on peut utiliser des systèmes d'énergie éolienne pour alimenter des unités de dessalement de l'eau de mer pour la production d'eau douce. L'avantage de tels systèmes est la réduction du coût de production de l'eau douce par rapport aux coûts de transport de l'eau vers ces îles ou à l'utilisation de combustibles traditionnels comme source d'énergie.

Il existe deux approches pour le choix des systèmes éoliens pour le dessalement :

- 1- La première dans laquelle les turbines éoliennes ainsi que le système de dessalement sont reliés au réseau. Dans ce cas, la taille optimale de l'installation éolienne et l'optimisation du système de dessalement nous permet d'éviter les coûts de combustible, et c'est là un intérêt certain ;
- 2- La seconde option est basée sur un couplage, plus ou moins direct, de l'éolienne et le système de dessalement. Dans ce cas, le système de dessalement est affecté par les variations de puissance et les interruptions causées par la source d'alimentation que constitue le vent. Ces variations de puissance, ont un effet négatif certain sur la performance et la durée de vie des composants des équipements de dessalement. Par conséquent, des systèmes de compensation, comme les batteries, des générateurs diesel ou des volants d'inertie pourraient être intégrés dans le système.

L'osmose inverse est la technologie préférée pour être combinée avec l'éolien en raison de sa faible consommation d'énergie spécifique. L'énergie électrique nécessaire est principalement utilisée pour pomper l'eau à une pression de fonctionnement relativement

élevée. De plus, l'utilisation de turbines munies de dispositifs de récupération d'énergie, permet de récupérer une partie de cette énergie.

Les pressions de fonctionnement varient entre 10 et 25 bars (1 à 2,5 MPa) pour l'eau saumâtre et de 50 à 80 bars (5 à 8 MPa) pour l'eau de mer (Eltawil et al, 2009).

L'usine de dessalement de Kwinana, située au sud de Perth en Australie occidentale, est un exemple édifiant. En effet, un parc éolien d'une puissance de production de 80 MW, situé à Emu Downs, a été combiné avec succès, à une usine de dessalement par osmose inverse et au réseau local. L'usine produit près de  $140.10^3$  m<sup>3</sup> d'eau potable par jour (BlurbWire, 2010). L'électricité produite est utilisée donc par l'usine de dessalement et par toute une région de l'État du Midwest. Cette usine de production d'eau douce par osmose inverse a été la première en son genre en Australie et s'étale sur plusieurs hectares dans une zone industrielle.



**Figure II.6.** (Gauche) Parc éolien (Kalogirou, 2005), à droite, les éoliennes et les cellules photovoltaïques de l'usine SWRO située à Sureste à Gran Canaria, Îles Canaries, d'une capacité de  $25000$  m<sup>3</sup> par jour (Sadhvani, 2008)

Dernièrement, plusieurs usines de dessalement et de traitement d'eau, de grande et moyenne taille, sont partiellement alimentées par des énergies renouvelables, principalement avec des turbines éoliennes, des cellules PV, ou les deux combinées.

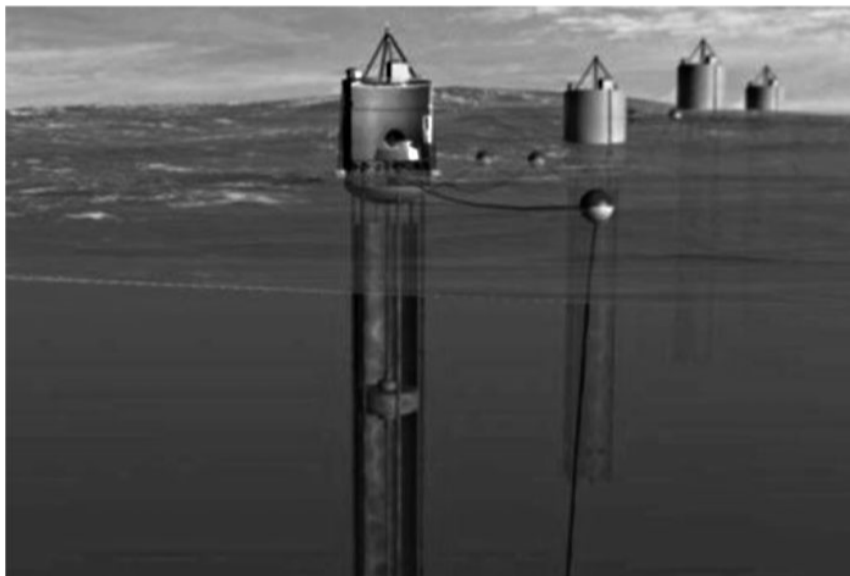
À titre d'exemple, nous citerons l'usine de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse (SWRO) de Sureste située à Gran Canaria, dans les Îles Canaries, d'une capacité de  $25.10^3$  m<sup>3</sup> par jour. La demande d'énergie de cette usine est assurée, d'une part par une combinaison de cellules photovoltaïques installées sur le toit (rooftop) (cette contribution est minime) et d'autre part, par le réseau. Ce dernier est alimenté par plusieurs types d'énergies, y compris l'énergie éolienne (Fig. II.6. (Droite)) (Sadhvani, 2008).

### 2.2.3 Énergies de la houle et marémotrice pour le dessalement

La plupart des travaux sur la récupération de l'énergie de la houle se sont concentrés sur la production d'électricité par le biais de convertisseurs (Davies, 2005). De tels convertisseurs pourraient, en principe, être couplés à des usines de dessalement à propulsion électrique, avec ou sans connexion au réseau électrique local. Dans le monde, les ressources exploitables de l'énergie de la houle sont estimées à 2 TW, c'est donc une source potentielle pour la production d'électricité afin d'alimenter en énergie des stations de dessalement de l'eau de mer par RO. En plus de sa disponibilité dans les zones où il y a une pénurie d'eau, pourvu que les vagues soient suffisamment énergiques, cette solution est respectueuse de l'environnement. L'énergie qui peut être récoltée à partir des océans comprend la houle, les marées et les courants océaniques sous-marins qui actionnent des hydroliennes (Fig. II.7).

Dans une étude menée par Davies (2005), portant sur la possibilité de coupler l'énergie de la houle océanique au dessalement, il a constaté que, le long des côtes arides et ensoleillées, une usine de dessalement, alimentée par l'énergie de la houle, pourrait fournir de l'eau pour irriguer une bande de terre de 0,8 km de large si les vagues sont de 1 mètre de haut. Avec des vagues de 2 mètres de haut, cette bande pourrait augmenter à 5 km !

Le potentiel énergétique de la houle a été évalué pour un certain nombre de pays arides, connaissant des pénuries d'eau. Ainsi, le potentiel maximal est de 16% pour le Maroc et avoisine les 100% pour la Somalie. Dans une étude similaire, Magagna et Muller, en 2009, ont décrit le développement d'une usine de dessalement par RO complètement autonome, non connectée au réseau, et alimentée uniquement par l'énergie de la houle. Une pompe à haute pression pourrait produire la pression de 6 MPa nécessaire pour alimenter une membrane d'osmose inverse pour le dessalement de l'eau. De nos jours, la technologie de l'énergie de la houle n'est qu'au stade de prototype et il n'existe aucune technologie standard disponible. L'énergie de la houle, comme l'énergie éolienne, affiche un comportement intermittent et aléatoire. C'est là un inconvénient majeur !



**Figure II.7.** L'« AquaBuoy 2.0 » est une grande bouée de 3m de diamètre liée à un long tube de 21 m. C'est un système qui permet de récupérer l'énergie cinétique des vagues afin de la transformer en électricité,

Techniquement, ce système s'appuie sur une bouée flottante couplée à un piston hydraulique, une tuyère et une turbine. La bouée flottante est reliée au fond marin par des câbles élastiques, lui permettant de suivre le mouvement des vagues tout en restant positionnée au même endroit. En dessous de la bouée, se situe un cylindre (la tuyère) contenant une colonne hydraulique (tube d'accélération) ouvert des deux cotés et un piston flottant à mi-course. Le principe est relativement simple, le piston va monter et descendre avec la vague, quand il descend il aspire l'eau dans la colonne hydraulique (par un système de valve ouverte/fermée) et quand il monte il pressurise l'eau aspirée précédemment dans cette même colonne hydraulique (d'où son nom de tube d'accélération). Cette eau sous pression entraîne alors une turbine qui se trouve dans la bouée flottante, l'eau est ensuite rejetée à l'extérieur. La turbine est donc mise en mouvement et fournit de l'électricité qui est alors acheminée sur la côte à l'aide de câbles sous-marins. (Chapa, 2007).

#### II.2.4 Dessalement par Géothermie

L'énergie géothermique est largement distribuée à travers le monde (Dorn, 2008, White et Williams, 1975; Wright, 1998). 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 (Tzen et al., 2004).

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 (*Bouchekima, 2003*), d'énergie éolienne (*Mahmoudi et al, 2009*) et d'importants réservoirs géothermiques (*Fekraoui et Kedaid, 2005; Mahmoudi et al, 2010*) : 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. Nous allons discuter de cet exemple plus en détail dans le troisième chapitre.

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 (*Bourouni et Chaibi, 2005*). *Kalogirou (2005)* a montré que la température du sol en dessous d'une certaine profondeur reste relativement constante tout au long de l'année. *Popiel et al. (2001)* ont signalés qu'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 à 150°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 (*Kalogirou, 2005*). 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 (*Houcine et al., 1999*). D'autre part, *Fridleifsson et al. (2008)* ont rapportés que 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. Et à *Fridleifsson et al (2008)* de poursuivre en disant : «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.»

## II.3. CONSIDERATIONS D'ECHELLE ET CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

### II.3.1 Facteurs influant sur l'échelle

Une évaluation approfondie des incidences économiques, réglementaires et techniques du déploiement à grande échelle de l'énergie solaire a été faite par *Merrick en 2010*. Il a indiqué, qu'en dépit de son coût actuel relativement élevé par rapport aux autres options technologiques, une combinaison de réduction des coûts et une politique de mesures de soutien pourraient conduire à une utilisation et à une application croissante des technologies d'énergie solaire. Par exemple, technologiquement parlant, les caractéristiques techniques et économiques de l'énergie photovoltaïque (PV) et de l'énergie solaire à concentration (CSP) auront des implications plus larges sur le système d'alimentation électrique. Il a noté également, que les préoccupations grandissantes concernant le changement climatique, vont favoriser le déploiement à grande échelle de l'énergie solaire. De plus, le développement du secteur des énergies renouvelables a un réel potentiel de créer de nouvelles industries et les emplois qui leurs sont associés.

Si une transformation à grande échelle des systèmes de production d'électricité dans le monde doit arriver, et c'est là notre grand souhait, il faudra sans doute, qu'elle se produise avec une combinaison des sources d'énergies renouvelables comme, l'énergie solaire, le vent, la houle, et la géothermie. Lors d'un déploiement à grande échelle de l'énergie solaire, d'autres facteurs entrent en jeu, tels que :

- la nécessité d'avoir un réseau performant de transport électrique ;
- l'exigence de la fourniture de l'énergie électrique à la demande, même lorsque le soleil ne brille pas ;
- le maintien de la qualité de service et enfin ;
- le choix des politiques et des réglementations qui doivent aider une mutation efficace.

### II. 3.2 Rapport coût-efficacité par rapport aux sources d'énergie conventionnelles :

Le dessalement en utilisant des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la géothermie, l'éolien, et la houle ne peut se faire que par combinaison de deux technologies distinctes: la production d'énergie et le dessalement lui même. Le défi consiste à trouver une conception optimale pour combiner les deux technologies dans un système adéquat (*Mathioulakis et al, 2007*). Bien que l'énergie solaire, par exemple, soit abondante et gratuite, le matériel pour sa capture, sa conversion sous formes d'énergie utile et son utilisation doivent

se faire d'une manière efficace et, économiquement viable, de plus, le stockage (quand il est nécessaire) n'est pas gratuit (*Gude et Nirmalakhandan, 2010*).

Nous pouvons dire qu'il n'est pas possible de ramener le coût du dessalement utilisant l'énergie thermique solaire direct, à gamme comparable, au niveau du coût du dessalement conventionnel, du moins pas dans un avenir proche. Par contre, ce qu'on peut dire actuellement, c'est que le dessalement à l'énergie solaire trouvera des applications, dans un premier temps, dans des sites isolés où il n'y a pas de raccordement au réseau électrique. Les distillateurs solaires et l'utilisation directe de l'énergie géothermique, par exemple, sont inclus dans ce scénario. Dans les distillateurs solaires l'énergie nécessaire pour produire de l'eau dessalée est élevée car, la chaleur latente de condensation n'est pas récupérée. D'où la nécessité d'une grande surface, ce qui contribue à l'augmentation du capital investi dans l'unité. Il est à noter qu'une centrale géothermique a un coût d'installation beaucoup plus élevé par rapport à une centrale à combustible fossile (coût par MW installé), mais son coût de production d'électricité est beaucoup moindre.

Pour les applications indirectes, du matériel supplémentaire est nécessaire pour convertir l'énergie renouvelable en travail mécanique, thermique ou en énergie électrique. Il est à noter que les rendements de conversion de cette énergie renouvelable demeurent faibles, c'est ce qui augmente le capital investi et inhibe, quelque peu, l'investissement dans les ER :

- Dans de nombreux pays où il y a manque d'eau douce, la puissance électrique est subventionnée : c'est le cas de l'Algérie !
- Les énergies solaire et éolienne ne sont pas des sources continues or, le fonctionnement des procédés de dessalement, pour des raisons techniques et économiques, nécessitent un fonctionnement en continu. Cela nécessite donc des équipements supplémentaires pour stocker les énergies thermique et électrique produites. C'est ce qui contribue à une augmentation du coût d'investissement des usines de dessalement de l'eau.

À l'heure actuelle, les systèmes de capteurs solaires à haute température offrent l'électricité la moins chère dans des stations de production d'électricité solaire à grande échelle (> 10 MW). Les coûts d'installation sont de l'ordre de 2 à 3 US \$ par watt, ce qui entraîne un coût de production de l'énergie électrique solaire variant de 0.1 à 0.20 US \$ le kWh. De plus, dans les grandes centrales hybrides à concentration solaire, le cycle est combiné au gaz naturel ou au charbon. Une telle combinaison peut réduire les coûts

d'installation à 1,5 US \$ par watt et donc réduire le coût de production de l'énergie solaire en-dessous de 0,08 \$ par kWh.

En se basant sur la conception et l'exploitation de 79 unités expérimentales à travers le monde, *Ghermandi et Messalem (2009)* ont enquêté sur l'état de développement du dessalement solaire par RO. Ils ont soutenu que le dessalement par RO alimenté par le photovoltaïque (PV) est mûr pour sa mise en œuvre commerciale. Cependant, *DeCanio et Fremstad (2011)* ont noté que le coût de l'électricité produite par la technologie PV reste élevé par rapport aux sources d'énergies conventionnelles. Bien que des études de développement soient en cours dans de nombreux pays, aucune approche de conception standard de panneaux PV n'a été développée. La faisabilité technique de différents concepts a été démontrée dans un nombre relativement important d'études de cas.

Les systèmes PV qui sont couplés directement à des groupes motopompes, à vitesse variable et à courant continu, semblent être les plus efficaces énergétiquement et les plus rentables pour des stations à petite échelle de dessalement par RO. N'ayant pas suffisamment de recul, certaines préoccupations ont, tout de même, été exprimées au sujet de leur performance à long terme.

Malgré ces bons résultats, la combinaison d'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie supplémentaires, comme l'ont noté *Ghermandi et Messalem (2009)*, peut être bénéfique dans le dessalement à petite et à grande échelle. Par exemple, dans les petits systèmes, les panneaux photovoltaïques peuvent se combiner avantageusement avec des éoliennes. Cet aspect de complémentarité des deux sources d'énergies renouvelables peut être exploité pour réduire les coûts globaux. Dans le même ordre d'idée, pour les grands systèmes de dessalement, l'énergie solaire à concentration (CSP) et le carburant de chauffage peuvent aider à donner de la stabilité au fonctionnement de l'unité pendant la nuit ou pendant les périodes de faible ensoleillement. Quelque soit le système, de petite ou de grande taille, sa connexion à un réseau électrique pour une puissance combinée, œuvrera pour un fonctionnement stable. *Ghermandi et Messalem (2009)* ont conclu que, vu l'état de l'art actuel, l'utilisation du solaire pour le dessalement par RO n'est compétitif, par rapport à d'autres sources d'approvisionnement, que dans des régions éloignées.

Enfin, le choix de la méthode de dessalement affecte de manière significative le coût du dessalement de l'eau. C'est pour cela que les méthodes thermiques sont utilisées principalement dans les systèmes de moyenne et grande taille, tandis que les méthodes membranaires, principalement RO, sont utilisées dans des systèmes de moyenne et basse

capacité. Néanmoins, au cours des dernières années, l'osmose inverse est devenue le choix optimal pour des unités encore plus grandes.

Dans des conditions particulières, les systèmes hybrides, associant le solaire et le vent, peuvent offrir une production accrue et plus stable de l'eau douce.

### II.3.3 Potentiel du marché

*Delucchi et Jacobson (2011)* ont établi un rapport sur la faisabilité de fournir en énergie toutes les régions du monde en utilisant le vent, l'eau et l'énergie solaire. Ils ont conclu qu'un système à grande échelle peut satisfaire, de façon fiable, et à un coût raisonnable, tous les besoins énergétiques de la planète, avec des avantages importants pour le climat, la qualité de l'air, la qualité de l'eau, le respect des systèmes écologiques, et la sécurité énergétique.

Pour ce faire, sont nécessaires, environ :

- 4 millions de turbines éoliennes de 5 MW ;
- 90000 installations photovoltaïques solaires (PV) de 300 MW ;
- des usines à concentration de l'énergie solaire (CSP) de 1,9 milliards de kW ;
- des systèmes solaires photovoltaïques individuels de 3 kW sur chaque toit.
- À cela, il faudrait ajouter, en quantités moins importantes, les énergies récupérées par le biais de la géothermie, des marées, de la houle, et des centrales hydroélectriques.

En outre, il est nécessaire d'augmenter considérablement les infrastructures de transport électrique (les réseaux) afin de répondre aux exigences du nouveau système d'alimentation. Il faudrait également :

- accroître la production de batteries électriques à haut rendement ;
- augmenter l'utilisation de véhicules et de navires qui combinent l'hydrogène des piles à combustible et les batteries pour fonctionner. Il faudrait, également ;
- promouvoir la fabrication d'avion fonctionnant à l'hydrogène liquéfié ;
- généraliser l'utilisation des pompes à chaleur (pour l'air et la géothermie) ;
- les procédés à haute température devraient utiliser de l'hydrogène pour exécuter leur processus.

Le coût social du transport de l'électricité obtenue à partir de piles à combustible à hydrogène, peut être comparable ou inférieur au coût social de transport de l'électricité basée sur les combustibles fossiles liquides. *Kempton et Dhanju (2006)* ont expliqué que la transformation complète du secteur de l'énergie ne serait pas le premier projet à grande échelle entrepris dans l'histoire contemporaine du monde. Pour améliorer l'efficacité et la

fiabilité des éoliennes, des stations de dessalement et les infrastructures d'exploitation de l'énergie solaire, une planification avancée est nécessaire. Idéalement, les sites d'installation pour l'éolien, le solaire, la houle et la géothermie devraient être identifiés à l'avance et devraient se développer simultanément avec un réseau de transport interconnecté constamment mis à jour en fonction des besoins. L'interconnexion des diverses ressources énergétiques, géographiquement éparses, est importante tant pour adapter les approvisionnements que pour réduire les exigences de transmission. Malheureusement, les obstacles à la réalisation de cette transformation du secteur de l'énergie sont surtout d'ordre politique et non pas technologique.

*Ghermandi et Messalem (2009)* répondent également aux préoccupations du marché en fournissant une évaluation approfondie de l'expérience acquise dans le domaine du dessalement par RO à partir du solaire. Les perspectives de pénétrations commerciales et de développement des principales solutions technologiques ont été identifiées et discutées. Ils ont conclu que, vu l'importance du potentiel, la concentration solaire (CSP) est la technique la mieux appropriée et la plus prometteuse pour le dessalement par osmose inverse dans des installations de moyenne et grande échelle. Les études de conception préliminaires montrent que les systèmes CSP-RO peuvent être compétitifs, dans le moyen terme, avec de dessalement conventionnel par RO, c'est ce qui les permettra de gagner des parts de marché importantes. Ils ont noté qu'il y a nécessité de tester et de démontrer qu'un tel potentiel prometteur peut piloter des installations à grande échelle.

*Ghermandi et Messalem (2009)* ont poursuivi en signalant que le dessalement solaire par RO ne peut être compétitif, avec d'autres sources d'approvisionnement, que pour les régions éloignées où l'électricité du réseau n'est pas disponible et, où la demande en eau douce n'est satisfaite que par l'importation ou par des usines de dessalement de petites tailles pilotées par des moteurs diesels. Dans ce marché, la part du photovoltaïque (PV) et des usines de dessalement hybrides PV-RO va probablement augmenter dans un proche avenir. Selon ces auteurs, les progrès rapides des deux technologies solaire, le CSP et le PV, qui sont potentiellement durables, offrent les meilleures perspectives pour l'ensemble de la mise en œuvre des techniques d'approvisionnement en eau.

### **II.3.4 Processus de sélection et de gestion des risques**

Il est difficile de répondre à la question « quel système de dessalement par énergie renouvelable doit-on sélectionner ? ». Néanmoins, une option est prise pour les systèmes

autonomes hybrides de production d'électricité car ils sont, généralement, mieux adaptés que les systèmes ne possédant qu'une seule source d'énergie.

Cette hybridation nous assure une certaine continuité dans la fourniture d'électricité pour les applications hors-réseau, en particulier dans les zones reculées et difficiles d'accès. Cependant, la conception, le contrôle et l'optimisation de ces systèmes hybrides sont généralement des tâches très complexes. De plus, leur maintenance nécessite du personnel qualifié.

*Bernal-Agustin et Dufo-Lopez (2009)* ont déterminé, après un examen approfondi de la littérature spécialisée, que les systèmes les plus fréquents sont ceux constitués d'un générateur PV et/ou éoliennes et/ou un générateur diesel, avec stockage d'énergie dans des batteries classiques. Ces auteurs ont fait valoir que le stockage d'énergie par le biais de l'hydrogène, bien que techniquement viable, présente un inconvénient vu sa faible efficacité dans le processus de conversion de l'électricité-hydrogène-électricité. De plus, économiquement, il ne peut pas, à l'heure actuelle, rivaliser avec le stockage en batteries.

*Reif (2008)* a effectué une analyse de rentabilité et de gestion des risques concernant les projets géothermiques en cours d'exécution. L'auteur a mis en relief, par le biais de simulation numérique, l'extrême sensibilité du « taux de retour sur investissement » à des changements de paramètres extérieurs dont on n'est pas maître : ce qui rend les projets géothermiques financièrement risqués. Une cellule de management de projets a été installée pour limiter ces risques. Il a été recommandé que, les initiateurs du projet, doivent exécuter des simulations de rentabilité afin d'analyser divers scénarios avant la mise en œuvre effective du projet. Les résultats doivent être actualisés au fur et à mesure que le projet avance. Cette étude a fait valoir que des réserves de financement doivent toujours être prévues pour faire face aux éventuels dépassements budgétaires. Ces risques d'affaires pourraient également être limités par une négociation des contrats avec les partenaires du projet (par exemple, les entreprises de forage, les divers équipementiers, et les entreprises de génie civil).

D'un autre côté, en évaluant ces risques d'investissement, *Lerner et al. (2009)* ont, eux, discuté comment et pourquoi la prévision précise des vents est un paramètre important à la croissance continue et à la pénétration de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale. Ils ont noté la nécessité critique d'une bonne collaboration dans la planification de la distribution, de la taille des projets éoliens ainsi que du réseau de transport d'électricité, de l'échelle municipale au réseau international. Un large éventail de variables doit être considéré lors de l'évaluation de la pertinence de l'emplacement du projet potentiel d'énergie éolienne. Les

caractéristiques du site telles que l'accessibilité lors de la construction, la distance à la transmission et la charge peuvent déterminer si un site est idéal pour le développement.

L'emplacement du projet, élément initialement contrôlable, est le facteur le plus important dans la détermination de la viabilité économique d'un projet d'énergie éolienne. Les auteurs ont recommandé que des simulations informatiques de la dynamique de l'atmosphère, par exemple des modèles numériques de prévision météorologique, peuvent fournir des informations vitales sur les ressources éoliennes d'un site : d'où la nécessité de développer des modèles météorologiques de plus en plus précis et performants. Ces modèles pourront nous fournir de précieuses informations sur ce que devrait être la charge journalière et saisonnière pour un projet donné ainsi qu'une évaluation, à long terme, du potentiel réel du site.

### **II.3.5 Promotion de la politique des énergies renouvelables et réduction du recours à la production des énergies conventionnelles**

Ce qui suit est le résultat d'une enquête générale sur la promotion de la technologie des énergies renouvelables. Le parrainage par le gouvernement des projets d'énergies renouvelables doit se faire dans un cadre juridique très avantageux, financièrement parlant, et stricte sur le respect l'environnement (*Frondelet et al, 2010*). Les auteurs, en citant l'Allemagne comme exemple, ont fait un examen critique de la pièce maîtresse qui est centré sur la loi dite « Renewable Energy Sources Act (EEG) ». Cette loi cerne les coûts, les implications associées pour la création d'emplois et la protection du climat. Cette loi constitue une incitation du marché pour assurer une introduction viable et rentable des énergies renouvelables dans le pays. Ils ont ensuite expliqué que les mécanismes de soutien du gouvernement ont, à bien des égards, renverser la tendance du marché. En Algérie, malgré les énormes dépenses consenties, les marchés pour l'introduction des énergies renouvelables demeurent versatiles et montrent peu de promesses pour, stimuler l'économie nationale à long terme, assurer la protection de l'environnement, et augmenter la sécurité énergétique.

Le côté positif de cet exemple, est que cette politique a permis à l'Allemagne de doubler sa production d'électricité renouvelable depuis 2000. Elle a déjà largement dépassé son objectif minimum fixé pour 2010 qui était de produire 12,5% de l'énergie totale à partir d'énergies renouvelables telles que l'éolien, la biomasse et d'autres (*voir Fig. II.8*). En Algérie, le PDG de la SONELGAZ, Boutarfa Noureddine, affirmait, en 2011, que « 30% de l'énergie totale sera produite du renouvelable en 2030 ! »

Y arriverons-nous ? La question reste posée. Cette réalisation se fera au détriment de la production d'électricité conventionnelle, notamment l'énergie fossile.

Actuellement, l'énergie éolienne est la technologie la mieux prise en charge et la plus importante des énergies renouvelables: à titre d'exemple, en Allemagne en 2008, la part estimée de l'énergie éolienne dans la production d'électricité s'élevait à 6,3% (voir Fig. II.8), suivie par la production d'électricité à base de biomasse et l'hydroélectricité, dont les parts étaient d'environ 3,6% et 3,1%, respectivement. En revanche, la quantité d'électricité produite par énergie solaire photovoltaïque (PV) était négligeable: sa part ne dépassait pas 0,6% de l'énergie totale produite en 2008.

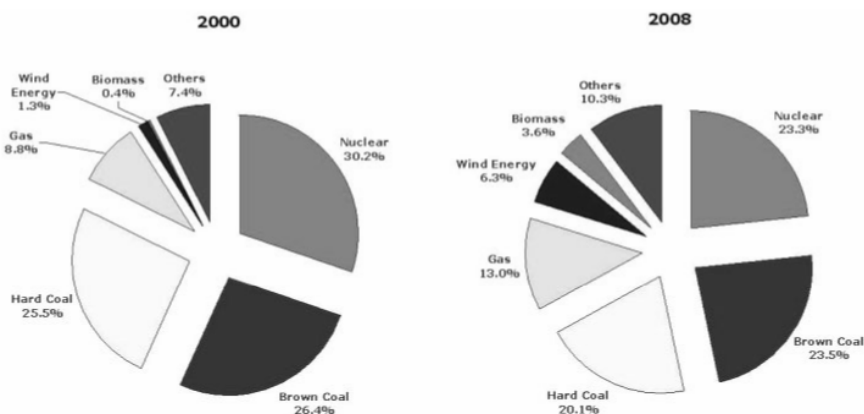


Figure II.8. Production brute d'électricité en Allemagne en 2000 et 2008 (Frondelet al. 2010).

Dans leur article, *Frondelet al. (2010)* affirment que le principal mécanisme pour soutenir les technologies renouvelables est de maintenir le Tarif de Rachat Garanti (TRG), le « feed-in tariff (FIT) » à des niveaux attractifs. À cela viennent s'ajouter les effets présumés positifs sur :

- la réduction des émissions ;
- l'emploi ;
- la sécurité énergétique et ;
- l'innovation technologique.

Un Tarif de Rachat Garanti (TRG) est un mécanisme politique visant à accélérer les investissements dans les technologies d'énergies renouvelables. Il y parvient en offrant des contrats à long terme pour les producteurs d'énergie renouvelable, généralement basés sur le coût de production de chaque technologie. À la technologie de l'énergie éolienne, par

exemple, il lui est attribué un prix, par kWh produit. Ce prix est inférieur aux prix accordés aux technologies comme l'énergie solaire-PV et l'énergie marémotrice. Ces prix plus élevés sont dus aux coûts de production qui sont plus élevés pour de telles technologies.

Néanmoins, le système de Tarif de Rachat Garanti (TRG) risque, d'une part, d'inhiber la compétitivité entre les producteurs d'énergie renouvelable et, d'autre part, il peut créer des incitations indésirables telles que forcer une entreprise à se verrouiller par rapport aux technologies existantes qui demeurent créatrices d'emploi.

Notre pays peut améliorer la promotion des énergies renouvelables en évitant de subventionner les sources d'énergie fossiles qui ne peuvent pas être concurrentielles sur le marché en l'absence de cette aide gouvernementale. L'intervention du gouvernement peut servir à soutenir les technologies d'énergies renouvelables par le biais d'autres mécanismes comme le financement de la Recherche et Développement (R & D), ce qui peut compenser les investissements des secteurs public et privé.

Considérons maintenant la controverse entourant la production d'énergie conventionnelle en utilisant la technologie nucléaire. En totalisant plus de 150 années d'expérience, principalement au Kazakhstan, en Inde et au Japon (*Kadyrzhanov et al, 2007; Khamis, 2009; Misra, 2010; Stock Trading, 2010*), affirment que la faisabilité d'usines de dessalement intégrées alimentées par des réacteurs nucléaire a été prouvée. Toutefois, *Jacobson et Delucchi (2011)* ont fait valoir que l'énergie nucléaire ne doit pas être considérée comme une source énergétique globale à long terme. De plus, une augmentation à grande échelle d'installations d'énergie nucléaire mettrait le monde face à un plus grand risque d'accident nucléaire. Au Japon, une dizaine d'installations de dessalement alimentées par de l'électricité nucléaire a permis la production de 1000 à 3000 m<sup>3</sup> d'eau potable par jour, plus de 100 années-réacteurs d'expérience ont été ainsi capitalisées. Toutefois, le récent tsunami du 11 mars 2011 et ses effets dévastateurs sur les réacteurs nucléaires de Fukushima a montré la sensibilité de cette technologie et la nécessité d'accroître la sécurité d'exploitation face aux divers aléas tels que, entre autres, les séismes et les tsunamis qui s'en suivent.

En guise de conclusion, les technologies d'énergies renouvelables sont en plein essor avec la promesse de la viabilité économique et environnementale pour le dessalement. Il y a une nécessité d'accélérer le développement et la mise à l'échelle de nouveaux systèmes de production d'eau à partir d'énergies renouvelables. Ces technologies permettront de réduire au minimum les préoccupations environnementales. Enfin, il faut noter qu'une partie de la solution à la pénurie d'eau dans le monde n'est pas seulement de produire plus d'eau, mais

aussi de le faire d'une manière écologiquement durable et d'utiliser cette eau avec parcimonie. C'est un défi auquel nous sommes en mesure de répondre !

En partant du fait que les énergies fossiles sont très polluantes et que leurs gisements vont, inéluctablement, un jour, se tarir, nous formulons le vif souhait que nos responsables songent à basculer, progressivement, vers l'utilisation des différentes énergies propres et renouvelables, dont le pays regorge, pour alimenter nos usines de dessalement. Justement, ces usines, quel est leur nombre ? Quelles techniques utilisent-elles ? Quelles sont leurs capacités de production respectives ? Où sont-elles installées ? Nous répondrons à toutes ces questions dans le chapitre qui suit où nous présentons l'état de l'art du dessalement en Algérie.

# **Chapitre III**

## **Le dessalement en Algérie**

### III.1-INTRODUCTION

Beaucoup de pays des régions touchées par la pénurie d'eau ont recours au dessalement de l'eau de mer pour répondre aux besoins des populations, de l'industrie, de l'agriculture et du tourisme (*Iglesias et al 2007; Wheida et Verhoeven 2007; Krysanova et al 2010*). Bien que le dessalement soit considéré comme étant une ressource en eau non conventionnelle, de nos jours, il ne peut plus être considéré comme étant une ressource marginale parce que certains pays, comme le Qatar et le Koweït, 100% de leurs besoins en eau pour l'usage domestique et industrielle proviennent du dessalement, en Arabie saoudite, ce taux est de près de 60 % (*ESCWA 2009*).

Le dessalement avec la réutilisation des eaux usées ont été classés comme ressources en eaux non conventionnelles. Cette classification peut facilement soulever la controverse dans les pays qui ont eu recours au dessalement sensiblement depuis plus de 50 ans. Des générations de professionnels de l'eau dans ces pays ont oublié depuis longtemps que cette ressource est non-conventionnelle.

Le dessalement est devenu la principale source d'eau potable dans de nombreux pays tels que les pays du Golfe où la demande a augmenté de façon spectaculaire au cours des dernières décennies. Il est prévu que d'ici 2015, un montant supplémentaire de 5 milliards de m<sup>3</sup>/an doit être fournie par le biais du dessalement. Ce besoin immense en eau dessalée n'est plus le propre uniquement des pays du Golfe. Presque tous les pays de la région MENA dont l'Algérie, considèrent maintenant le dessalement comme étant une option potentielle pour leur approvisionnement en eau potable. Cette demande accrue est causée par les pénuries d'eau chroniques dues à la persistance des sécheresses, l'augmentation des populations, la demande croissante d'eau par habitant et la croissance de l'industrialisation (*Mohamed et Al-Mualla 2010*). Le recours au dessalement est également renforcé par la diminution des coûts de production par m<sup>3</sup>, en raison, principalement, de l'amélioration de la technologie et de la concurrence. En effet, au cours des trois dernières décennies, le coût total de l'eau dessalée a diminué, passant d'environ 4 \$/m<sup>3</sup> à moins de 1 \$/m<sup>3</sup>, il est même passé en deçà de 0,5 \$/m<sup>3</sup> pour certains projets d'envergure spécifiques (*Reddy et Ghaffour 2007*).

L'Algérie, le plus grand pays en Afrique, a une superficie totale de 2.381.740 km<sup>2</sup> et est divisée en quatre grandes régions physiques, qui s'étendent d'Est en Ouest à travers le pays dans des zones parallèles. Une description détaillée des différentes zones a été présentée par *Mahmoudi et al. (2009)*.

La zone du Tell, qui est située dans le nord, s'étend de 80 à 190 km de la côte. Elle a un climat typiquement méditerranéen avec ses quatre saisons. C'est la zone la plus humide avec des précipitations annuelles allant de 400 à 1000 mm (*Mahmoudi et al 2009*). L'Algérie compte, environ, 40 millions d'habitants, elle a un taux de croissance annuelle de 1,7% et une densité de population globale, au nord du pays, de 11 personnes par kilomètre carré (*ONS, 2011*). La plupart des méga projets de dessalement sont donc installés dans cette zone où, justement, environ 80% de la population y est concentrée (*ONS, 2011*).

En Algérie, la sécheresse fait rage depuis plus de deux décennies, principalement dans l'Ouest du pays. Cette sécheresse a considérablement affecté le niveau des réservoirs d'eau qui ont atteint leur niveau le plus bas. Cette situation s'est aggravée à cause des taux de pompage élevés qui ont durement affecté les niveaux des nappes phréatiques. Face à cette situation et afin de compenser le manque d'eau, les décideurs du secteur, MRE (Ministère des Ressources en Eau), ont décidé de s'orienter vers un ambitieux programme impliquant le recours aux ressources en eaux non conventionnelles. Pour ce faire, le MRE, après avoir étudié les différentes technologies de dessalement ainsi que leur fiabilité et leurs coûts, a lancé un ambitieux programme de réalisation de SWRO.

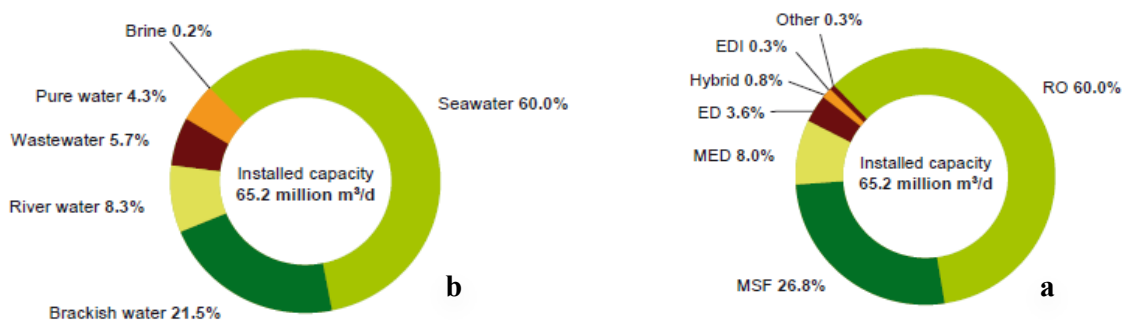
L'objectif principal de ce programme de dessalement le long du littoral, selon le Ministère des Ressources en Eau, est de laisser l'eau des réservoirs dans les contreforts le long de la Méditerranée afin qu'elle puisse être pompée et transférée, pour une irrigation à grande échelle, dans la zone des Hauts Plateaux. Cela pourrait ainsi contribuer à ralentir la migration des Hauts Plateaux vers la bande côtière déjà bondée.

Un aperçu de la croissance de la capacité de dessalement, en Algérie, et ses coûts connexes, ainsi que la nouvelle stratégie de « gestion intégrée » des ressources en eau adoptée par le gouvernement algérien pour fournir de l'eau potable dans les différentes régions du pays sont décrits dans le ce chapitre.

### **III.2. CAPACITE DE DESSALEMENT DANS LE MONDE**

Actuellement, la capacité de dessalement de la planète est d'environ de 60 millions de m<sup>3</sup>/j, elle devrait atteindre près de cent millions de m<sup>3</sup>/jour d'ici la fin 2015 (*WDR / GWI 2010-2011*). Plus de la moitié, 63,6% de la capacité totale, est produite par des procédés à membrane et 34,8% par des procédés thermiques (*voir figure III.1a*). 60% de l'eau d'alimentation est de l'eau de mer, 21,5% de l'eau saumâtre et le reste est de l'eau de surface et les eaux usées (*voir figure III.1b*). Plus de 66% de l'eau dessalée est utilisée pour les municipalités et 23,5% pour l'industrie. Ces chiffres sont susceptibles de changements rapides

vu que le marché de dessalement se développe très rapidement, avec un taux de croissance annuel d'environ 55%.



**Figure III.1** : Différentes techniques de dessalement utilisées et différentes origines des eaux d'alimentation (*Drouiche et al, 2011*)

### III.3. LE DESSALEMENT EN ALGERIE

Entre 2002 et 2004, une étude générale sur le dessalement a été réalisée par le MRE dans le but de définir une stratégie de dessalement pour le court, moyen et long terme. L'étude a porté sur 30 wilayas, 16 sur la côte et 14 à l'intérieur du pays. Les cinq régions impliquées dans cette étude sont données dans la *figure III. 2* (*Mahmoudi et al 2009; ADE 2011*).

- La région d'Oran: comprenant Tlemcen, Ain Temouchent, Oran, Mostaganem et Mascara ;
- La région de Chlef: comprenant Relizane, Chlef et Ain Defla ;
- La région d'Alger: comprenant Tipaza, Alger, Boumerdes, Tizi Ouzou, Bejaia, Médéa, Blida et Bouira ;
- La région de Constantine : comprenant Jijel, Skikda, Annaba et Tarf ;
- La région du Sahara : basée principalement sur divers projets de dessalement des eaux saumâtres et sur le gigantesque transfert sur 750 Km, d'In Salah à Tamanrasset. Ce transfert est opérationnel depuis plus de 2 ans.



**Figure III. 2** : Distribution géographique des 5 régions (Drouiche et al 2011)

L'objectif de cette étude était, principalement :

- d'évaluer les besoins, domestique, industriel et agricole ;
- l'identification des moyens de mobilisation et des infrastructures de transfert (barrages et canalisations) ;
- l'évaluation des ressources en eau, conventionnelles et non conventionnelles.

Les résultats de cette enquête a permis de réaliser les énoncés suivants:

- Les ressources disponibles doivent être utilisées, en priorité, pour l'alimentation en eau pour répondre aux besoins pressants réels ;
- L'eau restante, qui est ajoutée au potentiel de l'eau traitée, est alors fournie aux zones industrielles.

Cette comparaison a été effectuée pour les deux conditions climatiques (moyennes et sèches). En outre, l'analyse du bilan et la stratégie élaborée pour faire face à cette situation ont donné les conclusions suivantes:

La situation actuelle de l'approvisionnement en eau et de l'irrigation dans le nord du pays est très préoccupante en raison de la répartition inégale des ressources et à cause, surtout, au manque de pluie qui constitue un risque majeur. Cette situation sera améliorée dans le futur grâce à des ressources conventionnelles qui sont mobilisées dans les nouveaux barrages qui sont en construction et ceux planifiés.

Cependant, des doutes importants subsistent concernant :

- Les précipitations ;
- La mise en œuvre des projets ;
- Les pertes physiques sur le réseau ;

- La surexploitation des eaux souterraines, souvent anarchique ;
- La qualité des eaux de surface ;
- La distribution de l'eau.

Les critères ci-dessus et l'analyse approfondie de la situation ont conduit le MRE à être très prudent, il a donc proposé une stratégie pour le développement des ressources non conventionnelles basée, principalement, sur le dessalement de l'eau de mer.

### **III.3.1. Stratégie et avantages du dessalement en Algérie :**

Pour s'assurer de la disponibilité des ressources en eau pour le développement de l'irrigation à grande échelle, le MRE prévoit de transférer une partie des réserves d'eau des barrages côtiers vers la région de l'Atlas Tellien et, l'excédent sera ensuite transféré dans la région des Hauts Plateaux (*voir figure III.3*). La pénurie dans la région côtière serait alors compensée par le dessalement d'eau de mer. (*Bessenasse et al 2010*).

Les avantages de l'utilisation de dessalement en Algérie peuvent être résumés comme suit:

- L'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km;
- La mer est une source quasi non polluante et inépuisable;
- La majorité de la population (80%) ainsi que l'industrie qui consomme de grandes quantités d'eau (zones industrielles et les grands hôtels) sont situés près de la mer, ce qui réduit encore le coût de l'eau en évitant son transfert;
- Les technologies de dessalement ont énormément progressé et leurs coûts ont diminué de façon significative durant ces dernières années (*Reddy et Ghaffour 2007*).



Figure III. 3 stratégies de transfert et de distribution de l'eau (Mahmoudi et al 2009)

### III.3.2. Différents programmes de dessalement et capacité de production en Algérie

#### III.3.2.1. Programme d'urgence de dessalement de l'eau de mer

Jusqu'à la grave sécheresse de la dernière décennie, l'Algérie a concentré sa planification des ressources en eau sur le développement du nombre de barrages et de réservoirs. Lorsque la sécheresse a eu lieu, les décideurs ont été contraints d'étudier de plus près la possibilité d'utiliser le dessalement, l'idée n'a pas été facilement acceptée à l'époque. Avant de planifier les grandes installations et à grande échelle, le MRE par le biais de l'ADE a lancé un programme d'urgence pour répondre à l'énorme déficit qui sévissait dans certaines régions.

Ce programme comprend la construction de 12 usines à petite échelle (monobloc) d'une capacité totale de 53 00 m<sup>3</sup>/jour. Les capacités de ces usines étaient soit de 2500 m<sup>3</sup>/jour ou 5000 m<sup>3</sup>/jour. Cette action d'urgence n'était pas suffisante pour résoudre la pénurie d'eau dans ces régions et a montré plusieurs échecs de fonctionnement en raison du manque d'opérateurs qualifiés, il a donc été décidé de construire de plus grandes usines de dessalement avec des contrats d'exploitation et d'entretien avec les parties prenantes (voir tableau III.1).

L'accord pour ces projets a été conclu et signé entre l'ADE et l'une des compagnies suivantes :

1. La compagnie Nationale Yougoslave "Hydro-Traitement" depuis mai, 2002
2. La compagnie Allemande Linde-KCA depuis 2002 (ADE 2011).

**Tableau III. 1:** Liste des stations monoblocs (MRE 2013)

#	Wilaya	Site	Commune	Capacité m <sup>3</sup> /j	Population à servir
01	Alger	Champ de tir	Zéralda	5 000	33 330
02	Alger	Palm Beach	Staoueli	2 500	16 660
03	Alger	La Fontaine	Ain Benian	5 000	33 330
04	Tlemcen	Ghazaouet	Ghazaouet	5 000	33 330
05	Tipasa	Bou Ismail	Bou Ismail	5 000	33 330
06	Skikda	L.BenMhidi	L.BenMhidi	7 000	47 000
07	Tizi -Ouzou	Tigzirt	Tigzirt	2 500	16 660
08	Oran	Bou Sfer	Bou Sfer	5 000	33 330
09	Oran	Les Dunes	Ain Turk	2X2 500	33 330
10	Ain-Temouchent	Bou Zdjer	Bou Zdjer	5 000	33 330
11	Ain-Temouchent	Chatt el Ward	Bou Zdjer	5 000	33 330
12	Boumerdes	Corso	Corso	5 000	33 330

### III.3.2.2. Programme des Méga-Stations

L'Algérie, depuis les années soixante, a commencé à investir dans diverses technologies de dessalement pour satisfaire les besoins en eau du secteur industriel (voir tableau III.2). C'est pour cette raison que la plupart des installations de dessalement étaient la propriété soit de la Société pétrolière nationale, Sonatrach, soit de la Société nationale d'électricité, Sonelgaz (Sadi et Kehal 2002; AEC 2011).

Mais, le nouveau programme de dessalement lancé par le gouvernement Algérien est effectué, sous la base d'une joint venture, par l'« Algerian Energy Company » (AEC) d'une part, et par l'«Algérienne des Eaux » (ADE) d'autre part.

Tableau III.2: Quelques stations de dessalement à usage industriel (Drouiche 2011)

	Emplacement	Capacité [m <sup>3</sup> /j]	Utilisateur	Procédé	Année de mise en marche
01	Marsa El Hadjadj	500	Énergie	CT	1987
02	Arzew	500	Industrie	CT	1990
03	Arzew	720	Industrie	MSF	1970
04	Arzew	960	Industrie	MSF	1971
05	Arzew	961	Énergie	MSF	1982
06	Arzew	1100	Industrie	MSF	1977
07	Arzew	1200	Industrie	CT	1982
08	Skikda	1440	Industrie	MSF	1970
09	Arzew	1440	Industrie	CT	1989
10	Arzew	1560	Industrie	CT	1989
11	Arzew	1720	Industrie	CT	1989
12	Arzew	1920	Industrie	MSF	1977
13	Algiers	2000	Industrie	MSF	1979
14	Ras Djinet	2000	Industrie	MSF	1985
15	Jijel	2000	Énergie	MSF	1992
16	Arzew	2000	Industrie	CT	1993
17	Bethioua	2000	Industrie	MSF	1994
18	Ghazaouet	2000	Industrie	TC	1994
19	Marsa El Hadjadj	2000	Énergie	MSF	1994
20	Arzew	2000	Industrie	MSF	1977
21	Alger	2400	Industrie	CT	2000
22	Skikda	2896	Industrie	CT	1989
23	Arzew	2980	Industrie	CT	1982
24	Arzew	3000	Industrie	MSF	1969
25	Bethioua	3000	Industrie	MSF	1994
26	Arzew	3264	Industrie	MSF	1980
27	Arzew	3840	Industrie	MSF	1977
28	Annaba	5000	Industrie	CT	1990
29	Arzew	5678	Industrie	MSF	1994
30	Skikda	5760	Industrie	CT	1993
31	Annaba	14100	Industrie	MSF	1978
32	Skikda	24000	Industrie	MSF	1977

Dans le cadre de ce programme, treize stations de dessalement ont été lancés tout au long du littoral Algérien (voir tableau III. 3) (MRE 2013). La production totale devrait atteindre 2 260 000 m<sup>3</sup>/j vers la fin 2015, desservant ainsi plus de 11 873 220 habitants (MRE 2013).

**Tableau III. 3:** Liste des Méga-stations (MRE 2013)

#	Site	Capacité [m <sup>3</sup> /j]	Type du contrat	Population à servir	Échéancier prévisionnel
01	Kahrama (Arzew)	90 000	BOO	540 000	En Exploitation
02	Hamma (Alger)	200 000	BOO	L' Algérois	En Exploitation
03	Skikda	100 000	BOO	666 660	En Exploitation
04	BeniSaf ) A.Temouchent	200 000	BOO	1 333 320	En Exploitation
05	Mostaganem	200 000	BOO	1 333 320	En Exploitation
06	Douaouda (Alger Ouest)	120 000	BOO	666 660	En Exploitation
07	Cap Djenet (Alger Est)	100 000	BOO	666 660	En Exploitation
08	Souk Tleta (Tlemcen)	200 000	BOO	1 333 320	En Exploitation
09	Honaine (Tlemcen)	200 000	BOO	1 333 320	En Exploitation
10	Mactaa (Oran)	500 000	BOO	1 333 320	Réception imminente
11	El Tarf	50 000	BOO	-	-
12	Ténès	200 000	BOO	999 990	Réception imminente
13	Oued Sebt (Tipaza)	100 000	BOO	-	-
<b>Total</b>				<b>2 260 000</b>	

Sur les treize stations programmées, 9 sont déjà en exploitation, à savoir El Kahrama (Oran), El Hamma (Alger), Skikda, Béni Saf (Ain Temouchent), Souk Tleta et Honaine (Tlemcen), Fouka (Tipasa), Cap Djinet (Boumerdes) et Mostaganem. Ces stations assurent une production annuelle de 1 410 000 m<sup>3</sup>/j pour desservir 6.036.043 habitants. Pour les quatre stations restantes, celle de Magtaa-Oran) sera réceptionnée incessamment et celle de Ténès (Chlef) est en cours de réalisation. Les deux autres (Tipasa et El Tarf) sont en cours de lancement de travaux. La plus grande usine de dessalement au monde utilisant la technique RO est celle de Maqtaa (Mostaganem) avec une capacité totale de 500.000 m<sup>3</sup>/jour.

### III.3.2.3. Stations de déminéralisation

Le gouvernement algérien s'est lancé dans un vaste programme d'installation de stations de déminéralisation des eaux saumâtres. On retrouve ces eaux saumâtres à l'Ouest du pays (Oran 7g/l) et dans le sud du pays (salinité de 3,5 à 5 g/l). Au sud, l'état algérien a décidé d'installer des usines de déminéralisation de petites tailles pour répondre à des besoins locaux en eau douce. Le *tableau II.4* regroupe les différentes installations en activité et en cours de réalisation. Si ces stations fonctionnent normalement, elles réduiront la salinité de ces eaux saumâtres à des niveaux acceptables, c'est-à-dire entre 0,5 et 0,8 g/l.

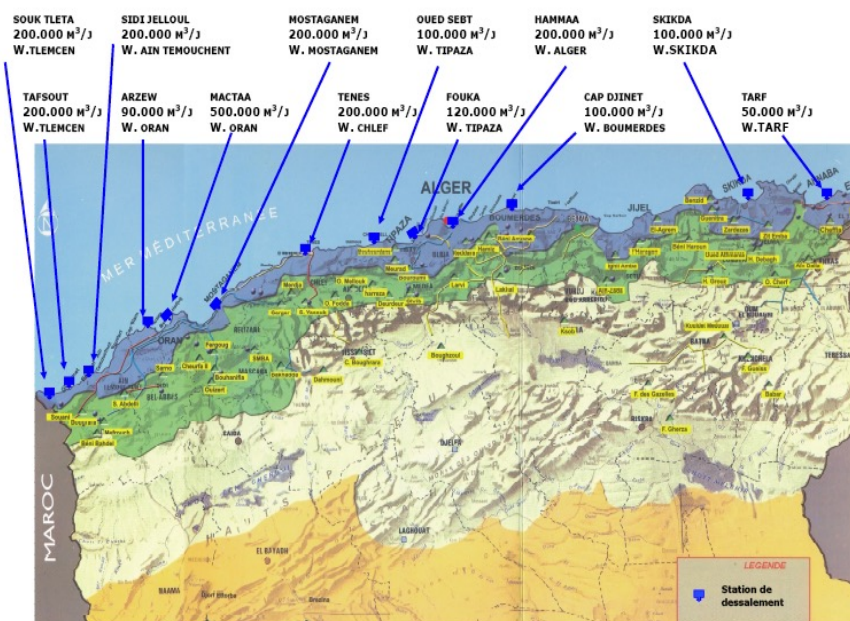
**Tableau III.4:** Stations de déminéralisation dans le Sud algérien (*MRE 2013*)

#	Localisation	Capacités [m <sup>3</sup> /j]
01	In Salah	100 000
02	Gharbouz	5 000
03	Ain El Kheir	9 000
04	Hai Bouzid	10 000
05	Mekhadma	3 000
06	Bamendil (El Khafedji)	7 500
07	Village Bamendil	3 000
08	Ifri-Gara	10 500
09	Sokra	3 000
10	Ruisset El Haddeb	27 000
11	Touggourt	34 500
12	El Oued	30 000
13	Ouargla	27 000

La station de Ouargla, en plus d'alimenter les populations avoisinantes, irrigue plus de trois millions de palmiers dattiers. De plus, elle a la particularité d'être pourvue en énergie par une centrale électrique hybride, solaire-gaz, d'une capacité de 400 MW : ce qui est une première en Algérie !

### III.5. FUTUR DU DESSALEMENT EN ALGERIE

Dans les années à venir, la capacité totale de production algérienne atteindra environ 3,5 millions de mètres cubes par jour d'eau douce pour satisfaire les besoins en eau pour la population vivant à moins de 50 km de la côte méditerranéenne (voir figure III. 2).



**Figure III.4** : Localisation des grandes stations de dessalement de l'eau de mer (MRE 2013).

Grâce à ce vaste programme et, compte tenu des projets de dessalement contractés dans le monde, l'Algérie est passée du 8<sup>ième</sup> au 6<sup>ième</sup> rang dans le classement mondial (figures. III. 5 et 6). De plus elle est devenue, avec l'Australie et l'Espagne, les pays où la croissance des capacités de dessalement sont les plus rapide dans le monde (fig. 5 et 6) (WDR / GWI

2010)

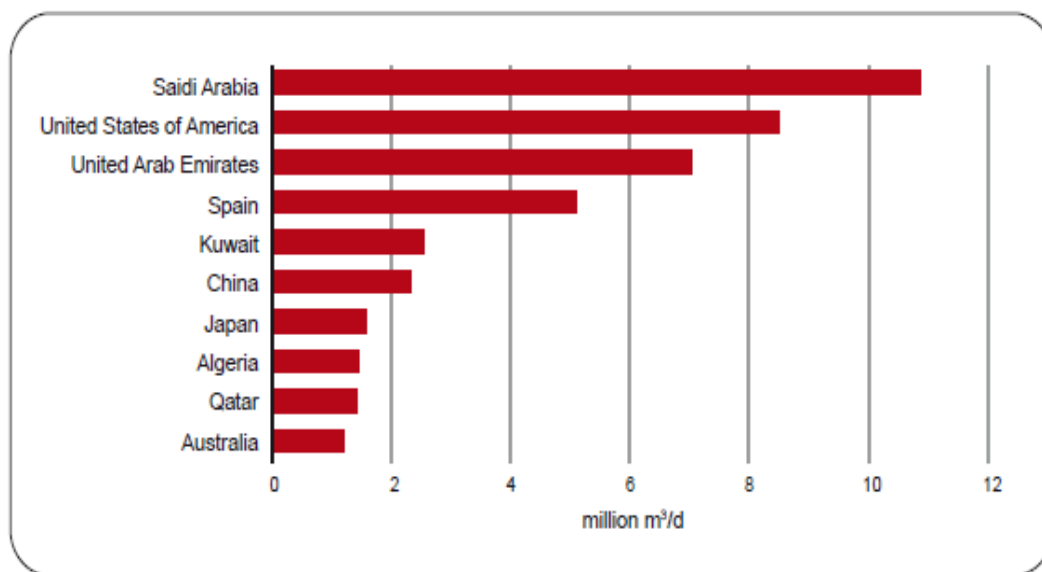


Figure III. 5 : Top 10 des pays selon la capacité totale installée, depuis 1945 (Drouiche et al, 2011)

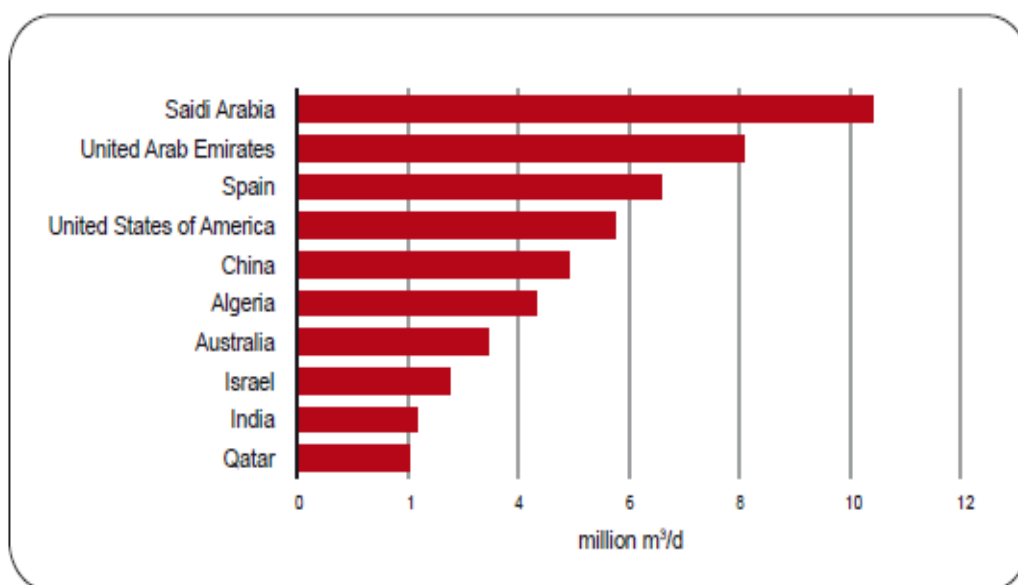


Figure III. 6 : Top 10 des pays selon la capacité totale installée, depuis 2003 (Drouiche et al, 2011)

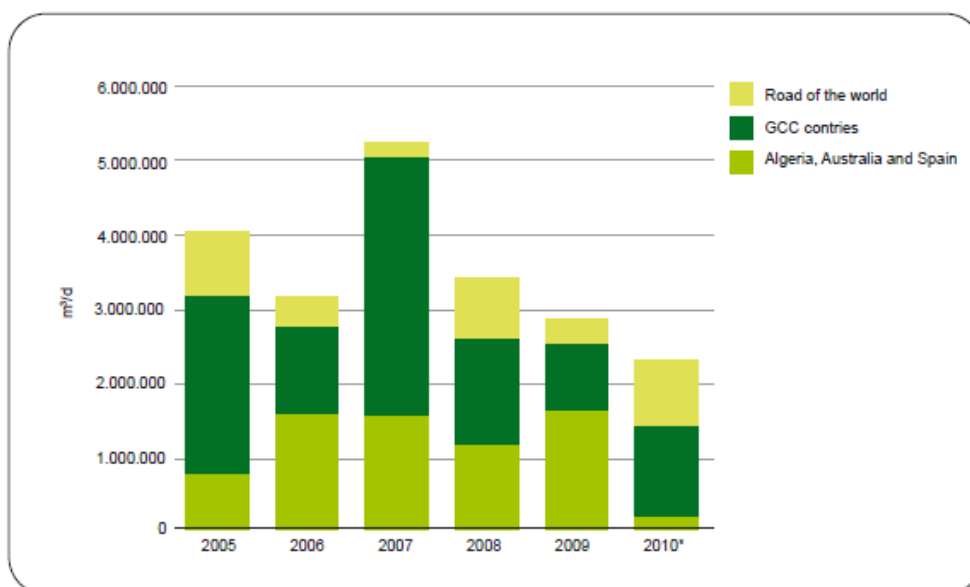


Figure III. 7 : Capacité annuelle contractuelle, par région 2005-2010 (Drouiche et al, 2011)

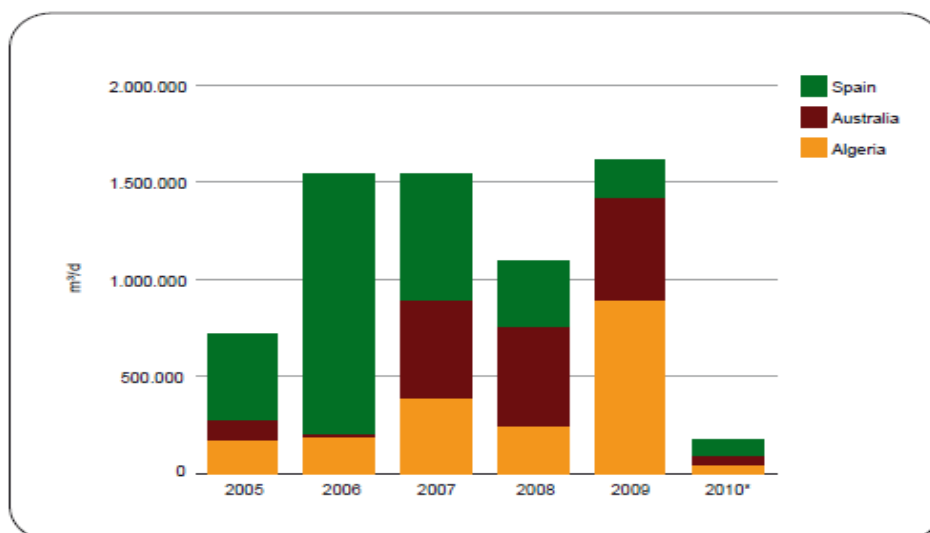


Figure III. 8 : Capacité annuelle contractuelle en Espagne, Australie et en Algérie 2005-2010 (Drouiche et al, 2011)

Il est important de mentionner que toutes ces usines sont sous des contrats type BOO/DBOO (Build Own Operate/Design Build Own Operate) à l'exception de l'usine Kahramaa MSF qui a été construite sous un contrat type IWPP (Independent Water and Power project). Les décideurs algériens ont opté pour un contrat BOO afin d'éviter toute défaillance lors de l'exploitation de ces usines et si cela venait à arriver, il sera à la charge des entreprises de construction ou leurs sous-traitants.

Ce choix est principalement dû au manque de main-d'œuvre locale qualifiée pour faire fonctionner ces usines dans les règles de l'art (Mahmoudi et al, 2009; Sadi et Kehal 2002; Ghaffour 2009).

### III.6. IMMOBILISATION ET TRANSFERT SUD-SUD

Le 15 mars 2011 a été inauguré l'une des plus importantes réalisations du secteur hydraulique des dix dernières années. Avec un débit, dans un premier temps, de 50 000 m<sup>3</sup>/jour, la conduite pourrait atteindre jusqu'à 100 000 m<sup>3</sup>/jour. Ce méga-transfert, Sud-Sud, dont le coût est évalué à trois milliards de dollars selon le MRE est un réseau de transfert d'eau reliant sur quelques 770 km, In Salah à la ville de Tamanrasset, située dans l'extrême sud algérien. Ce réseau d'acheminement comporte :

- deux champs de captage d'eau, à partir de la nappe albiennienne, constitué de 24 forages de 600 ml de profondeur (Figure III.9);
- un réseau de collecte des eaux de forage d'un linéaire total de plus de 100 km ;
- ces eaux sont stockées, dans un premier temps, dans un réservoir de tête de 50 000 m<sup>3</sup>. Ce réservoir « tampon » alimentera la future station de déminéralisation.

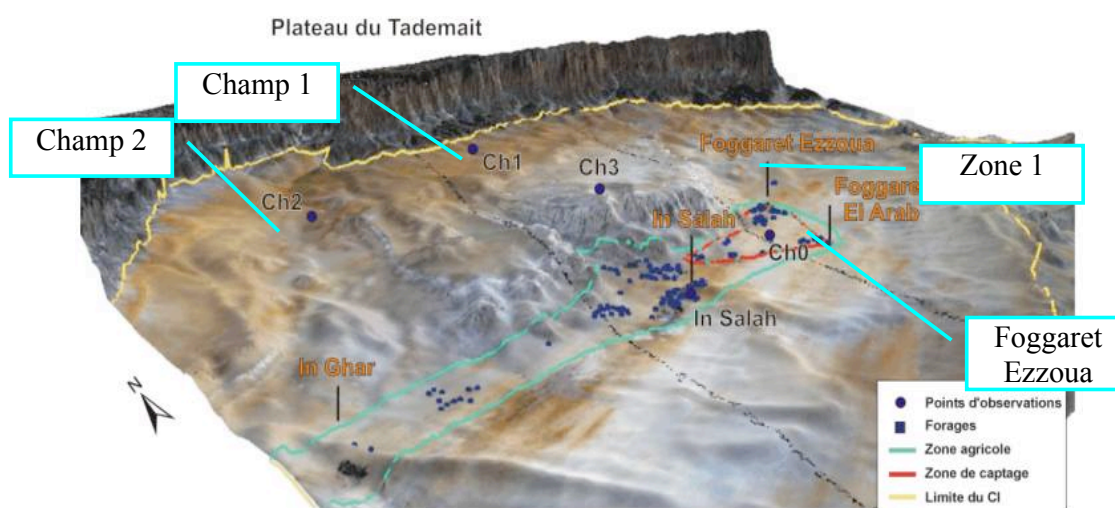


Figure III.9 : Les champs de captage (MRE 2013)

Le transport de l'eau se fait sur 1258 km de conduites réparties comme suit (Figure III.10) :

- 214 km en écoulement gravitaire, diamètre 1200 mm ;
- 1044 km, deux fois 522 km, (diamètre 700 et 800 mm) en refoulement.

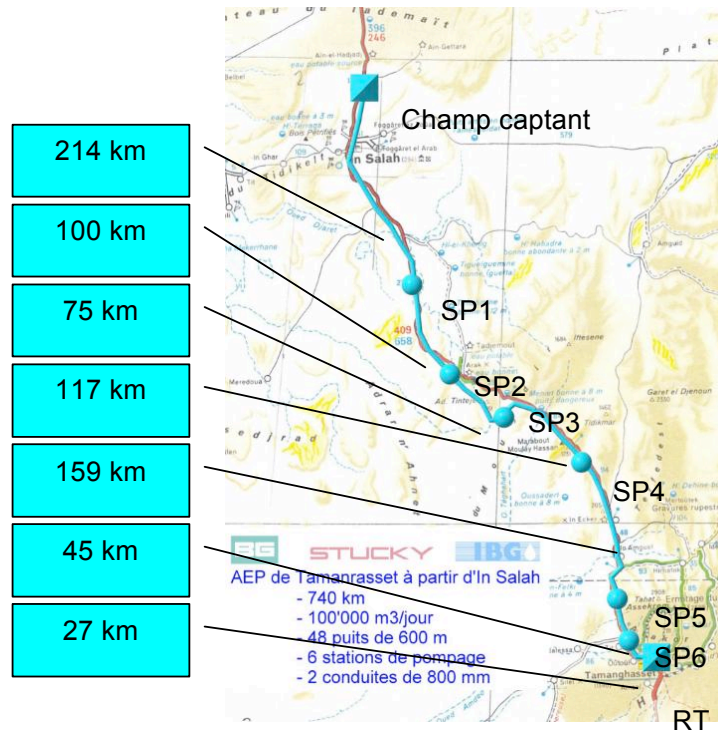


Figure III.10 : Stations de pompage et longueur des tronçons de conduite (MRE 2013)

Le refoulement est assuré par six stations de pompes réparties à HTM égales (environ 180 m) le long du parcours. Notons que l'eau met 13 jours pour arriver à Tamanrasset ! Il est à noter, également, qu'entre la première station de pompage qui est à 305 m d'altitude et le second réservoir « tampon » de 50.000 m<sup>3</sup> situé à Tamanrasset qui est à une altitude de 1406 m, le dénivelé est de 1101 m. Ce qui est énorme et consomme beaucoup d'énergie. De plus, l'ensemble des stations est loin de tout réseau d'alimentation électrique, c'est pourquoi chaque station est équipée de trois puissants groupes motopompes alimentés au diesel (convertibles au gaz naturel). Cette conversion sera possible dès que le projet de l'installation d'un gazoduc le long de la conduite sera réalisé. Le mieux c'est de profiter de l'atout majeur de la région que sont les 3500 heures d'ensoleillement par an donnant plus de 2650 (KWh/m<sup>2</sup>/an) pour réduire la facture énergétique (MEM 2013). Le solaire pourrait être combiné à l'éolien. En effet, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune, au niveau des champs captant d'In Salah, qui est à une altitude de 438 m, sont à l'étude pour contribuer à la réduction de la consommation des énergies fossiles. Il en est de même pour les six stations de pompage qui sont toutes en altitude ayant donc des vitesses de vent favorables.

Ce transfert répond aux besoins en eau potable de la ville de Tamanrasset et des villages existants situés le long du tracé. L'état algérien espère voir naître de nouveaux centres de vie le long du tracé. C'est pourquoi les besoins sont estimés, à l'horizon 2050, à 90.000 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une population de 340 000 habitants ayant une dotation unitaire de 265 l/j/hab. Pour ce faire, un troisième champ captant est prévu.

**Figure III.11.** Transfert Sud-Nord (MRE 2013)

Pour le transfert Sud-Nord à partir de la nappe albienne, un projet de transfert d'eau de la région d'El-Goléa vers les Hauts Plateaux est en cours d'étude. À partir de l'Oued Mehiguen (Nord d'El-Goléa), l'eau saumâtre déminéralisée est transférée vers Djelfa, le Sud de Msila, le Sud de Tiaret et vers Sétif pour permettre le développement de l'agriculture et de l'élevage dans ces régions pastorales des Hauts Plateaux (Figure III.11). Ce sont là des objectifs stratégiques pour assurer la sécurité alimentaire du pays. Ainsi, à titre d'exemple, en aménageant de grands transferts vers les wilayas de Sétif et de Djelfa, le gouvernement entend faire de ces deux wilayas des zones productrices de céréales, appelées à produire à partir de 2014, 20 % des besoins du pays en la matière.

### III.7. REUTILISATION DES EAUX USEES

Dans ce contexte comment ne pas parler, un tant soit peu, du transfert et de la mobilisation des eaux usées épurées. En effet, quand les ressources en eaux conventionnelles ne suffisent pas et, pour répondre aux besoins du secteur agricole, qui est un secteur grand consommateur d'eau, le MRE a développé une nouvelle stratégie qui est celle de la réutilisation des eaux usées épurées issues des STEP dans les régions enclavées (et pas seulement). Ces eaux peuvent être utilisées pour, principalement, l'irrigation, le secteur industriel et, moyennant d'autres traitements (biologiques) pour les municipalités. Tout cela se fait selon les arrêtés interministériels publiés le 15 juillet 2012 qui ont fixé respectivement la liste des cultures autorisées et les spécifications normatives de qualité des eaux usées purées.

Nous avons en Algérie 20 Stations d'épuration (STEP) qui produisent 12 260 hm<sup>3</sup>/an pour irriguer près de 20 000 ha, ce qui est loin d'être négligeable. À cela s'ajoutent :

- le transfert et la mobilisation de 31 hm<sup>3</sup>/an d'eaux usées épurées par la STEP de Baraki (Alger) dans le barrage Barek (Blida), pour l'irrigation de 6.000 ha situés à l'Est de la plaine de la Mitidja. L'utilisation de cette ressource d'eau non conventionnelle permet de soulager la nappe de la Mitidja ;
- le transfert et la mobilisation de 42 hm<sup>3</sup>/an d'eaux usées épurées par la STEP de Annaba dans le barrage Koudiet Mahcha (Annaba), pour l'irrigation de 9 000 ha, et pour les besoins des complexes industriels de « Metal Steel d'El Hadjar » et de « Fertial ».

D'autres STEP sont à l'étude et doivent être réalisées ces prochaines années.

### III.8. CAPACITE DE MOBILISATION DE L'ALGERIE

Alors qu'en 1962, il n'existait que treize barrages permettant de stocker 450 millions de m<sup>3</sup> d'eau destinée essentiellement à l'irrigation des plaines agricoles de l'Ouest du pays, on en dénombre actuellement 70 pour une capacité globale de 7,3 milliards de m<sup>3</sup> d'eau. Si les constructions en cours se déroulent comme prévues, on devrait avoir 84 en 2016, pour une capacité de stockage évaluée à 8,4 milliards de m<sup>3</sup>. Afin de mobiliser de nouvelles ressources en eau, l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) a engagé d'importants moyens pour améliorer le rendement des exploitations déjà existantes et a réalisé de nouveaux ouvrages hydrauliques (25 nouveaux barrages ont été réalisés ces dix dernières années).

Les barrages répondent à deux enjeux majeurs auxquels l'Algérie doit faire face : la mobilisation de nouvelles ressources pour l'alimentation en eau potable et industrielle et l'irrigation.

Les potentialités en eau de l'Algérie sont estimées à 18 milliards de m<sup>3</sup>/an répartis comme suit :

- 12,5 milliards de m<sup>3</sup>/an dans les régions Nord dont 10 milliards en écoulements superficiels et 2,5 milliards en ressources souterraines (renouvelables) ;
- 5,5 milliards de m<sup>3</sup>/an dans les régions sahariennes dont 0,5 milliard en écoulements superficiels et 5 milliards en ressources souterraines (fossiles) (*Morgan et al, 2013*).

Pour illustrer ce que l'on a présenté, nous avons étudié un cas pratique de dessalement d'eaux saumâtres du Sud algérien. Nous avons mené des expériences sur un pilote dans un laboratoire en Grèce et nous présentons les résultats obtenus dans le chapitre « Partie expérimentale » qui suit.

# **Chapitre IV**

## **Partie expérimentale**

## IV.1 INTRODUCTION

Le désert du Sahara, qui couvre la plus grande partie, environ 80% du territoire du Sud de l'Algérie, est une région aride caractérisée par un grand manque d'eau potable. C'est principalement pour cette raison que, plus de 80% de la population vit dans la partie Nord du pays qui couvre donc, approximativement, 20% du territoire (*Mahmoudi et al, 2009a*). À cause de ces pénuries persistantes d'eau douce et d'énergie, les populations ont migrées, des régions éloignées et inhospitalières du Sud vers les régions du Nord plus clémentes (*Mahmoudi et al, 2009b*). Dans un souci d'équité et pour tenter d'atténuer ce flux migratoire, le gouvernement algérien a lancé un programme très ambitieux pour la déminéralisation, sur site, des eaux saumâtres, très abondantes dans la région, et leur transfert vers les diverses populations vivant disséminés dans le Sahara.

Le transfert le plus important et qui est considéré comme étant le projet du siècle est donc celui qui transfère, d'In Salah vers Tamanrasset, plus au sud, à 736 Km, les eaux saumâtres la nappe aquifère. Cette nappe découverte en 1954 dans le nord du Sahara, et qui est communément appelée nappe aquifère albiennaise (*Abid et al, 2010 ; MRE, 2013*) est un réservoir géothermique immense. En effet, la température de l'eau varie, selon la profondeur, de 35 à 70 °C. Ce réservoir qui s'étend sur, approximativement, 1 million de km<sup>2</sup>, est commun à l'Algérie, la Tunisie et à la Lybie. Sa plus grande partie, environ 700.000 km<sup>2</sup> est sur le territoire algérien. Les gens de la région consomment cette eau qui, mis à part sa faible salinité (0.35 g/l), est d'assez bonne qualité (*MRE, 2013*).

Cette eau, à faible salinité, ne constitue pas un problème de santé publique mais, pour la rendre potable et de bonne qualité, la construction d'une usine de déminéralisation, à techniques membranaires modernes, s'avère être nécessaire et constitue une perspective attrayante : c'est ce que notre gouvernement s'est engagé à faire.

Le projet consiste donc, à extraire cette eau de la région d'In Salah, qui est dans la région la plus septentrionale de la nappe, de la déminéraliser et de la transférer vers la mégapole de Tamanrasset qui se trouve à 736 Km plus au Sud (*MRE, 2013 ; Drouiche et al, 2011 ; Drouiche et al, 2012*). Compte tenu de la très grande capacité de la nappe albiennaise, on prévoit d'augmenter considérablement son exploitation dans les prochaines années afin de répondre aux problèmes de rareté de l'eau dans la région. La rareté de l'eau risque de devenir plus sévère à cause des changements climatiques (*Drouiche et al, 2012 b*). C'est pourquoi, les politiques d'exploitation de ce réservoir devraient être appropriées et bien établies afin d'optimiser son exploitation, assurer sa pérennité et éviter sa pollution.

**Remarque :** La décision prise ces derniers temps par les politiques algériens de passer à l'exploitation des gaz de schiste n'est pas de bonne augure pour l'intégrité de la nappe albienne. En effet, le gaz du schiste est du gaz naturel piégé dans le sous-sol à de grandes profondeurs, et qui peut en être extrait grâce à la fracturation hydraulique, un procédé qui consiste à créer des fissures souterraines et y infiltrer un mélange d'eau, de sable et de produits chimiques. L'étanchéité des puits n'étant pas assurée à 100%, ces produits chimiques risquent ainsi de polluer la nappe albienne d'une façon irréversible !

À cet égard, l'élaboration d'un plan d'exploitation complet est nécessaire, et en particulier pour la conception des installations de dessalement par membranes. Il faut examiner les questions importantes et les répercussions, de telles installations, sur l'économie et sur l'environnement.

Les plus grands problèmes environnementaux, à l'heure actuelle, liés aux usines de dessalement sont :

- la gestion et/ou l'élimination de la rétention/saumure après la production de l'eau potable (*El Kharraz et al, 2012 ; Shulman et al, 2011 ; Singh et al, 2009*) et ;
- la réduction de la consommation d'énergie en utilisant, partiellement ou totalement, les énergies renouvelables (*Ghaffour et al, 2013 ; Cipollina et al, 2012 ; Ruth et al, 2013*).

Dans notre cas, il est clair que ces préoccupations ont pour but :

- de conserver de la ressource aquifère albienne et ;
- d'éviter sa pollution pour ne pas altérer la bonne qualité de l'eau.

À ces préoccupations qui sont d'une importance capitale vient s'ajouter les soucis de réduire la consommation d'énergie et de réduire le coût d'exploitation.

Dans ce chapitre, nous détaillons comment atteindre ces objectifs en traitant les principaux facteurs impliqués dans la conception des installations de dessalement à membranes pour le traitement des eaux saumâtres. Pour que l'exploitation de l'aquifère soit optimale, on doit cerner les fourchettes des valeurs de conception et des paramètres de fonctionnement appropriés.

Dans un premier temps, les considérations fondamentales de conception d'installations de dessalement seront examinées, leurs impacts sur cette conception seront développés par la suite.

La mise en œuvre de ces critères est démontrée en récapitulant les résultats d'une étude de cas typique, impliquant la conception d'une usine de production d'eau potable installée à In Salah.

Cette usine fonctionnerait selon le principe du dessalement partiel, c'est-à-dire, mélanger, dans des proportions bien définies, l'eau de l'aquifère avec une quantité d'eau préalablement dessalée. Les expériences qui nous ont permis d'étayer cette étude sont présentées. Enfin, une analyse des coûts d'une telle installation est présentée ainsi que la possibilité d'une exploitation intégrée de la chaleur de ces eaux géothermiques.

## **IV.2. CARACTERISTIQUES DE L'EAU DE LA NAPPE ALBIENNE ET NORMES DE POTABILITE**

Le Système Albien du Sahara Septentrional (SASS) est un vaste réservoir fossile, on l'appelle « Albien » eut égard à l'âge des roches de grès qui le constituent. À vrai dire, ces eaux ne sont pas tout à fait fossiles puisque des études ont été menées en 2005 par *Mohamedou Ould Baba Sy (2005)* de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et ont prouvées qu'il y a un léger renouvellement par le biais des eaux de pluies. Mais vu la faible pluviométrie de la région, cet apport est vraiment négligeable.

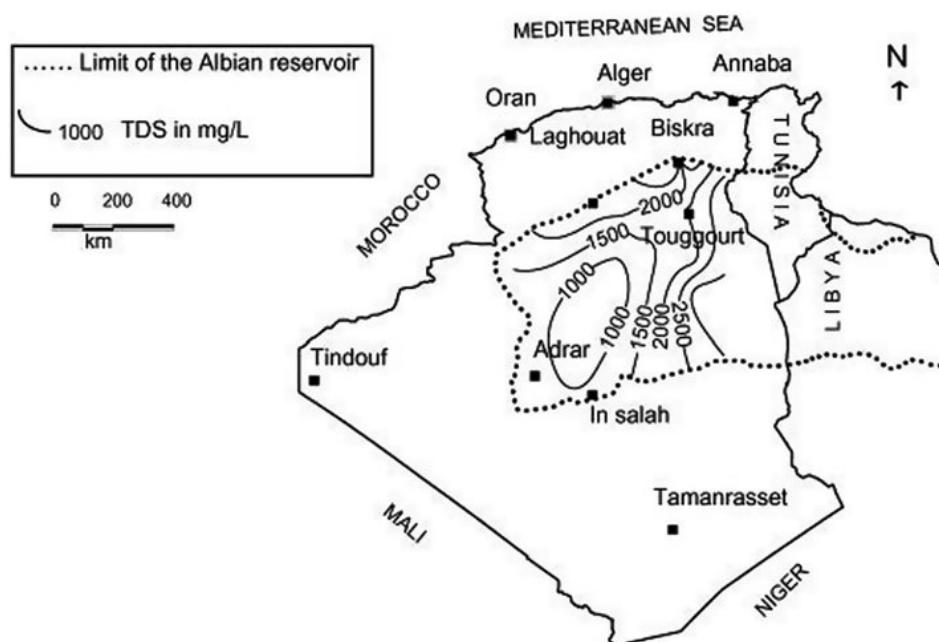
Avec ses 60.000 milliards de m<sup>3</sup> d'eau saumâtres, ce réservoir se classe comme l'un des plus grands systèmes d'eau souterraine dans le monde. Il s'est constitué il y a plus de 10.000 ans. Il est composé, principalement, de deux réservoirs, le « continental intercalaire » et le « complexe terminal ». Il recouvre une superficie d'environ 1 million de km<sup>2</sup>, qui est partagée entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, comme indiqué sur la figure 1. La profondeur du réservoir varie entre 400 m à l'ouest à plus de 1800 m à l'est (*Ghaffour et al, 2011*). Des puits plus profonds peuvent nous fournir de l'eau avec un débit de 100-400 l/s et un TDS (Total Dissolved Solids) moyen de moins de 2 g/L.

La plus haute température de refoulement peut atteindre 73 °C (*Ghaffour et al, 2011*). Une récente étude menée par *Guendouz et Michelot (2006)* montre que les principales concentrations d'ions ainsi que la conductivité de l'eau de la nappe aquifère albienne ont tendance à augmenter le long de la direction principale d'écoulement qui est d'Ouest en Est (c'est-à-dire, des montagnes de l'Atlas en Algérie, jusqu'au Golfe de Gabès en Tunisie). Cela laisse supposer que la minéralisation de l'eau dans le réservoir augmente, par dissolution, apparemment en raison d'une grande interaction eau-roche.

L'eau saumâtre objet de cette étude est pompée donc à partir de 48 puits, dans un espace d'environ de 4 ha à Oued Rjem qui est situé à 70 km au Nord d'In Salah (Figure IV.1).

L'eau est collectée dans un grand réservoir de 50.000 m<sup>3</sup> avant son transfert, plus au sud, vers Tamanrasset, par le biais d'une double canalisation de 736 km.

Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux saumâtres, utilisées pour les besoins de ce travail, figurent dans le tableau IV. 1. À titre de comparaison avec les critères d'acceptabilité définis par les normes algériennes d'eau potable, il apparaît que la conductivité de l'eau de la nappe aquifère albiennne est proche de la valeur maximale admissible, qui est de 2,8 mS/cm (voir tableau IV.1). Les concentrations de calcium, de chlorure, et de magnésium sont inférieures aux limites des normes algériennes contrairement aux concentrations des ions de sodium et de sulfate qui excèdent ces limites (*MRE, 2013*). Ces dépassements ne sont pas considérés comme causant un problème de santé publique, mais ils donnent un goût désagréable à l'eau. Par ailleurs, l'exploitation à long terme de l'aquifère albien risque de conduire à une augmentation de la salinité de l'eau, peut-être jusqu'à une valeur maximale de 3,2 g/L (*MRE, 2013*). C'est pourquoi, le dessalement semble être une solution inévitable pour améliorer la qualité de l'eau potable et à faire face à l'augmentation, éventuelle, de la salinité de ces eaux souterraines.



**Figure.VI.1.** Carte simplifiée du réservoir albien indiquant les contours d'égalité des concentrations TDS en [mg/l] (*Kedaid et al, 2007*).

On remarquera que la région d'In Salah est celle où le TDS est le plus bas, environ 1000 mg/L. En ce qui concerne la réinjection de la saumure dans le réservoir, dont il sera

question par la suite, aucun impact significatif n'est attendu même si sa concentration est le double de celle de l'eau de la nappe (actuellement inférieure à 2 g/L), à condition qu'aucuns autres produits chimiques n'y soient ajoutés.

**Tableau IV. 1** : Analyses chimiques de l'eau de l'aquifère albien (site d'In Salah) (MRE, 2013) et les normes d'eau potable en Algérie (JORDP, 2013).

Paramètres	Unité	Valeur	Normes algériennes
Température	°C	<b>34.3</b>	25
pH	-	6.91	$\geq 6.5$ and $\leq 9$
Turbidité	NTU	0.15	5
Alcalinité CaCO <sub>3</sub>	mg/L	-	500
Conductivité	mS/cm at 20°C	<b>2.94 / 3.14</b>	2.8
Cl	mg/L	495.00	500
Na	mg/L	<b>298.50</b>	200
K	mg/L	<b>22</b>	12
Ca	mg/L	172.33	200
SO <sub>4</sub>	mg/L	<b>567.33</b>	400
NH <sub>4</sub>	mg/L	<b>0.06</b>	0.5
Ba	mg/L	-	0.7
B	mg/L	-	1
Fe	mg/L	<b>0.044</b>	0.3
F	mg/L	0.56-0.63	1.5
Mn	μ g/L	0.014	50
NO <sub>3</sub>	mg/L	27.73	50
P	mg/L	<b>25.97</b>	5
As	μ g/L	0.0009	10
Mg	mg/L	63 / 88	150

### IV. 3. CRITÈRES DE BASE POUR LA CONCEPTION D'UNE INSTALLATION DE DESSALEMENT

Dans la formulation des critères de conception d'une usine de dessalement des eaux saumâtres du réservoir albien géothermique, les considérations primordiales sont liées à la nécessité d'une gestion optimale de ce réservoir, et plus précisément:

- de prolonger autant que possible l'exploitation de la nappe albienne dans des conditions qui permettent de préserver la bonne qualité de l'eau du réservoir ;
- d'élaborer des plans d'exploitation, économiquement optimaux, de la nappe aquifère.

Compte tenu de ces considérations générales, les objectifs de base pour la conception de notre installation de production d'eau potable doivent inclure :

- la réduction de la saumure, surtout que dans notre cas l'installation étant enclavée, sa réinjection dans le réservoir semble être la seule solution ;
- la non utilisation, pour le prétraitement de l'eau, de produits chimiques qui finiraient par être réinjectés, avec la saumure, dans la nappe, risquant ainsi de dégrader, à long terme, la qualité de l'eau du réservoir ;
- l'exploitation de la géothermie de l'eau du réservoir (34,5 °C) pour améliorer le coté économique du projet.

Pour atteindre ces objectifs et, vu la bonne qualité de l'eau de l'aquifère albien, on opte pour la solution qui consiste à mélanger l'eau du réservoir avec de l'eau dessalée (*Blending*). Ce mélange se fait à des proportions appropriées qui puissent satisfaire les normes internationales de qualité de l'eau potable, normes qui sont plus strictes que celles admises en Algérie (tableau IV.1).

En optant pour cette solution et en veillant à ce que la saumure réinjectée dans la nappe soit de bonne qualité, c'est à dire exempte de tous produits chimiques, l'usine de dessalement n'aurait, de cette manière, aucun impact négatif sur l'environnement. De plus, pour optimiser le coté économique de cette configuration, il est impératif de rechercher le taux de recouvrement maximum au niveau de la membrane.

#### IV. 3.1. Considérations de conception d'usines de dessalement

Vu la faible salinité de l'eau d'alimentation, on prévoit son traitement en utilisant la technique dite d'osmose inverse à basse pression LPRO (*Low Pressure Revers Osmosis*).

Cette technique utilise des membranes appropriées peu énergivores, ce qui conduit à un coût énergétique minimal.

Concernant l'optimisation du taux de recouvrement du perméat, on ne peut pas dépasser certaines limites imposées par la tendance naturelle de la membrane à s'encrasser (fouling) suite à son rôle de rétention qu'on lui demande de jouer. Dans notre cas, cet encrassement est dû essentiellement à la présence, à des taux qui dépassent les limites de saturation, de sels de calcium modérément solubles. Il s'agit principalement du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et du phosphate de calcium  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ .

Compte tenu du faible pH (6,9) de l'eau de la nappe aquifère albienne, la meilleure approche pour augmenter le taux de recouvrement semble être l'acidification de l'eau d'alimentation, évitant ainsi l'utilisation d'antitartres synthétiques qui sont des éléments polluants et indésirables.

Ainsi, pour optimiser la conception de notre installation de dessalement, il est évident que l'on doit s'efforcer de parvenir à la réduction des coûts de production (grâce à la minimisation des coûts de l'énergie spécifique et des charges fixes) avec une utilisation minimum de l'acide, juste la quantité qui permettrait un bon fonctionnement de l'usine avec des taux de réinjection du retentat acceptables.

#### **IV.4. EXPÉRIENCES PILOTES EN LABORATOIRE**

À partir des analyses de l'eau de la nappe albienne en notre possession, nous avons synthétisé, dans ses principaux composants, une eau similaire avec laquelle nous avons mené nos expériences dans le Laboratoire de Ressources Naturelles et Énergies Renouvelables sis au Centre de Recherche et Technologie de Hellas (CERTH) en Thessalonique en Grèce. Une série d'essais, avec une eau de salinité similaire à celle de l'eau du réservoir albien, a été réalisée à l'aide d'un pilote complètement assisté par ordinateur. Ce pilote utilise une membrane enroulée en spirale, elle est de marque DOW-Filmtec 2,5 « *low energy brakish water RO* » Réf : XLE 2540. Elle a une superficie de 2.6 m<sup>2</sup> et est conçue spécialement pour la technique de RO à basse pression (LPRO).

L'objectif de ces essais est d'étudier les performances de la membrane, c'est-à-dire, évaluer le taux de conversion en fonction de la pression d'alimentation, la qualité de l'eau dessalée, les chutes de pression, le tout, sous divers pressions de fonctionnement et débits d'alimentation.

Ces données sont nécessaires pour guider la sélection, dans une fourchette étroite, des valeurs de conception des éléments de dessalement ainsi que des paramètres de fonctionnement.

#### IV. 4.1. Usine pilote expérimentale

Les expérimentations de dessalement par RO ont donc été menées au CERTH dans un pilote laboratoire (voir figure IV.2). Le schéma de principe est illustré par la figure. IV.3 Bien que le pilote peut recevoir trois membranes, nous n'avons utilisé qu'une seule qui, d'après le constructeur, présente un taux de rejet d'ions plutôt élevé et une bonne perméabilité : ceux sont là les exigences pour la technique « basse pression ». À partir d'un réservoir d'alimentation de 40 L et en utilisant une pompe à haute pression entraînée par un moteur à courant continu, la solution d'alimentation est acheminée vers l'enceinte pressurisée (vessel) contenant l'unique membrane.



**Figure IV.2.** Photos du pilote (RO)

Des capteurs de pression (PI-1 et PI-2) situés à l'entrée et à la sortie de l'enceinte pressurisée ont été utilisés pour un enregistrement en continu de la pression d'alimentation et de la pression du retentat. Les flux du perméat et du retentat sont contrôlés par des débitmètres numériques (FI-1 et FI-2). La qualité du flux du perméat a été caractérisée en termes de conductivité qui est mesurée en continu. La conductivité nous renseigne sur l'activité ionique de la solution ce qui nous permettra d'évaluer le TDS (Total Dissolved Solids) qui est un paramètre influant dans le dimensionnement d'une station de dessalement. La température est maintenue constante à  $25 \pm 0,1$  °C grâce à un échangeur de chaleur à plaques (GEA PHE) relié à un refroidisseur à eau via une vanne de régulation de débit (CV-4).

Un logiciel d'automatisation (GeniDAG 4.25) a été utilisé pour contrôler le fonctionnement du système de pilotage.

Ainsi, les grandeurs réglées sont :

- le taux de débit du retentat, ajusté par le biais d'une vanne de régulation de débit (CV-2) et ;
- la pression appliquée à l'entrée de la membrane.

Alors que les valeurs des paramètres mesurés sont :

- le taux du flux du perméat et ;
- la pression à la sortie du retentat (PI-2).

Le contrôle de la pression appliquée dans l'enceinte est réalisé en ajustant la vitesse de rotation de la pompe par l'intermédiaire d'un potentiomètre (la pompe étant entraînée par un moteur à courant continu). De cette manière, il a été possible de déterminer les performances les plus importantes de la membrane telles que :

- la chute de pression au niveau de la membrane ;
- le taux de rejet du retentat et ;
- le taux de conversion du perméat.

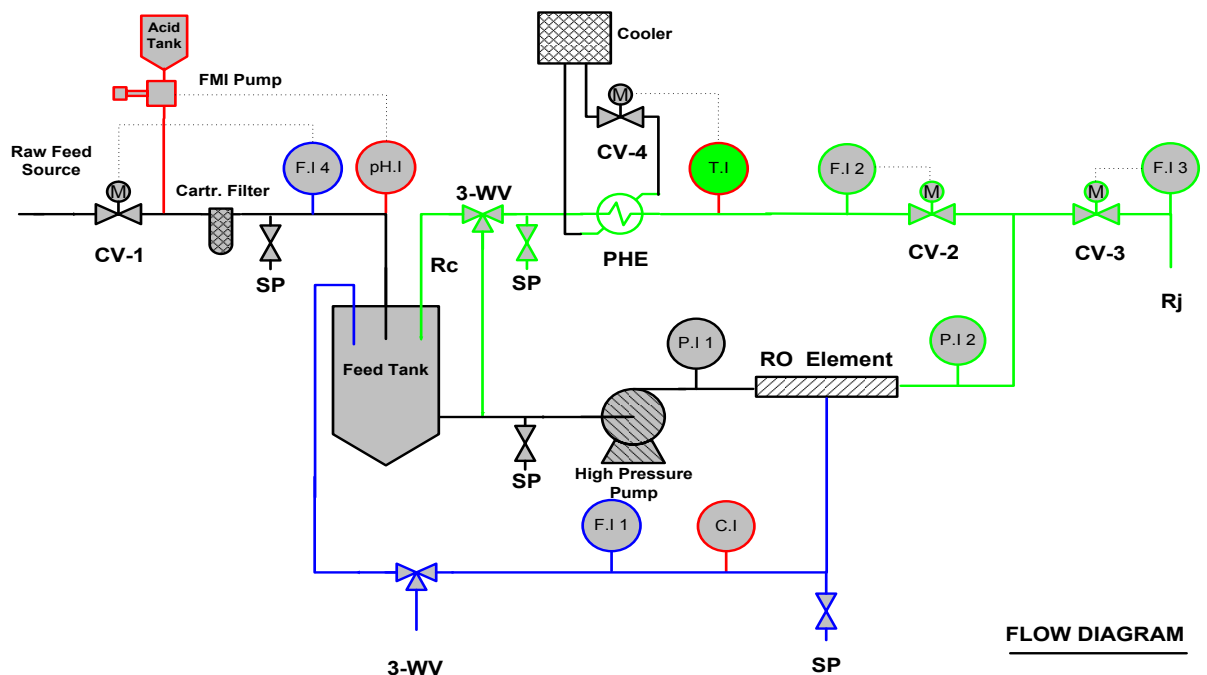
Comme on le verra par la suite, ces données ont été comparées avec les prédictions simulées à partir d'un logiciel commercial approprié, le logiciel ROSA (Reverse Osmosis System Analysis), du concepteur Dow (*Dow corporation, 2013*). Ce logiciel permet de prévoir et d'optimiser aisément et rapidement la performance des membranes (DOW Filmtec) pour des

systèmes spécifiques. Le programme ROSA comprend une bibliothèque interactive de données techniques permettant aux concepteurs et aux spécificateurs de disposer des informations les plus complètes et les plus précises possibles.

Cela va nous permettre d'évaluer les performances de ce type de membrane dans les conditions appropriées pour le dessalement de l'eau saumâtre de la nappe aquifère albienne.

Au cours de nos essais de dessalement, tout en recyclant le flux du perméat et celui du concentrat dans le réservoir d'alimentation, des échantillons de perméat sont prélevés régulièrement afin d'en déterminer les caractéristiques. De plus, avant la première utilisation et, préalablement à chaque essai de filtration, la membrane est remise en condition pour atteindre la stabilité de ses performances. Ceci a été réalisé en injectant, pendant une période suffisante (plus de 2 heures), de l'eau distillée sous une pression appliquée et à une vitesse du flux transmembranaire identique à celle des conditions d'essais. Dès que la membrane est nettoyée, le pilote est alors prêt pour l'essai suivant. Par la suite, une solution concentrée de chlorure de sodium a été diluée dans le réservoir d'alimentation avec de l'eau du robinet pour obtenir une eau d'alimentation ayant une conductivité proche de celle de l'eau de la nappe albienne. Cette reconstitution a pu être réalisée car, d'une part, on connaît les pourcentages des différents composants de l'eau de la nappe albienne (voir tableau IV.1) et, d'autre part, les caractéristiques de l'eau du robinet (Sioutopoulos et al, 2012).

Une série de tests ont été menée en imposant des couples de valeurs de la pression appliquée et de la vitesse du flux transmembranaire. Les conditions expérimentales et les données correspondantes sont consignées dans le tableau IV. 2



**Figure. IV.3.** Diagramme schématique de l'unité pilote pour la performance des essais de dessalement (Moudjeber et al, 2014).

**Tableau IV.2 :** résultats expérimentaux de dessalement de l'eau saumâtre avec un élément LPSWM unique dans une unité pilote; salinité de l'eau ~ 1827 mg / L (*Moudieber et al, 2014*).

N°	Débit d'alimentation [m <sup>3</sup> /jour]	Pression à l'entrée [psi]	Débit du perméat [m <sup>3</sup> /jour]	Flux du perméat [L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Taux de conversion [%]	Débit du concentrat [m <sup>3</sup> /jour]	Vitesse trans-membranaire [cm/s]	Perte de charge [psi]	Taux de rejection des sels [%]
1	14.63	90.9	1.96	31.4	13.4	12.67	17.5 (20.2)	4.0	96.6
2	14.55	78.5	1.70	27.2	11.7	12.85	17.7 (20.0)	3.8	96.2
3	14.99	74.5	1.57	25.0	10.8	12.92	17.8 (20.7)	4.0	96.0
4	13.96	91.5	2.01	32.4	4.4	11.95	16.5 (19.2)	3.0	96.6
5	13.66	81.5	1.75	28.1	12.8	11.91	16.4 (18.8)	3.0	96.3
6	13.60	74.5	1.59	25.5	11.7	12.01	16.6 (18.7)	3.0	96.0
7	17.65	79.5	1.66	26.65	9.42	15.98	22.02 (24.3)	7.0	96.3
8	16.25	79.5	1.71	27.35	10.50	14.54	20.04 (22.4)	5.5	96.3
9	12.55	79.5	1.75	28.04	13.94	10.80	14.88 (17.3)	2.1	96.3

#### IV.4.2. Performances des membranes à basses pression LPRO, effet de la vitesse du flux transmembranaire

Lors de ces tests, une attention particulière a été accordée aux effets:

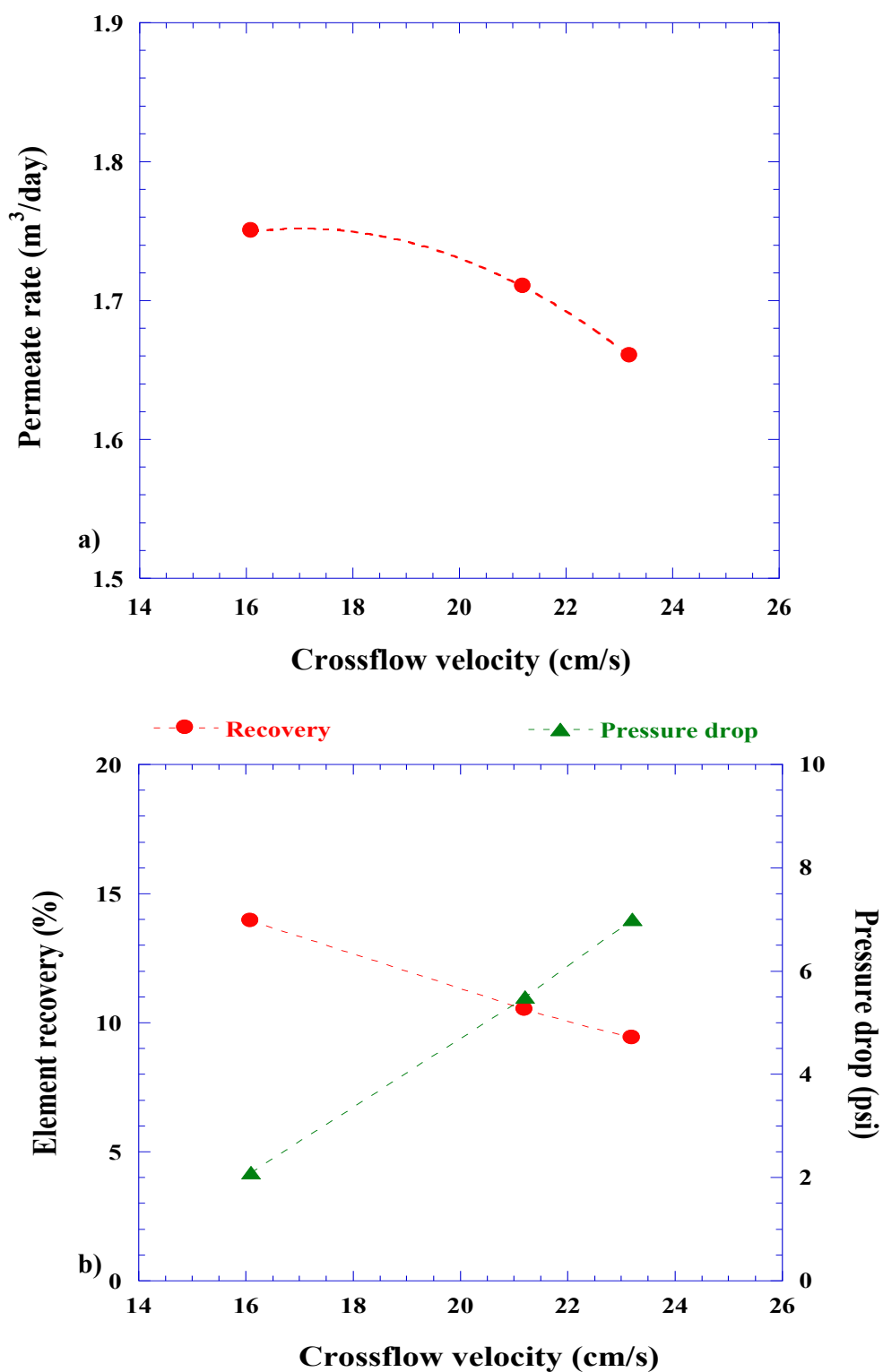
- du taux de la vitesse du flux transmembranaire ;
- du taux de conversion et ;
- de la chute de pression (pertes de charges) à la sortie de la membrane.

Ce dernier effet est très important vu le bas niveau de la pression de fonctionnement de la membrane. Pour faciliter la comparaison des différents essais, la pression appliquée dans l'enceinte a été maintenue constante à environ 80 psi (= 5.51 bar). Ce dernier point est réalisé en ajustant le fonctionnement de la pompe haute pression par le biais du potentiomètre qui commande le moteur à courant continu.

Les Figure. IV.4 (a et b) représentent les variations, du débit de perméat, du taux de conversion de la membrane basse pression (LPSWM), ainsi que l'évolution de la chute de pression au niveau de la LPSWM, le tout en fonction de la vitesse du flux transmembranaire. On remarque qu'il y a une augmentation importante de la vitesse du flux transmembranaire quand il y a une grande réduction, à la fois, du débit de perméat et du taux de conversion.

Cet état de fait est dû à l'augmentation, relativement importante, de la perte de pression dans l'élément LPSWM quand la vitesse du flux transmembranaire augmente (Figure. IV.4 (b)), ce qui réduit la pression transmembranaire effective le long de l'élément. Une étude récente (*Karabelas et al, 2014*) a mis en relief la sensibilité du rendement d'une membrane LPSWM aux variations de la chute de pression qui occurrent lors d'une opération de dessalement.

Dans les données de la Figure IV. 4 (b), on constate une légère augmentation de la vitesse moyenne du flux transmembranaire, de 16 à 24 cm/s (valeur moyenne entre les vitesses à l'entrée et à la sortie de l'élément LPSWM). Ce qui conduit à une augmentation de la chute de pression de plus que le triple : de 2 à 7 psi. Cette situation était prévisible, car la chute de pression dans les éléments LPSWM est fortement dépendante de la vitesse du flux transmembranaire (*Koutsou et al, 2007 ; Parkhurts et al, 1999*).



**Figure IV. 4.** Les données expérimentales sur l'effet de la vitesse du courant transversal sur la performance de la membrane.

Effet sur : a) taux du perméat d'une membrane (LPSWM) et ;  
b) le taux de conversion et chute de pression.

La vitesse du courant transversal tracé est une valeur moyenne de la vitesse transversale entre l'entrée et la sortie de la membrane LPSWM (Moudjeber et al, 2014).

Il est intéressant de noter que, les fluctuations de la vitesse du flux transmembranaire ne semblent pas affecter le rejet de sel de la membrane puisque ce dernier reste constant à environ 96,3%. Ce qui suggère que, dans la gamme des conditions de tests, la réduction attendue de la concentration de polarisation due à l'augmentation de la vitesse du flux transmembranaire (Koutsou *et al*, 2009) ne conduit pas à une amélioration significative du rejet moyen de sel dans cet élément particulier LPSWM.

#### IV.4.3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les simulations

Les prédictions de performances de dessalement, en ce qui concerne l'élément LPSWM de tête, dans une enceinte pressurisée à multiéléments, ont été effectuées en utilisant le logiciel de conception « ROSA » (Dow corporation, 2013). Afin de les comparer avec les essais obtenus avec le pilote, les données d'entrée pour l'élément utilisé, Filmtec XLE 2540, ainsi que la composition typique de l'eau de la nappe aquifère albienne (énumérée dans le tableau 1) ont été utilisées dans les calculs. Les résultats des prédictions avec ROSA pour deux enceintes ayant des taux de conversion de 60% et 65%, en une seule passe, sont récapitulés dans le tableau IV. 3.

Pour chaque taux de conversion, trois scénarios différents ont été examinés en jouant sur le nombre d'éléments LPSWM par enceinte pressurisée. On a ainsi déterminé les paramètres de rendement des membranes LPSWM dans les cas où on place 5, 6 et 7 éléments par enceinte.

Il convient de souligner qu'en lançant les calculs par le biais de ROSA, un type de procédure "d'optimisation" a été suivi par lequel, pour un taux de recouvrement donné, le nombre minimal d'enceinte pressurisée a été choisi. Cela s'est fait sans faillir aux critères de conception ou à d'autres restrictions imposées par le logiciel (Dow corporation, 2013).

Pour que la comparaison ait un sens, les simulations à l'aide du logiciel ROSA ont été effectuées avec la même pression appliquée à l'entrée de l'élément de la membrane et avec la même vitesse du flux transmembranaire que celles appliquées lors des tests sur le pilote. En outre, il convient de noter que les caractéristiques de performance présentées dans le tableau IV. 3 correspondent au premier élément de chaque enceinte pressurisée de l'unité de dessalement, ce qui correspond à l'élément unique, la LPSWM, du pilote en laboratoire. Dans la Figure. IV. 5, les valeurs du taux de perméat sont présentées en fonction de la pression appliquée à l'entrée de l'enceinte, pour deux vitesses du flux transmembranaire obtenues des prédictions du logiciel ROSA et de l'expérience.

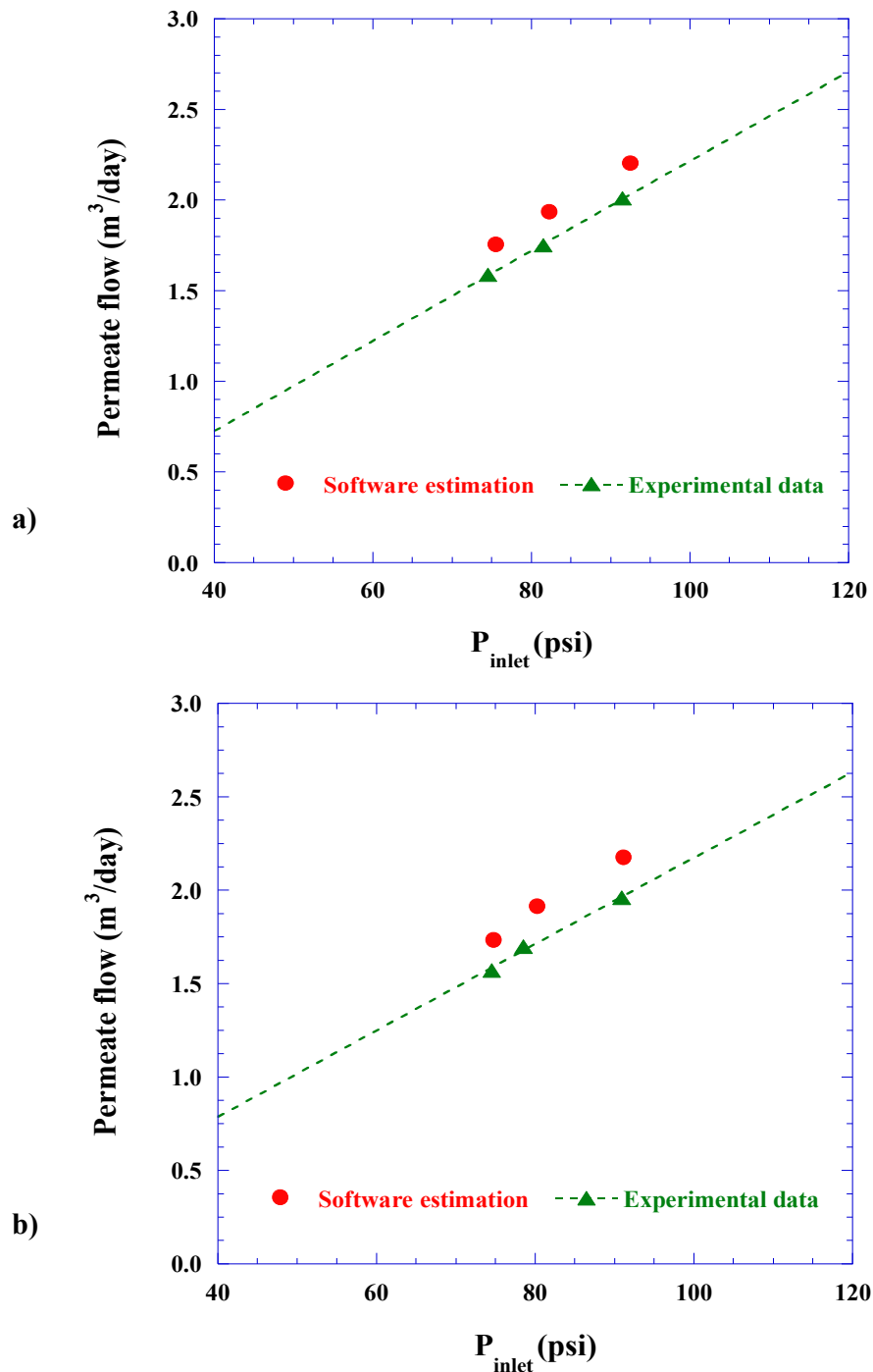
**Tableau IV.3:** Les prévisions des données de performance de dessalement des éléments LPSTM (Dow XLE) dans 5 à 7 éléments de pression. Les estimations sont obtenues par le logiciel ROSA (Dow corporation, 2013; Moudjeber et al, 2014).

N°	Taux de conversion de la station [%]	LPSTM par élément de pression	1er Element									
			Debit du concentrat [m <sup>3</sup> /j]	Debit d'alimentation [m <sup>3</sup> /j]	Debit du permeat [m <sup>3</sup> /j]	Pression d'entrée [psi]	Flux moyen, [L/m <sup>2</sup> h]	Viesses trans-membranaire [cm/s]	Chute de pression [psi]	Taux d'élimination de sels [%]	Taux de conversion [%]	
1	60	5	12.72	14.89	2.17	91.3	34.8	17.6	3.3	98.3	15.0	
2		6	12.98	14.89	1.91	80.4	30.6	17.9	3.3	98.1	13.0	
3		7	13.16	14.89	1.73	74.9	27.7	18.2	3.5	98.0	12.0	
4	65	5	11.54	13.74	2.20	92.6	35.24	15.9	2.9	98.3	16.0	
5		6	11.81	13.74	1.93	82.4	30.92	16.3	3.0	98.1	14.0	
6		7	11.99	13.74	1.75	75.6	28.04	16.6	3.0	98.0	13.0	

Il est évident qu'en ce qui concerne la productivité du perméat, la concordance entre les résultats expérimentaux et les prédictions sont satisfaisantes. Mais les performances de la membrane testée semblent être, quelque peu, inférieures d'environ 7% par rapport aux prédictions de ROSA. La même tendance est également observée pour le taux de conversion du perméat correspondant. Ce petit écart entre les mesures et les prédictions peut être attribué à des erreurs expérimentales ainsi qu'à l'utilisation de valeurs de paramètres d'entrée pour les calculs qui diffèrent de celles du système expérimental pilote.

En comparant d'autres données sur le rendement de la membrane (tableau IV. 2) avec nos résultats de simulation correspondants (tableau IV. 3), on peut conclure que, pour la chute de pression, nos valeurs, calculées et expérimentales, sont très proches de ces données, alors que les estimations théoriques des rejets de sel de la membrane sont un peu supérieures à celles mesurées par le biais du pilote.

En général, on peut conclure que les prédictions du logiciel ROSA, en ce qui concerne le perméat, tant sa qualité que sa quantité, sont, selon les mêmes conditions, en accord avec les résultats expérimentaux. Par conséquent, ce logiciel peut être utilisé (pour le même type d'élément RO LPSWM) pour les calculs de conception de l'usine dessalement que l'on se propose de dimensionner.



**Figure IV.5:** Comparaison des données expérimentales (caractéristiques de performance) avec les estimations théoriques (obtenue avec le logiciel de conception commerciale ROSA) pour la membrane basse pression (Filmtec XLE).

Vitesse d'écoulement transversale moyenne:

a) 17,5 cm/s et ;

b) 19 cm/s. (Moudjeber et al, 2014)

## IV.5 ÉTUDE DE CAS

Dans ce cas pratique, les critères généraux mentionnés ci-dessus ont été pris en considération afin d'obtenir une conception quasi-optimale d'une usine de production d'eau potable d'une capacité 10.000 m<sup>3</sup>/jour. De plus, les résultats de cette étude sont aisément adaptables et peuvent être extrapolés à des usines de capacités plus grandes. Cette adaptation est possible en raison du type modulaire des unités de membrane, LPSWM, qui facilitent le passage, du pilote de laboratoire à une usine à grande échelle et c'est là un avantage indéniable.

Les caractéristiques de l'eau de la nappe albienne (tableau IV.1) nous indiquent qu'il n'y a pas une tendance à l'encrassement de la membrane mais qu'il y a seulement un potentiel à l'entartrage au-delà d'un certain niveau du taux de recouvrement du perméat. C'est sur ces bases que cette étude a été réalisée. Elle a été menée en deux étapes successives comme suit.

### IV.5.1. Détermination de la tendance à l'encrassement

Le risque à l'encrassement dû au rétentat a été déterminé en fonction des paramètres clés de fonctionnement :

- le taux de conversion du perméat ;
- les caractéristiques de l'eau d'alimentation ;
- le pH et ;
- la température.

Pour les besoins des calculs précis des équilibres du flux de rétentat, un modèle thermodynamique proposé par le logiciel PHREEQC version 2.15.07, a été utilisé. PHREEQC est un programme écrit par Parkhurst et Apello en 1999 et diffusé par l'US Geological Survey (USA). Ce logiciel réalise la spéciation, c'est-à-dire la différenciation au cours de l'évolution, des espèces chimiques dans une solution aqueuse ainsi que les indices de saturation des minéraux. Les données nécessaires sont rentrées dans le modèle thermodynamique PHREEQC afin de déterminer les espèces majeures dissoutes dans l'eau et identifier les minéraux susceptibles de précipiter.

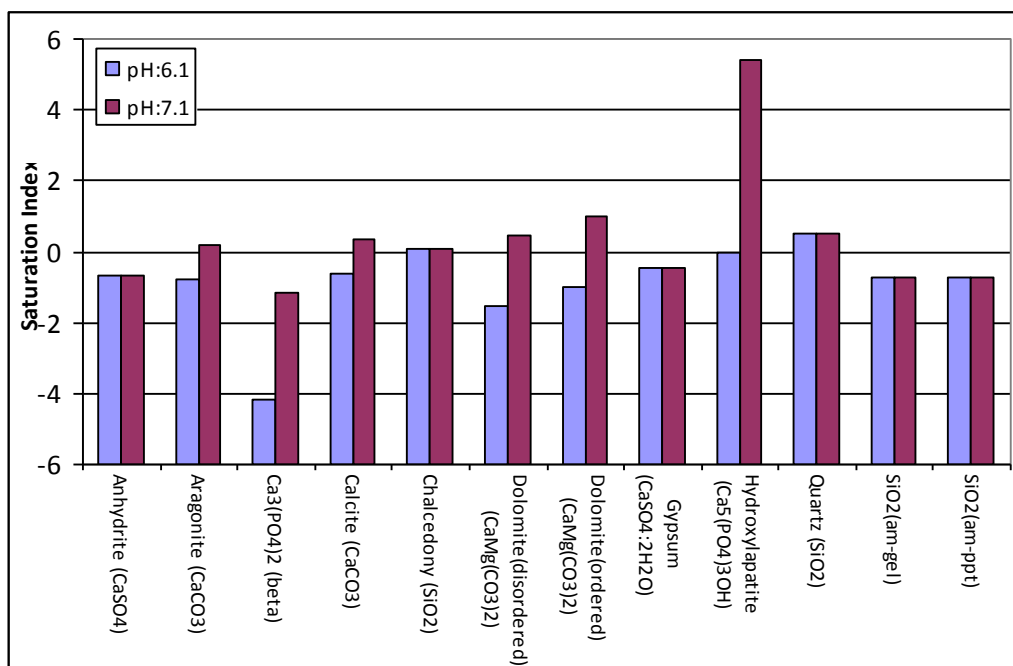
Cela nous a permis la mise en œuvre de l'extension de la théorie de Debye-Hückel (*Parkhursts et al, 1999*) Cette démarche est impérative car le logiciel commercial ROSA, proposé par le fabricant de membranes DOW, s'est avéré comme insuffisant. Pour ces calculs, la base de données de la littérature la plus complète et disponible à l'heure actuelle, « **minteq.v4.dat** », a été utilisée (*Todorov et al, 2006*). Pour un taux de conversion du perméat dans la gamme 50-65%, le pH du flux du rétentat a été estimé, selon les prédictions de ROSA, à environ de 7.1 à 7.2, et cela sans addition d'acide dans le flux d'eau d'alimentation.

Pour un pH d'environ 7.1, un taux de recouvrement du perméat de l'ordre de 50% et pour une température relativement élevée du flux d'alimentation en eau (34,3 °C), le code de calcul PHREEQC nous indique qu'il existe un potentiel d'entartrage pour les phases suivantes: aragonite, calcite, calcédoine, dolomite, l'hydrox apatite, et le quartz. Ceci est évident d'après les indices de saturation positifs calculés pour ces phases solides qui sont représentées sur la Figure IV.6; l'hydrox apatite semble avoir le plus grand potentiel de d'entartrage.

La Figure. IV.6 nous montre les indices de saturation des phases solides estimées ci-dessus pour un flux du rétentat ayant un pH de 6,1. C'est là la valeur de pH maximale tolérable pour le rétentat afin d'éviter la précipitation des sels peu solubles. Ces derniers sont ceux associés avec des indices de saturation négatifs, excepté deux phases de SiO<sub>2</sub> (calcédoine et quartz) qui sont insensibles aux variations de pH.

Enfin, il convient de souligner que, dans le but de parvenir à un bon flux de rétentat à pH = 6,1 (pour empêcher l'entartrage de la membrane), le flux d'eau d'alimentation doit être acidifié à une valeur de pH ≤ 5,9.

La détermination des doses d'acide requises sont calculées, également, au moyen du logiciel ROSA. Ces quantités sont utilisées dans la section suivante qui traite de la conception de la station de dessalement et en présente une évaluation technico-économique succincte.



**Figure IV.6 :** Indices de saturation des phases solides dans le rétentat pour l'eau non traitée et l'eau d'alimentation traitée (acidifié); les valeurs du pH à la sortie du rétentat, 7,1 et 6,1 respectivement pour l'eau d'alimentation traitée et non traitée (Moudjeber et al, 2014)

#### IV.5.2. Conception de l'usine de dessalement

Une station de dessalement a été conçue en respectant les valeurs admissibles, établies plus haut, du pH et du taux de conversion du perméat. Le mélange (blending) est mis en œuvre, sur la base d'une optimisation du rapport entre "l'eau albienne" sur "l'eau dessalée", pour répondre aux normes algériennes d'eau potable. Pour la conception du cas de base, après les essais, on a choisi un rapport de mélange 65/35 (eau albienne / eau dessalée) ce qui nous assure une eau potable à la composition résumée dans le tableau 4.

Il convient de noter que la qualité de l'eau mélangée (Tableau IV. 4) est satisfaisante, à l'exception de la valeur du pH qui est faible. Pour y remédier, il est courant, dans les usines de dessalement, d'augmenter le pH par addition de chaux avant le stockage et lors de la distribution de l'eau potable. Sur la base des considérations ci-dessus, trois projections différentes ont été faites, avec le logiciel ROSA, afin d'évaluer trois possibilités de conception de l'usine de dessalement en question.

**Table IV. 4.** Composition chimique du perméat et de l'eau potable "mélangée" en fin de process (Moudjeber et al, 2014).

Paramètres	Perméat à partir du RO	L'eau finale après mélange (blended)	Normes Algériennes
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	0.02	0.05	-
Na <sup>+</sup> (mg/L)	18.45	200.49	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	2.05	59.30	150
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	3.83	113.35	200
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	3.56	60.97	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	13.31	22.68	50
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	24.67	359.39	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	10.03	372.26	400
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	0.45	8.02	-
CO <sub>2</sub> (mg/L)	70.89	71.48	-
TDS (mg/L)	76.38	1196.52	< 2
pH	4.83	5.75	≥ 6.5 and ≤ 9

Ces solutions consistent en un train de membrane RO, en passage unique, en utilisant

- 5, 6, ou 7 éléments de LPSWM par enceinte pressurisée ;
- un taux de conversion de 50% et ;
- un rapport de mélange 65/35.

Pour ces calculs de conception, des membranes normalisées de 8 pouces (21,6 cm), type XLE-440 « Filmtec », ont été sélectionnées. Les caractéristiques de performance de ce genre de membrane ont été évaluées, avec des résultats satisfaisants, dans les tests de laboratoire en utilisant une membrane similaire, mais de plus petit diamètre, l'élément de membrane type XLE-2540 « Filmtec » (Moudjeber et al, 2014).

Ceci nous amène à dire que l'on peut, par conséquent, augmenter la taille du système de dessalement tout en augmentant sa fiabilité.

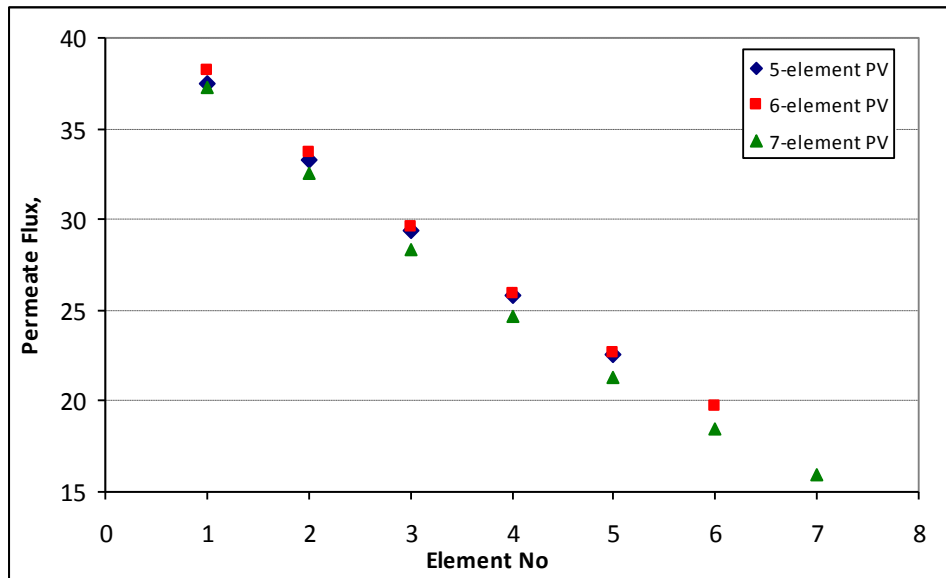
Les principaux résultats des calculs de conception, y compris le dessalement partiel de l'eau de la nappe albienne et le mélange ultérieur, sont résumés dans le tableau IV. 5. L'unité de dessalement d'une capacité de 7.000 m<sup>3</sup>/jour fonctionne avec un taux de conversion du perméat de 50%. 10.000 m<sup>3</sup>/jour eau potable sont produits en mélangeant 3.500 m<sup>3</sup>/jour d'eau dessalée avec 6.500 m<sup>3</sup>/jour d'eau de la nappe albienne. Par conséquent, la quantité d'eau du retentat est de 3.500 m<sup>3</sup>/jour.

**Table IV. 5.** Résumé des résultats des calculs de conception pour un seul passage pour le dessalement de l'eau saumâtre utilisant des trains de 5, 6 ou 7 LPSWM par élément de pression (Moudjeber et al, 2014).

Paramètres	5-éléments de pression	6-éléments de pression	7-éléments de pression
Nombre d'élément de pression	24	21	20
Nombre d'éléments : LPSWM	120	126	140
Pression d'alimentation en bar	5.82	5.99	5.93
Taux de conversion de l'unité de dessalement	50	50	50
utilisation globale de l'eau Albienne en [%]	74.08	74.08	74.11
Pertes de charge au niveau de l'élément de pression en [kPa]	117	168	206
Flux moyen pour un élément de pression en [L/m <sup>2</sup> h]	29.73	28.32	25.52
Énergie de pompage en [kW]	58.98	60.69	60.06
Énergie spécifique en [kWh/m <sup>3</sup> ]	0.14	0.15	0.14
Dosage de l'acide (100% HCl) en [mg/L]	55.92	55.92	55.92

Le profil du flux moyen de perméat de chaque élément de membrane le long de l'enceinte pressurisée est représenté sur la Figure. IV. 7 pour différentes solutions de conception.

Les différences de flux dans les éléments LPSWM sont relativement faibles, mais en concordance avec les évolutions attendues (Karabelas *et al*, 2014). En effet, pour un taux de conversion fixe, le cas de conception impliquant le plus grand nombre d'éléments par enceinte pressurisée (7 éléments) est associé, comme on s'y attendait, avec les plus petits flux.



**Figure IV.7:** Profil du flux moyen de perméat pour chaque élément LPSWM dans un élément de pression, pour trois cas (5, 6 et 7 éléments de pression) (Moudjeber *et al*, 2014).

Les flux dans les trois premiers éléments LPSWM sont plutôt élevés de 38 à 24 l/m<sup>2</sup>.h, ce qui est en accord avec la littérature parlant des traitements par membranes des eaux saumâtres (Karabelas *et al*, 2014 ; Koutsou *et al*, 2007 ; Parkhurts *et al*, 1999 ; Todorov *et al*, 2006 ; Karabelas *et al*, *in press*). De plus, aucun problème de fonctionnement n'est attendu puisque l'eau d'alimentation est libre de toute matière organique, son potentiel apparent d'encrassement est donc quasiment nul (Sioutopoulos *et al*, 2012).

À bien regarder les résultats du tableau IV. 5, on remarquera que le cas de 5 éléments par enceinte :

- nécessite le plus petit nombre total d'éléments LPSWM (120) ;
- nécessite le plus grand nombre d'enceintes pressurisées (24) ;
- présente, aussi, la plus petite chute de pression (117 kPa) par enceinte pressurisée ;
- nécessite la plus petite puissance de pompage 58.98 kW. La différence est minime avec les autres cas de figures mais, à la longue, le gain peut être appréciable.

### IV.5.3. Analyse des coûts pour le choix de nombre optimal d'éléments LPSWM par enceinte pressurisée

Dans le tableau IV.7, les résultats d'une analyse économique succincte sont résumés quand aux coûts de l'usine de dessalement que l'on se propose d'installer à In Salah. Cette analyse nous permet d'optimiser le nombre d'éléments LPSWM par enceinte pressurisée parmi les trois possibilités de conception proposées : soit 5, 6, ou 7 éléments. Il convient de noter que cette comparaison ne comprend que :

- le coût du pompage ;
- le coût des enceintes pressurisées et ;
- le coût de la membrane.

Nous nous limitons à ces trois coûts car, nous considérons que tous les autres coûts restent identiques pour les trois scénarios examinés, il s'agit :

- des coûts des capitaux engagés ;
- des coûts pour l'achat du matériel et ;
- des coûts d'exploitation.

D'ailleurs, le tableau IV.7 nous indique des valeurs relativement faibles, tant pour le capital que pour les coûts d'exploitation.

Afin d'éviter la précipitation des sels peu solubles, de l'acide chlorhydrique(HCl) est nécessaire. Il constitue 33% en poids et son prix sur le marché international est d'environ 200 \$/tonne. La dose d'acide nécessaire nous est donnée par le logiciel ROSA, pour la configuration à 5 éléments, la dose est de 55,92 mg/litre (tableau IV.5). De ce qui précède, nous avons estimés le coût unitaire de l'acidification de l'eau d'alimentation à 0,0212 \$ /m<sup>3</sup>. Les résultats de l'analyse des coûts résumés dans le tableau 6 indiquent que l'option de 5 éléments LPSWM par enceinte pressurisée est la préférable car, dans ce cas, les dépenses associées aux immobilisations et à l'exploitation sont moindres. Il convient de noter que le taux de conversion, environ 74,1%, inclus dans le tableau IV.6, correspond au taux de conversion global du système en eau potable. Il est obtenu avec la proportion de mélange suivante : « 65% d'eau du réservoir » et « 35% d'eau dessalée » et en admettant un taux de conversion de 50% d'eau dessalée dans une installation de dessalement d'une capacité de 7000 m<sup>3</sup>/jour. Ce qui fait que 3500 m<sup>3</sup>/ jour de rétentat sont laissés pour être réinjecter dans le réservoir albien et/ou pour une autre utilisation ultérieure.

**Tableau IV.6:** Analyse du coût de l'unité de dessalement pour 5, 6 ou 7 éléments par enceinte pressurisée. La capacité de l'usine de 10.000 m<sup>3</sup>/jour est obtenue par le mélange de 65% de la nappe avec 35% de l'eau dessalée (Moudjeber et al, 2014).

Scénarios	5 éléments	6 éléments	7 éléments
Production d'eau potable [m <sup>3</sup> /h]	416.69	416.70	416.86
Taux de conversion de l'usine [%]	74.08	74.08	74.11
Paramètres économiques du projet			
La durée de vie du projet [année]	10	10	10
Taux d'intérêt [%]	8	8	8
Coût de l'énergie [\$kWh]	0.028	0.028	0.028
Résultats de simulation			
Pass 1: production de perméat [m <sup>3</sup> /h]	145.85	145.87	146.03
Pass 1 pression de l'eau d'alimentation [bar]	5.82	5.99	5.93
Pass 1 pression du concentrate [bar]	4.31	3.97	3.52
Pass 1 taux de conversion [%]	50.00	50.00	50.00
Dépenses			
Pass 1 : éléments de pression	24	21	20
Prix de l'élément de pression [\$/element]	1259	1329	1419
Pass 1 total	\$30216.00	\$27909.00	\$28380.00
Pass 1 total elements	120	126	140
Prix de l'élément LPSWM [\$/element]	\$700.00	\$700.00	\$700.00
Pass 1 prix total des éléments [\$]	84,000	88,200	98,000
Pass 1 Total [\$]	114,216	116,109	126,380
Pass 1 Total par m <sup>3</sup> produit [(\$/m <sup>3</sup> )]	0.0089	0.0091	0.0099
Frais d'exploitation			
Energie			
Pass 1 énergie de pompage [kW]	58.97	60.68	60.06
Pass 1 énergie de pompage spécifique [kWh/m <sup>3</sup> ]	0.142	0.146	0.144
Pass 1 énergie nette consommée [kWh/m <sup>3</sup> ]	0.142	0.146	0.144
Pass 1 coût net de l'énergie [(\$/an)]	\$5062.85	\$5210.13	\$5160.32
Frais de l'énergie [\$]	33972.11	34960.42	34626.18
Pass 1 coût de l'énergie par m <sup>3</sup> [(\$/m <sup>3</sup> )]	0.0040	0.0041	0.0040
Frais de remplacement des membranes			
Pass 1 taux de remplacement [%/an]	10	10	10
Frais de remplacement [\$/élément]	\$700.00	\$700.00	\$700.00
Pass 1 frais de remplacement par membrane et par an [\$/an]	\$8400.00	\$8820.00	\$9800.00
Pass 1 frais total pour tous les éléments [\$]	\$56364.68	\$59182.92	\$65758.80
Pass 1 frais de remplacement des membranes par m <sup>3</sup> [(\$/m <sup>3</sup> )]	0.0066	0.0069	0.0077
Les charges d'exploitation			
Pass 1 charge d'exploitation [\$]	\$90336.80	\$94143.34	\$100384.97
Pass 1 charge d'exploitation par m <sup>3</sup> [(\$/m <sup>3</sup> )]	0.0105	0.0110	0.0117
Pass 1 Total			
Pass 1 Total net [\$]	\$204552.80	\$210252.34	\$226764.97
Frais total par cycle et par m <sup>3</sup> [(\$/m <sup>3</sup> )]	0.0056	0.0058	0.0062

## **IV.6. EXPLOITATION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU DU RÉSERVOIR ALBIEN**

Pour une exploitation à grande échelle de l'eau du réservoir géothermique albien et compte tenu de son enthalpie importante (34,3°C), la combinaison de la production de l'eau potable avec d'autres utilisations présente des avantages économiques et environnementaux certains. Une question pertinente est de savoir si l'énergie géothermique de l'eau de la nappe albienne doit être exploitée avant ou après le processus de dessalement. Pour aborder cette question, il convient de rappeler que l'enthalpie de l'eau, ou sa température relativement élevée, a un effet négatif significatif sur le processus de dessalement de l'eau, car il aggrave le problème de l'entartrage. Cette aggravation est due à la température qui déplace les équilibres de sel calcium (Ca) vers de plus petites concentrations d'espèces ioniques. En effet, à des températures plus élevées, donc à des concentrations plus petites, pour une eau d'alimentation d'une certaine composition, la sursaturation des sels de solubilité inverse est plus grande. Cette tendance nécessite :

- soit une réduction du taux de conversion;
- soit une augmentation de la dose d'acide, en tant qu'agent antitartre, afin de maintenir, justement, un certain niveau du taux de conversion du perméat.

C'est pourquoi, en principe, l'extraction de la chaleur devrait précéder le dessalement de ces eaux géothermiques. Il faut, cependant, veiller qu'aucune dégradation de ces eaux ne se produise dans cette phase d'exploitation initiale.

L'exploitation directe de l'énergie géothermique à grande échelle est potentiellement intéressante puisque, en plus de fournir de l'eau chaude sanitaire, on peut procéder, dans un proche voisinage, à la climatisation des complexes résidentiels, des bâtiments publics, et pouvoir en eau chaude les installations industrielles. D'autres applications de transfert indirect de chaleur sont possibles dans divers domaines tels que dans certains processus de l'agro-alimentaire.

Dans toutes ces applications, il doit être prévu que, l'eau extraite du réservoir, serait traitée de façon que la partie restante (le rétentat) soit d'une bonne qualité permettant sa réinjection dans le réservoir sans risque de pollution

Il est à noter qu'il existe d'autres options qui sont, soit déjà mises en œuvre [26] ou, considérées comme envisageables pour des applications rentables en Algérie [27] et dans les pays voisins. En effet, comme activités connexes au dessalement, nous pouvons signaler la possibilité d'installer des fermes de pisciculture, pour la production et l'élevage de poissons (*Ouali et al, 2010*), pour qui, l'eau albienne semble être idéale. Nous pouvons également envisager la possibilité de la culture de la spiruline par ensemencement dans des bassins contenant le retentat constituant la saumure de décharge du dessalement par RO. La spiruline est une algue à haute valeur nutritionnelle très bien acceptée par les populations des zones arides et éloignées. La culture de la spiruline est en pleine croissance et, peu à peu, les habitudes alimentaires mutent en sa faveur. C'est là un moyen peu coûteux et ne nécessitant pas beaucoup de technologie pour lutter contre la malnutrition.

D'autres perspectives importantes, et pas des moindres, pour l'utilisation de l'énergie géothermique sont à noter. Par exemple, *Mahmoudi et al. (2010)* ont récemment proposé l'utilisation de l'eau géothermique du réservoir albien pour alimenter un système de serre de dessalement d'eau saumâtre, Brackish Water Green House (BWGH). À l'instar de l'Algérie, ce système favorise le développement des régions arides et désertiques. Avec un tel système, les ressources géothermiques sont utilisées à la fois pour chauffer les serres et pour fournir de l'eau douce nécessaire à l'irrigation des plantes cultivées dans les serres. Le peu d'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de ces serres, pour les pompes et les ventilateurs, pourrait être pourvu par le biais de l'énergie solaire ou éolienne dont les gisements sont abondants dans ces régions (*Mahmoudi et al, 2009a*). D'ailleurs, en affichant plus de rigueur, il convient d'examiner si les ressources géothermiques nécessaires au fonctionnement de la serre de dessalement (BWGH) ne pourraient pas être remplacées carrément par l'énergie de la saumure de décharge du dessalement par RO. On éviterait ainsi sa réinjection dans la nappe albienne. L'utilisation des systèmes de serres SWGH, et bien d'autres applications, constituent une gestion intégrée des ressources de la nappe albienne.

Par les possibilités :

- de production d'eau potable localement ;
- d'une activité agricole locale ;
- de pisciculture ;

on pourrait encourager la création de nouvelles habitations dans ces zones arides.

Arrivés à ce stade, on pourrait se poser les questions suivantes :

- est-il envisageable de faire fonctionner une telle usine par les énergies renouvelables ? quel est le degré de la faisabilité ?
- parmi les énergies disponibles, laquelle choisir ou lesquelles peut-on coupler pour les besoins énergétiques d'une telle usine ?
- quels sont les coûts d'investissement et d'exploitation d'une telle option ?

C'est dans le chapitre suivant « Études technico-économique » que l'ensemble de ces questions trouvera réponses.

# **Chapitre V**

## **Utilisation des énergies renouvelables, cas d'In Salah**

## V. 1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons étudier la possibilité d'utiliser les deux énergies renouvelables dont les potentiels sont importants dans la région pour alimenter en énergie électrique la station de dessalement d'In Salah : il s'agit du photovoltaïque et de l'éolien. Ces deux sources énergétiques sont abondantes au sud de l'Algérie (Sahara) et il serait vraiment dommage de ne pas en profiter. C'est d'ailleurs en prévision de ce genre d'alimentation que l'on a prévu, à la source, l'utilisation d'une technologie peu énergivore : l'Osmose Inverse (RO) couplée à une membrane Basse Pression (LP).

Pour ce faire, le logiciel « RETScreen » (*Renewable Energy Project Analysis Software (Canada)*), développé, en réalité, par un organisme canadien qui utilise les données de l'Agence Nationale Spatiale Américaine, NASA, nous a permis d'évaluer les deux potentiels, solaire et éolien de la région d'In Salah. De plus, ce même logiciel nous a permis de faire une étude technico-économique pour voir la faisabilité de la chose, c'est-à-dire, voir entre autres, les coûts d'investissement, les périodes d'amortissement, l'économie d'émission des quantités de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et bien d'autres paramètres.

Avant de voir les résultats obtenus, il serait bon de voir, de par le monde, quel est le niveau d'utilisation des fermes éoliennes et des champs de panneaux photovoltaïques pour la production d'énergie électrique. Le stockage de ces énergies pour une post-utilisation, bien qu'important, ne sera pas abordé, ce n'est pas l'objet de notre travail.

## V.2. UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE

Les progrès technologiques faits ces dernières années en matière de technique de fabrication d'éolienne ont placé cette énergie dans une position concurrentielle par rapport aux sources d'énergies fossiles conventionnelles. Les ingénieurs, danois, entre autres, ont développé de nouveaux aérogénérateurs qui associent un fonctionnement silencieux et des vitesses d'amorçage très basses. De tels progrès rendent l'utilisation de l'énergie éolienne très fiable et très rentable. C'est pour ces raisons que la capacité éolienne installée dans le monde, en 2013, était de 318 GW, elle devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025.

À la tête de ce marché se trouve l'entreprise danoise VESTAS qui est le premier fournisseur d'éoliennes dans le monde avec 12,7% de la part de marché. Cette entreprise a installé, en 30 ans, plus de 38 000 éoliennes dans plus de 60 pays. Ses principaux concurrents sont les groupes chinois Sinovel et Goldwin avec respectivement 9% et 8,7% de part de

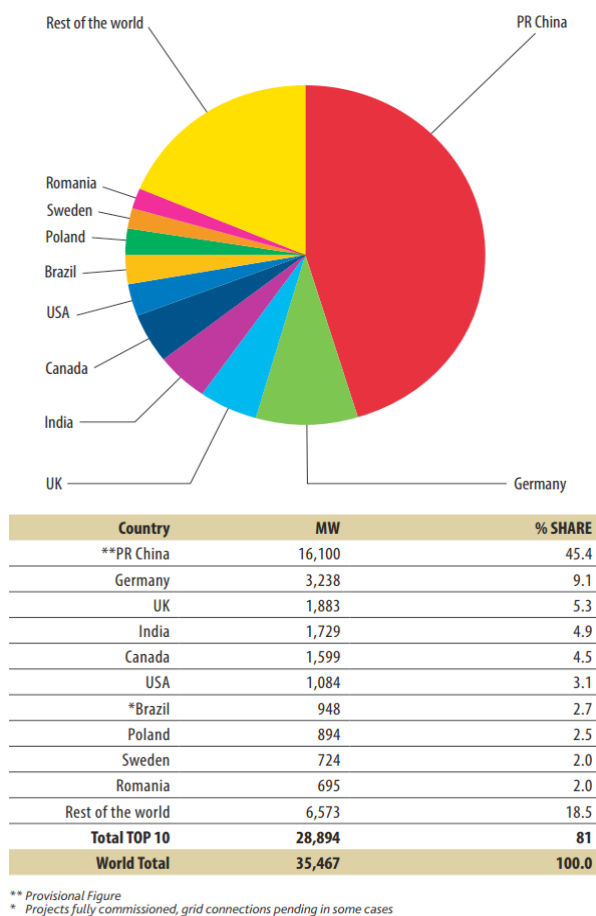
marché mondial, l'espagnol Gamesa (8%), l'allemand Enercon (7,8%) et l'américain GE Wind (7,7%). Le marché mondial de l'éolien devrait plus que doubler au cours de cette période, passant de 21 à 47 milliards €. Notons la percée fulgurante des Chinois, ces trois dernières années, tant en qualité des éoliennes qu'ils proposent qu'en parts de marché !

Pour notre étude de cas, une question s'impose alors : en Algérie, où se trouve les sites où l'on peut profiter de cette énergie renouvelable en utilisant ces éoliennes performantes ?

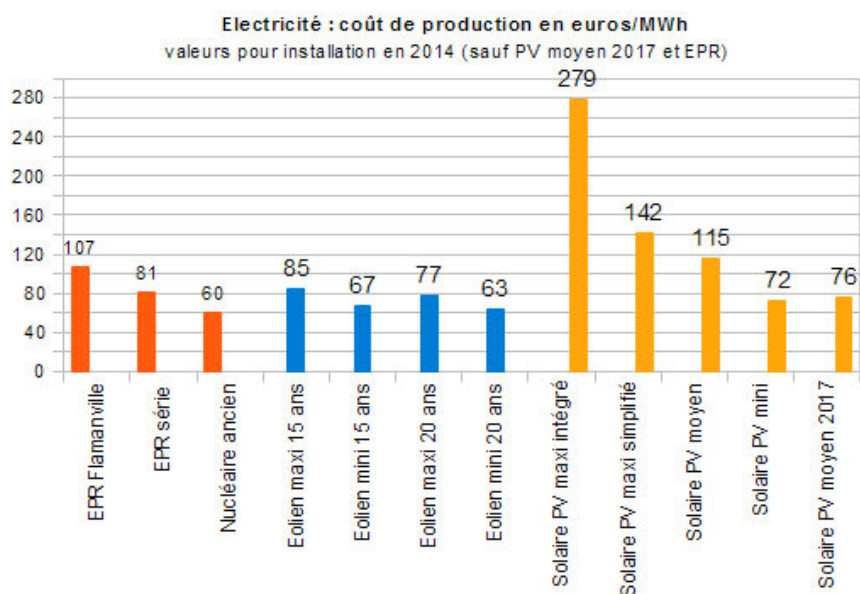
La réponse est que ces sites sont très disparates : le long des rivages de la Mer Méditerranée, certaines régions montagneuses, les zones dégagées de l'intérieur du pays et près des rives de plans d'eau. Plusieurs études antérieures ont montré qu'en Algérie, la zone la plus ventée est à Adrar (Sud-ouest du Sahara). Vu que le potentiel énergétique est proportionnel au cube de la vitesse du vent c'est donc dans ce genre de régions que la viabilité financière des fermes éoliennes est la plus grande

On voit que, contrairement au potentiel solaire qui est disponible, à divers degrés, en tout point du globe terrestre, le potentiel éolien n'est lui disponible et exploitable que dans certains sites privilégiés. Malgré cette restriction géographique inhérente à l'emplacement des fermes éoliennes, les sites où l'énergie éolienne permet de répondre à la demande locale en électricité sont de plus en plus nombreux (*Rangi et al, 1992*). Cet engouement s'explique par le fait que les progrès technologiques nous permettent de profiter de vents de plus faibles vitesses et, en plus qu'une seule éolienne, d'une puissance de 2 MW produit, annuellement, environ 4400 MWh, soit la consommation électrique d'environ 2000 personnes tout en économisant l'émission de plus de 800 tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère si on avait utilisé des énergies fossiles. De plus, les prix des éoliennes amorcent une baisse qui stimule l'investissement dans ce domaine

La conséquence de ce progrès c'est que l'on voit naître de grandes fermes éoliennes qui fournissent de l'énergie électrique à de grandes mégapoles et à de grandes installations industrielles telles que des usines de dessalement d'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le prix du KWh ainsi produit est concurrentiel par rapport au KWh produit par des installations conventionnelles et notamment le nucléaire. Voir figures. V.1 et V.2



**Figure. V.1 :** Utilisation de l'énergie éolienne dans le monde  
(<http://www.planetoscope.com/eolienne/1060-production-mondiale-d-energie-eolienne.html>)



**Figure V.2 :** Comparaison des prix des différents procédés de production  
([http://energeia.voila.net/electri/cout\\_electri.htm](http://energeia.voila.net/electri/cout_electri.htm))

Les éoliennes trouvent, aussi, leur efficacité pour des installations de moindre envergure et celles de tailles moyennes connectées à un réseau isolé. De plus petites éoliennes peuvent aussi être utilisées hors réseau pour alimenter de petites stations de pompage ou d'autres applications autonomes. Cette flexibilité confère aux éoliennes un avantage indéniable.

Dans la pratique, la production d'énergie est plutôt proportionnelle au carré de la vitesse du vent et non au cube comme le dicte la théorie. Cette différence s'explique par les caractéristiques et les rendements aérodynamique, mécanique et électrique de conversion d'énergie des éoliennes. L'énergie que peut produire une éolienne augmente d'environ 20 % pour chaque augmentation de 10 % de la vitesse du vent.

La technologie éolienne est arrivée à maturité au cours des 15 dernières années avec l'avènement des aérogénérateurs qui, sous l'effet de la concurrence mondiale et des progrès techniques attribuables à la recherche et développements (R&D), ont vu leurs performances à la hausse. Les inquiétudes quant au coût relativement élevé et au peu de fiabilité des éoliennes s'en sont trouvées ainsi grandement réduites.

### V.3. DESCRIPTION DES EOLIENNES :

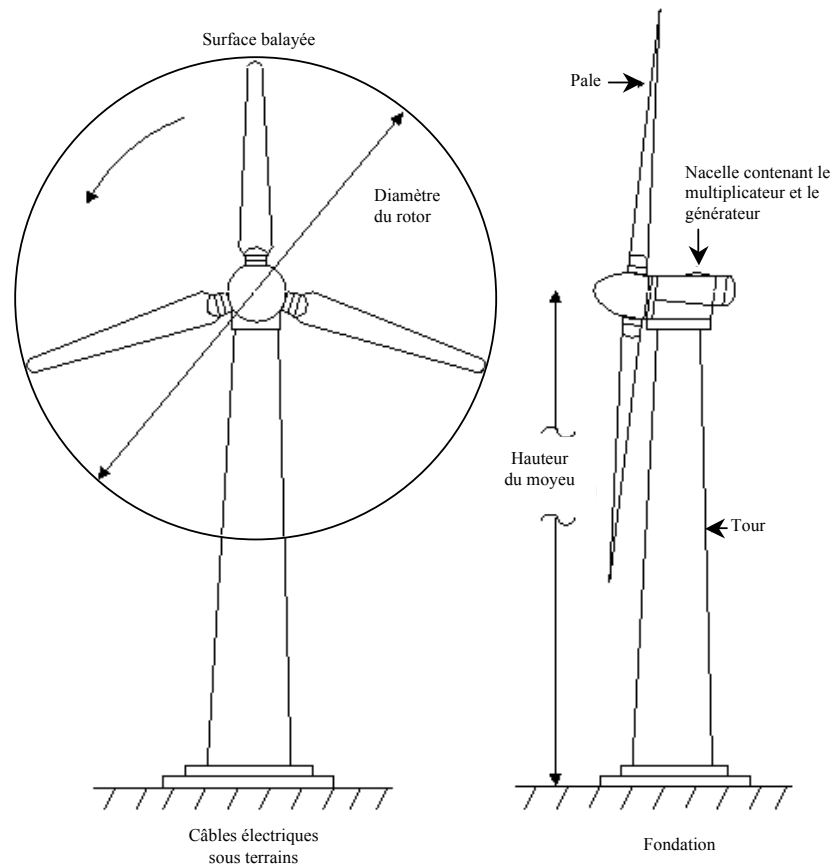
La plupart des éoliennes sont pourvues d'un anémomètre qui mesure continuellement la vitesse du vent. Lorsque celle-ci est assez élevée pour compenser la friction du rotor, les mécanismes de commande lui permettent de tourner et ainsi de produire une faible puissance. Cette vitesse, appelée vitesse de démarrage ( $v_d$ ), est habituellement d'environ 4 m/s, soit la force d'une brise légère de force 3 sur l'échelle de Beaufort. Cette dernière exerce une pression sur les pales d'environ 3,2 daN/m<sup>2</sup>. La puissance produite croît rapidement au fur et à mesure que la force du vent augmente. Lorsqu'elle atteint le niveau maximum admissible pour l'éolienne installée, les mécanismes de commande assurent la régulation à la puissance nominale. La vitesse du vent à laquelle une machine fournit sa puissance nominale est appelée vitesse nominale ( $v_n$ ); en général, elle se situe au environ de 15 m/s, vent de force 6 sur l'échelle de Beaufort, ce dernier exerce une pression sur les pales d'environ 24 daN/m<sup>2</sup>, d'où la nécessité d'un bon ancrage de la tour.

Si la vitesse du vent continue à augmenter, le système de commande arrête le rotor pour éviter que des dommages ne soient causés à l'éolienne. Cette vitesse d'arrêt appelée aussi vitesse de coupure ( $v_c$ ) est généralement d'environ 25 m/s, ce qui correspond à un vent de force 10 et une pression sur les pales de 95 daN/m<sup>2</sup> : c'est la tempête qui s'installe !

Les principaux composants d'une éolienne moderne sont :

- un rotor, bipale ou tripale, qui convertit l'énergie du vent en énergie mécanique par l'entraînement de son arbre ;
- un multiplicateur de vitesse qui relie le rotor au générateur ;
- une tour sur laquelle est fixé le rotor et qui est assez élevée pour exploiter les vents plus forts en altitude ;
- une fondation solide qui assure la résistance de l'ensemble aux grands vents ;
- un système qui commande le démarrage et l'arrêt de l'éolienne et surveille son fonctionnement.

La figure V.3 montre la configuration typique d'une éolienne à axe horizontal.



**Figure V.3 :** Schéma de principe d'une éolienne horizontale (Mahmoudi et al, 2008)

#### V.4. ETUDE THEORIQUE DES EOLIENNES

Une masse  $m$  d'air se déplaçant avec une vitesse  $v$  a une énergie cinétique donnée par la relation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \text{ Joules} \quad (V.1)$$

La masse  $m$  est égale au produit du volume  $v$ , passant à travers la surface des rotors, par la masse volumique  $\rho$ . L'air, aux conditions normales de pression et de température, a une densité  $d$  égale à

$$d = 1.225 \text{ Kg/m}^3$$

d'où l'énergie cinétique, par unité de surface,  $A$  peut être écrite sous la forme :

$$P/A = \frac{1}{2} \times 1.225v^3 \quad (V.2)$$

Si on désigne par  $v_1$  la valeur de la vitesse incidente du vent traversant la surface des rotors de l'éolien, et par  $v_2$  la vitesse du vent à la sortie de la turbine, on aura:

$$v_2 < v_1 \quad (V.3)$$

Le scientifique Allemand Betz, a étudié en détail ce phénomène, et a conclu que théoriquement une éolienne ne peut convertir que 59% de la puissance du vent disponible.

$$\frac{P_{\max}}{A} = 0.362 v^3 \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \quad (V.4)$$

La puissance électrique extraite  $P_{\text{ext}}$  d'une éolienne est inférieure de 20% la valeur de  $P_{\max}$

$$\frac{P_{\text{ext}}}{A} = 0.289 v^3 \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \quad (V.5)$$

La puissance du vent traversant perpendiculairement une surface circulaire par an (8760h) peut être donnée par la relation suivante:

$$P_{\text{ext}} = 0.289 v^3 (\pi.r^2) 8760 \frac{\text{Watts}}{\text{an}} \quad (V.6)$$

Avec  $v$  : la vitesse du vent [m/s] et

$r$  : le rayon du rotor [mètres]

La vitesse du vent  $v_z$  à une hauteur  $z$  peut être calculée à partir de la vitesse de référence  $v_{\text{ref}}$  mesurée à une hauteur ( $Z = 10\text{m}$ ) comme suit:

$$v_z = v_{\text{ref}} \left( \frac{z}{10} \right)^{0.143} \quad (V.7)$$

### V.4.1. La distribution de Weibull

Il est très important pour l'industrie éolienne d'être en mesure de décrire les variations de la vitesse du vent. Les fabricants utilisent ces informations pour optimiser la conception des éoliennes dans le but de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. Les investisseurs, eux, ont besoin de ces informations afin de pouvoir estimer le revenu lié à la production d'électricité.

La distribution de Weibull nous renseigne sur la répartition de la vitesse du vent (vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et la densité de probabilité de la vitesse du vent). Généralement les vitesses du vent sont mesurées à une hauteur de 10 mètres au dessus du sol.

Le modèle mathématique de Weibull est caractérisé par les paramètres de forme  $k$  et d'échelle  $c$ . La fonction de la densité de probabilité de Weibull représente la probabilité  $P(v)$  d'avoir une vitesse du vent  $v$  pendant l'année, comme le montre l'expression suivante (Hiester et al, 1981).

$$P(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (V.8)$$

Cette expression est valable pour :

$$k > 1$$

$$v > 0$$

$$c > 0.$$

Le facteur de forme  $k$  est spécifié par l'utilisateur. De façon générale le facteur de forme est compris 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 faible facteur de forme conduira normalement à une production d'énergie plus élevée. Le facteur d'échelle  $c$ , est calculé à partir de l'équation suivante (Hiester et al, 1981) :

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} f(v) \cdot dv = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (V.9)$$

Où  $\Gamma$  est la fonction GAMMA qui est définie par la relation suivante:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t)t^{x-1} dt \quad \text{avec } x > 0 \quad (V.10)$$

La puissance du vent peut être calculée en utilisant les paramètres de la distribution de Weibull  $(c, k)$  comme suit :

$$\frac{P_{\text{ext}}}{A} = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \quad (V.11)$$

#### V.4.2. Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur

Chaque système de conversion d'énergie éolienne est caractérisé par (Powell et al, 1980, Justus, 1980) :

- La vitesse de démarrage (puissance nulle) ;
- La vitesse nominale ou maximale (puissance maximale) ;
- La vitesse de coupure (puissance constante, pour éviter la détérioration du matériel si la vitesse augmente).

La puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur est donnée sous la forme suivante :

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad (V.12)$$

La variation de la puissance utile fournie est exprimée à l'aide, du système d'équations suivant, appelé aussi loi quadratique (Powell et al, 1980, Justus, 1980):

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_d \\ (\alpha + \beta v + \gamma v^2) P_n & v_d \leq v \leq v_n \\ P_n & v_n \leq v \leq v_c \\ 0 & v > v_c \end{cases} \quad (V.13)$$

Avec  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  déterminés par les conditions suivantes:

$$\alpha = \frac{1}{(v_d - v_n)^2} \left[ v_d (v_d + v_n) - 4v_d v_n \left( \frac{v_d + v_n}{2v_n} \right)^3 \right] \quad (V.14)$$

$$\beta = \frac{1}{(v_d - v_n)^2} \left[ v_d (v_d + v_n) \left( \frac{v_d + v_n}{2v_n} \right)^3 - (3v_d + v_n) \right] \quad (V.15)$$

$$\gamma = \frac{1}{(v_d - v_n)^2} \left[ 2 - 4 \left( \frac{v_d + v_n}{2v_n} \right)^3 \right] \quad (V.16)$$

#### V.4.3. Production énergétique brute

La production énergétique brute est l'énergie annuelle totale produite par le système éolien, avant considération des pertes, à une vitesse du vent donnée, à la pression atmosphérique et aux conditions de température du site étudié. L'énergie brute est calculée par la relation suivante :

$$E_b = 8760 \bar{P} C_H C_T \quad (V.17)$$

$C_H$  et  $C_T$  sont des coefficients de correction barométrique et thermique.

$C_H$  et  $C_T$  sont donnés par :

$$C_H = \frac{P}{P_0} \quad (V.18)$$

$$C_T = \frac{T_0}{T} \quad (V.19)$$

Où :

$P$  est la moyenne annuelle de la pression atmosphérique sur le site ;

$P_0$  est la pression atmosphérique standard de 101,3 KPa ;

$T$  est la moyenne annuelle de la température absolue du site et ;

$T_0$  est la température absolue standard de 288,1 K.

#### V.4.4. Énergie renouvelable captée

L'énergie renouvelable captée est égale à la quantité d'énergie produite par le système éolien, corrigée en fonction des pertes des équipements:

$$E_c = E_b C_L \quad (V.20)$$

$C_L$  est le coefficient de pertes, donné par:

$$C_L = (1 - \lambda_a)(1 - \lambda_s)(1 - \lambda_d)(1 - \lambda_m) \quad (V.21)$$

où:

$\lambda_a$  est le coefficient de pertes par effet de sillage ;

$\lambda_s$  est le coefficient de pertes par encrassement des pales ;

$\lambda_d$  est le coefficient des pertes pour causes d'arrêts et

$\lambda_m$  est un coefficient représentant les pertes diverses.

#### V.4.5. Données météorologiques

Les données météorologiques pour l'ensemble des sites algériens sont fournies par Intermédiaire d'une base de données (SSE) développée par la NASA. Les données SSE de la NASA ont été évaluées à partir de données acquises durant une période de 10 ans (juillet 1983 à juin 1993).

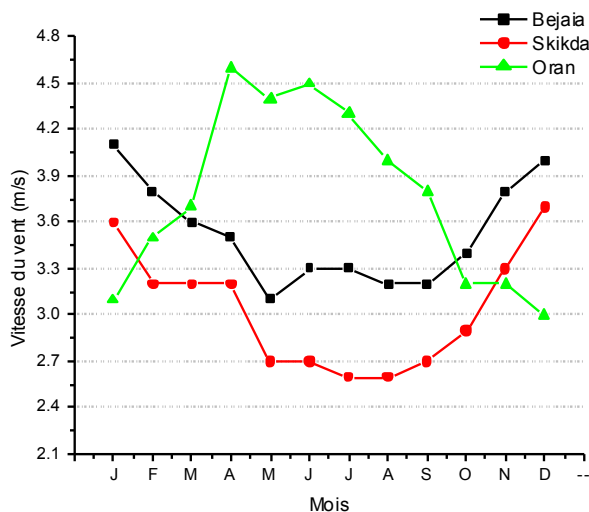
La base de données SSE est essentiellement dérivée de plusieurs bases de données développées par la NASA, incluant le « *Goddard Earth Observing Systems Version 1* » (GEOS-1), utilisant un modèle atmosphérique limité aux observations satellites et de radiosondage. Ces ensembles de données ont été dérivées à partir de l'analyse d'observations effectuées par des satellites orbitant autour de la terre : notamment, le satellite géostationnaire d'observation environnementale (GOES) et le satellite à orbite polaire d'observation

environnementale (POES) de l'Agence américaine des océans et de l'atmosphère (US National Oceanic & Atmospheric Administration), les satellites météorologiques (Meteosat) exploités par l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency), et les satellites géostationnaires exploités par l'Agence météorologique japonaise (Japan Meteorological Agency).

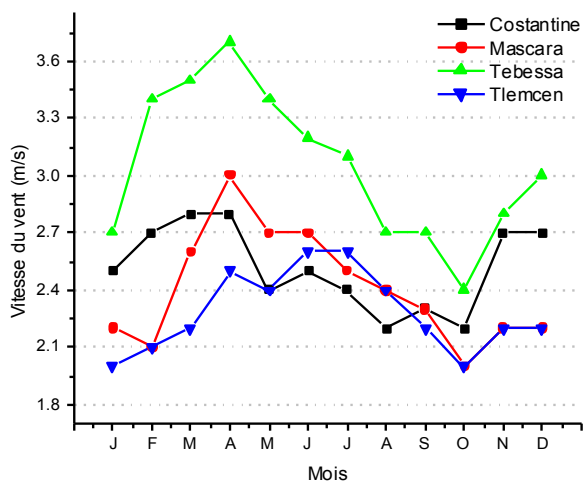
#### **V.4.6. Le Potentiel éolien de l'Algérie**

La variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent aux différents sites de l'Algérie (De l'Est à l'Ouest et du Nord au Sud) est montrée dans les figures V.4 (a, b, c, d, e et e). Pour la zone côtière (Figure V.4.a), la vitesse moyenne diminue dans le sens ouest-est. D'un autre côté, les localités situées dans le nord de l'atlas Tellien (Figure V.4.b) présentent une variation sous forme de cloche, avec des valeurs maximales enregistrées au printemps, sauf pour le cas de Tlemcen où les vitesses maximales sont enregistrées pour la saison d'été.

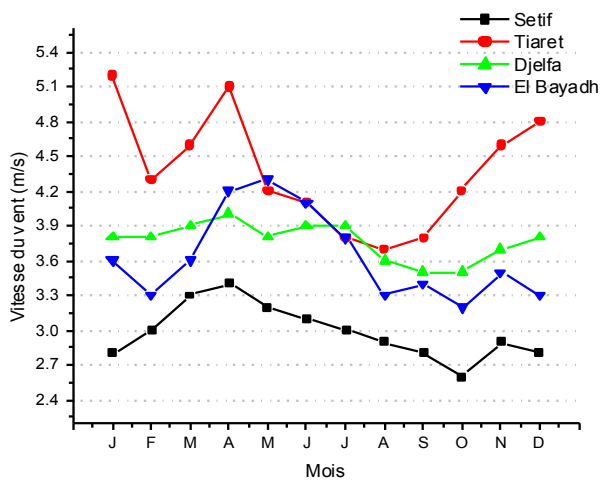
De la même manière, les emplacements situés dans les hauts plateaux (Figure V.4.c) ont une vitesse moyenne de vent plus grande qui atteint son maximum au printemps. Pour la région de Tiaret, les vitesses maximales sont enregistrées durant la période hiver-printemps. Ceci est dû au fait que cette région est située du côté sud de l'atlas Tellien et possède un microclimat, qui est très froid en hiver avec une grande variation de la température ambiante. De la même manière la région de Djelfa est caractérisée par un microclimat étant donné qu'elle est protégée par des montagnes. Les figures (V.4 d et V.4.e) représentent les variations de la vitesse moyenne annuelle au Sahara. La vitesse moyenne est haute et atteint son maximum au printemps.



(a)



(b)



(c)

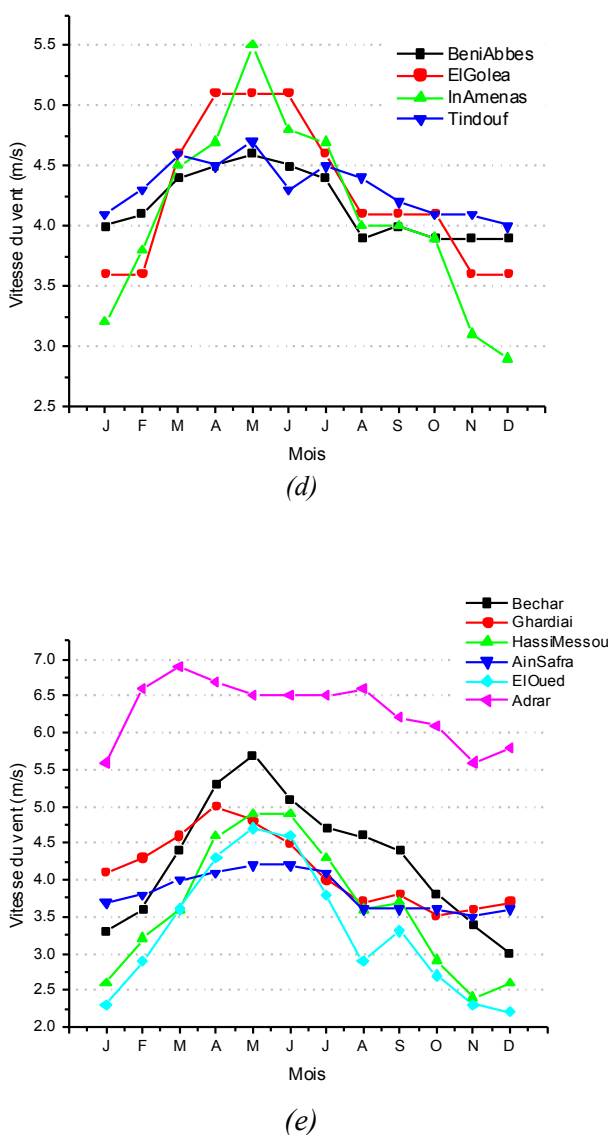
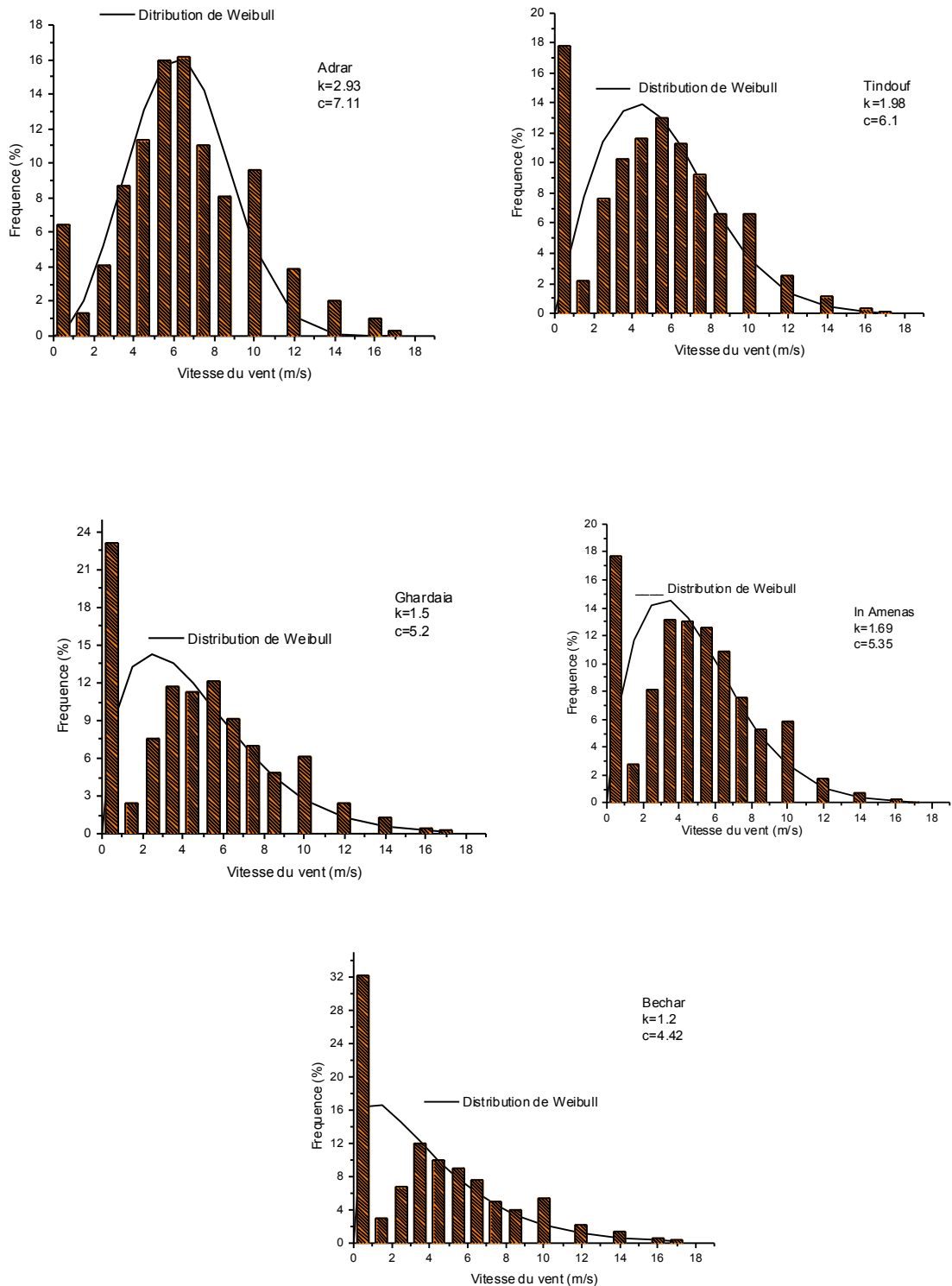


Figure V.4. Vitesses moyennes mensuelles des différents sites Algériens

Bien que le potentiel éolien dépend fortement de la zone climatique à laquelle il appartient et de son relief, nous avons pensé sélectionner des sites qui appartiennent aux différentes zones climatiques algériennes (Figure 5 a,b,c,d et e) et qui présentent les meilleures performances. Le tableau V. 1 présente les cinq meilleurs sites les plus ventés en Algérie avec leurs fréquence du vent en (%) et leur durée donnée pour chaque intervalle de vitesses ainsi que la Puissance théorique (W) correspondant.

Tableau V.1 : données des sites sélectionnés (Diaf et al, 2007)

	Vitesse [m/s]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-11	11-13	13-15	15-17	>17	Total
<b>Adrar</b>	Fréquence du vent [%]	<b>6,4</b>	<b>1,3</b>	<b>4,1</b>	<b>8,7</b>	<b>11,3</b>	<b>16,0</b>	<b>16,1</b>	<b>11,0</b>	<b>8,1</b>	<b>9,6</b>	<b>3,9</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>8742,4</b>
	Durée [h]	560,64	113,88	359,16	762,12	989,88	1401,6	1410,3	963,6	709,56	840,96	341,64	175,2	87,6	26,28	
<b>Bechar</b>	Puissance théorique [W]	0,0048	0,0267	0,3907	2,2753	6,2812	16,238	26,970	28,307	30,343	58,56	41,109	33,476	24,985	8,9907	<b>167,39</b>
	Durée [h]	2820,7	271,56	586,92	1059,9	876	788,4	665,8	446,8	359,2	473	201,5	122,6	52,6	35	
<b>Ghardaïa</b>	Fréquence du vent [%]	<b>23,1</b>	<b>2,4</b>	<b>7,6</b>	<b>11,7</b>	<b>11,3</b>	<b>12,1</b>	<b>9,1</b>	<b>7,0</b>	<b>4,9</b>	<b>6,1</b>	<b>2,5</b>	<b>1,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>8751,2</b>
	Durée [h]	2025,6	210,5	666,4	1025,9	990,9	1061	798	613,8	429,7	534,9	219,2	114	43,8	26,3	
<b>In amenas</b>	Puissance théorique [W]	0,018	0,05	0,728	3,075	6,313	12,341	15,324	18,114	18,431	37,424	26,46	21,849	12,544	9,848	<b>180,83</b>
	Fréquence du vent [%]	<b>17,7</b>	<b>2,8</b>	<b>8,1</b>	<b>13,2</b>	<b>13</b>	<b>12,6</b>	<b>10,9</b>	<b>7,6</b>	<b>5,3</b>	<b>5,9</b>	<b>1,8</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	
<b>Tamanrasset</b>	Durée [h]	1550,5	245,3	709,6	1156,3	1138,8	1103,8	945,8	665,8	464,3	516,8	157,7	61,3	26,3	8,8	<b>8760</b>
	Puissance théorique [W]	0,012	0,035	0,712	3,183	6,664	11,792	16,838	18,035	18,309	33,188	17,496	10,805	6,912	3,05	
<b>Tindouf</b>	Fréquence du vent [%]	<b>34,1</b>	<b>6,0</b>	<b>9,7</b>	<b>11,7</b>	<b>9,7</b>	<b>10,2</b>	<b>7,3</b>	<b>4,7</b>	<b>3,1</b>	<b>2,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>81,95</b>
	Durée [h]	2987,2	525,6	849,7	1024,9	849,7	893,5	639,5	411,7	271,6	236,5	52,6	17,5	0	0	
<b>Tindouf</b>	Puissance théorique [W]	0,026	0,124	0,928	3,076	5,414	10,394	12,279	12,145	11,61	16,538	6,35	3,361	0	0	<b>8777,5</b>
	Fréquence du vent [%]	<b>17,8</b>	<b>2,2</b>	<b>7,6</b>	<b>10,3</b>	<b>11,6</b>	<b>13</b>	<b>11,3</b>	<b>9,2</b>	<b>6,6</b>	<b>6,6</b>	<b>2,5</b>	<b>1,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	
<b>Tindouf</b>	Durée [h]	1556,2	192,3	664,4	900,5	1014,1	1136,5	987,9	804,3	577	577	218,6	96,2	26,2	8,7	<b>185,96</b>
	Puissance théorique [W]	0,014	0,045	0,725	2,7	6,463	13,217	18,974	23,721	24,788	40,364	26,354	18,488	7,526	3,283	



**Figure V.5.** Fréquence de la vitesse du vent et la distribution de Weibull pour les sites sélectionnés (Mahmoudi et al, 2009 b)

La figure V.5 donne les distributions des fréquences des vitesses du vent en termes de pourcentages pour les cinq emplacements choisis. On constate que le site d'Adrar est le plus venté en Algérie avec une vitesse moyenne annuelle voisine de 6,3 m/s. De plus, ce site présente un pourcentage élevé de la fréquence des vitesses supérieures à la valeur de 3 m/s (vitesse de démarrage des éoliennes ( $v_d$ )). En d'autres termes, à Adrar, 88% du temps, les éoliennes peuvent générer de l'électricité et de plus, 7% du temps la production est nominale. Pour les sites de Béchar, Ghardaïa, In Amenas et Tindouf, la vitesse du vent dépasse les 3 m/s pour respectivement, seulement, 58 %, 67 %, 71 % et 72 % du temps, et cela avec, environ de 3 à 5 % du temps où le vent souffle dans la gamme de pleine puissance (valeurs proches de la vitesse nominale).

Les valeurs des paramètres et la distribution de Weibull sont représentés dans la figure V.5. Le site d'Adrar a donc le potentiel d'énergie le plus important comparé aux autres sites, avec une vitesse moyenne du vent égale à 6,34 m/s. L'analyse des paramètres de Weibull montre que le paramètre de forme  $k$  varie entre 1,2 et 2,93 tandis que le facteur d'échelle  $c$  varie entre 4,42 et 7,11 et que les valeurs de  $k$  et de  $c$  les plus élevées concernent le site d'Adrar, tandis que les valeurs les plus faibles ont été enregistrées pour le site de Béchar.

#### V.4.7. L'utilisation du logiciel RETScreen

En choisissant :

- le site d'Adrar pour l'éolien (Wind Energy Conversion System (WECS) et ;
- le site d'In Salah pour le photovoltaïque PV,

Le logiciel RETScreen nous affiche les coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude) et les potentiels des énergies choisies pour alimenter notre station de dessalement. En Algérie la plus part du temps, nous alimentons les grandes centrales thermiques en gaz naturel pour produire l'électricité. Ce dernier est moins polluant que le charbon et le gasoil et, sa combustion génère beaucoup moins de gaz à effet de serre (GES). Le logiciel nous donne, quand même, la quantité de CO<sub>2</sub> que l'on a évité de lâcher dans l'atmosphère en utilisant de telles énergies renouvelables: c'est une contribution à la lutte de l'humanité pour la réduction des gaz à effet de serre (GES). Parmi les données économiques de l'Algérie dont nous disposons, on a pu introduire que le taux d'inflation, les taux des prêts bancaires et les périodes d'amortissement.

Le logiciel comprend également une base de données des principaux fournisseurs d'équipement recherché ainsi que les caractéristiques des produits choisis. Il dispose également d'une large base de données climatique. Notons qu'il existe, en ligne, un manuel d'utilisation détaillé et une étude de cas.

Ainsi, ce logiciel qui est un support financier puissant peut être utilisé dans le monde entier pour évaluer la production énergétique et les économies, les coûts, les réductions d'émissions, la viabilité financière et le risque de l'utilisation des différents types d'énergies renouvelables.

#### ***V.4.7.1. Cas de l'énergie éolienne [A1]***

Pour l'énergie éolienne, le logiciel RETScreen nous a donné les résultats suivants :

- Pour une puissance de 700 KW (*calculée sur la base des résultats obtenus en chapitre V*), il nous faut 14 éoliennes de marque « Atlantic Orient » modèle AOC 15/20 ayant une hauteur de moyeu de 25 m. Le coût de cet investissement serait de 1 120 000,00 \$. La puissance électrique injectée dans le réseau serait de 1840 MWh à un coût de 38 \$/MWh.
- Une telle solution permettrait la réduction de l'émission de 973,9 tonnes de CO<sub>2</sub> par an dans l'atmosphère, soit l'équivalent de 418 473,00 litres d'essence non consommées : ce qui est très appréciable. C'est pour cette raison que des facilités de crédits (taux bonifié) et des dividendes sont empochés par les exploitants de ce genre de station de déminéralisation ayant optés pour l'utilisation des énergies renouvelables.

#### ***V.4.7.2. Cas de l'énergie photovoltaïque [A2]***

Pour l'énergie photovoltaïque, le logiciel RETScreen nous a donné les résultats suivants :

- Pour une puissance de 700 KW, il nous faut 2735 panneaux photovoltaïques de marque Uni-Solar, modèle a-Si-SSR-256W. un tel investissement coûterait 998 275,00 \$. La puissance électrique injectée dans le réseau serait de 1533,40 MWh à un coût de 38 \$/MWh. 2735 panneaux PV nécessitent beaucoup d'espace au sol, dans la région d'In Salah le problème ne se pose pas !
- Une telle solution permettrait la réduction de l'émission de 828,40 tonnes par an de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, soit l'équivalent de 348 808,00 litres d'essence non consommées, ce qui est très appréciable pour la réduction des gaz à effet de serre.

Pour le coté économique, nous avons pris, pour les deux solutions, l'éolien et le PV, un taux d'inflation de 2,0 % et une durée de vie des installations de 25 années. Beaucoup d'autres paramètres dépendent d'aléas monétaires dont on n'est pas maître et plus particulièrement le prix de vente du m<sup>3</sup> d'eau dessalée. Ce dernier relève des politiques car il est régit par des décrets qui ne tiennent pas toujours compte de la rentabilité économique des investissements consentis. Il est à noter des facilités de crédits, à taux bonifiés, et des dividendes peuvent être empochés par les exploitants de la station de déminéralisation ayant optés pour cette solution. À cela s'ajoute le rachat de la quantité d'électricité excédentaire à un prix plus élevé que celui avec lequel la station l'achète du réseau, on sait qu'il est plus élevé mais on ignore sa valeur exacte en Algérie. On ignore également l'impact financier, au moment de l'investissement des mesures incitatives. C'est pour cela que, ne connaissant pas tous les intrants, nous avons opté pour une période d'amortissement relativement longue, près de 13 ans pour l'éolien, et près de 15 ans pour le photovoltaïque. C'est le minimum que l'on puisse faire pour veiller à l'équilibre financier de l'entreprise qui exploite la station. Nous n'avons là dégagé qu'une tendance concernant l'investissement dans les énergies renouvelables, et cette tendance est plus que prometteuse. Il est clair que, dès que toutes les données économiques réelles du pays seront connues, une analyse plus poussée nous permettra d'une part, d'écourter ces périodes d'amortissement (l'amortissement étant une charge pour l'entreprise) et, d'autre part, d'optimiser convenablement de tels investissements.

Les experts de la compagnie Kepler-Cheuvreux ont créé un nouvel indice, le retour énergétique par unité de capital investi (« Energy Return On Capital Invested », EROCI). L'EROCI permet de prendre conscience de l'intérêt majeur de l'électricité solaire et/ou éolienne comparativement à la production électrique par le biais des énergies fossiles. Ceci d'un strict point de vue économique, sans prendre en compte les bénéfices en matière de santé publique, d'environnement, de climat et de dépendance géopolitique (*Olivier Daniélo, 2014*).

Cette étude se base sur des données observées dans le monde réel. Ainsi, en 2013, 39 TWh de PV ont été installés dans le monde, à un coût moyen de 3 dollars par watt installé. Ceci tous pays et toutes catégories confondus : solaire résidentiel et commercial, ainsi que grandes centrales au sol.

Pour déterminer l'indice EROCI pour un investissement donné, il y a lieu de se poser la question suivante : quelle quantité d'énergie produit-on en investissant \$100 milliards dans le solaire photovoltaïque ?

En supposons qu'un dixième des 100 milliards est utilisé pour financer la maintenance des installations, la production électrique est alors de 35 TWh par an, pendant plus de 20 ans. On admettant que les rendements des machines électriques sont de l'ordre de 67,5%, y compris les pertes dues au transport de cette énergie, sur les 35 TWh bruts d'électricité PV obtenus chaque année, il reste 24 TWh nets.

Concernant les énergies fossiles, dont l'extraction est de plus en plus difficile, en investissant 100 milliards de dollars on peut extraire 1 milliard de barils, c'est-à-dire 85 TWh par an pendant 20 ans. En tenant compte du rendement de 25% des installations thermiques, il ne reste que 21 TWh nets sur les 85 TWh bruts.

Avec une période de référence de 20 ans, 100 milliards de dollar investis dans le PV permettent ainsi d'obtenir 14% d'énergie nette en plus que les 100 milliards de dollar investis dans le pétrole.

De la même manière, concernant l'éolien terrestre, un investissement de 100 milliards de dollar permet de produire 117 TWh bruts par an pendant 20 ans, et 76 TWh nets en sortie de moteur électrique. Autrement dit l'éolien terrestre est encore plus intéressant que le solaire PV et trois fois plus que les carburants pétroliers. L'éolien offshore, même s'il est environ deux fois plus coûteux que l'éolien terrestre, reste cependant pertinent comparativement aux énergies fossiles.

De plus, ces résultats ne tiennent pas compte :

- De la taxation des produits pétroliers et ;
- Des avantages fiscaux et des mesures incitatives de l'investissement dans les énergies renouvelables.

Indépendamment des aspects sécuritaires, sanitaires, environnementaux, ces deux derniers points rendent l'électricité solaire et éolienne plus attractives. De plus, dans leur rapport, les experts ont également réalisés des estimations sur des investissements qui seront menés en 2020 ou en 2035. L'écart se creuse considérablement en faveur de l'utilisation solaire éolienne au point où, en 2035 l'EROCI net pour un investissement de 100 milliards de dollars sera pour le solaire PV de 33 TWh par an et sur 20 ans, contre 15 TWh pour la filière pétrole, avec le baril à 145 dollars, et 17 TWh avec le baril à 125 \$. Et, l'EROCI sera de 95 TWh pour l'éolien terrestre, soit environ 6 fois plus qu'avec le pétrole ! « Il sera presque indécent de comparer les EROCI nets du pétrole et des renouvelables en 2035 » : écrivent les analystes, tant ces énergies durables écraseront ce combustible fossile par leur compétitivité,

en effet, Il est difficile de rivaliser avec le plus grand réacteur nucléaire naturel, libre et ouvert à tous qu'est le Soleil : à bon entendeur salut !

## **Conclusion générale**

## **CONCLUSION GENERALE**

Si comme on le dit souvent « conclure » c'est terminer ce que l'on a entrepris, alors on va boucler notre travail de recherche on faisant un bilan objectif de ce qui a été fait. Partant d'une constatation que notre pays connaît un grave problème d'alimentation en eau potable, notamment dans les grandes mégapoles côtières, et en sachant que nos dirigeants se sont irrémédiablement tournés vers le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, on s'était posé la question de savoir « comment les énergies renouvelables pouvaient atténuer, quelque peu, la consommation des énergies d'origines fossiles dont sont « voraces » ces techniques de dessalement ? »

Si ces procédés nous permettent de ne pas endurer les aléas de la météo, la problématique du manque d'eau risque de se transformer en problématique de consommation excessive d'énergie fossile.

D'où l'origine de notre réflexion : vu les gigantesques gisements solaire et éolien, sur l'ensemble du territoire, et géothermique au sud du pays, peut-on maîtriser ces potentiels pour piloter des installations de dessalement ?

Sans tomber dans l'emphase et l'autosatisfaction, nous pensons que nos résultats sont satisfaisants car ils nous permettent de répondre par l'affirmative au questionnement initial. À titre d'exemple nous ne citerons que l'exemple australien, à Perth où une ferme d'éoliennes alimente une usine de dessalement d'une capacité de 200.000 m<sup>3</sup> par jour et l'énergie électrique excédentaire est utilisée par une municipalité voisine.

Nous pouvons faire autant ou plus en Algérie, il n'y a pas l'ombre d'un doute ! Mais, pour ce faire, si les moyens économiques sont là, ce qui nous manque le plus c'est une volonté politique à la hauteur du défi !

Comme dans toute résolution de problème technologique, la solution trouvée a toujours des limites. C'est pourquoi nous devons noter que pour les grandes stations de dessalement, l'utilisation des énergies renouvelables dans le processus de dessalement lui-même s'avère difficile. On ne pourra les utiliser que pour alimenter les équipements auxiliaires. Rien que pour cela, on peut dire que les énergies renouvelables ne constituent donc pas une réelle alternative aux énergies fossiles, du moins pour le moment, et c'est ce qui semble confirmer les idées reçues !

Par contre, pour les petites et moyennes installations, a fortiori celles qui sont isolées, cette solution est appropriée. Les exemples sont nombreux où, dans notre vaste Sahara, des stations pilotes déminéralisent les eaux saumâtres pour le grand bonheur des populations.

Au vu de cette étude, nous pensons, et nous ne sommes pas les seuls, que l'Algérie est en passe de lever le défi pour pourvoir 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an et par habitant. C'est là un constat encourageant bien que d'autres efforts sont à déployer pour, entre autres, actualiser le prix moyen du m<sup>3</sup> d'eau qui est actuellement de l'ordre de 0,5 \$/m<sup>3</sup>. Ce résultat est le fruit de la bonne maîtrise, de par le monde, de la technique qu'est l'osmose inverse (RO). C'est une technique membranaire appropriée pour notre pays et elle est amenée à connaître d'autres progrès avec le l'accroissement, d'une part, du taux de recouvrement des membranes et, d'autre part, des dispositifs de récupération d'énergie, à partir de la saumure (brine), tels que les «Boosters et les échangeurs de pression (XP, DWEER).

La résolution du problème d'alimentation en eau potable réalisée dans notre pays est une bonne chose mais, assurer sa pérennité pour en faire un développement durable, est une toute autre chose. Nous pensons que le problème est pris en charge car, avec le «tarissement» annoncé des énergies fossiles, nos politiques se sont investis pour l'utilisation progressive des énergies renouvelables. La chute dramatique de leurs prix devrait accélérer cette nécessaire mutation : « à quelle que chose, malheur est bon ! ». Cette mutation est en train de se concrétiser avec la création de laboratoires au niveau de nos universités qui viennent s'ajouter aux centres de recherche existants tels que le CDER, l'UDES et bien d'autres, autant de perspectives attendues : sans nul doute, les résultats seront au rendez-vous !

Avec l'augmentation des capacités d'immobilisation qui seront de l'ordre de 8,4 milliards de m<sup>3</sup> en 2016, avec la réutilisation des eaux usées, et surtout avec le dessalement, la disponibilité de l'eau potable est assurée au niveau de tous (ou presque) les foyers. Mais, comme mesures d'accompagnement, il faudrait améliorer la « gestion intégrée de l'eau » déjà mise en place, parer aux nombreuses fuites existantes dans les réseaux d'AEP et il faut surtout pousser l'algérien lambda à être parcimonieux dans sa consommation de l'eau potable.

La seule façon pour y arriver c'est de lui faire payer l'eau à son prix coûtant ! C'est là un choix politique apparemment difficile à faire, sans compter l'arsenal juridique qu'il faut changer : social, quand tu nous tiens !

Un autre point qui a été soulevé dans notre travail, c'est la volonté d'éviter la disparité dans l'approvisionnement en eau potable entre régions. L'État y veille en assurant et en mettant en place de grands transferts Nord-Nord, Nord-Sud, Sud-Nord tels que le MAO, In Salah-Tamanrasset bien d'autres.

Comme dernier point, nous avons étoffé notre travail par une étude de cas : le dimensionnement de la station de déminéralisation des eaux saumâtres d'In Salah d'une capacité de 100.000 m<sup>3</sup>/jour. Afin de déterminer l'énergie consommée par cette station, nous

avons pu exécuter, avec succès, au niveau du CERTH (Grèce) une simulation, en utilisant les logiciels ROSA et « PHREEQC » version 2.15.07. Ces résultats numériques ont été validés par les résultats expérimentaux menés parallèlement au niveau de ce même centre de recherche en utilisant une membrane dite « à faible pression ».

Enfin, pour boucler la boucle, le logiciel « RETScreen plus » nous a permis d'évaluer les différents potentiels énergétiques du sud Algérien (Solaire, Éolien). Riche de ces données, et en utilisant le même logiciel, une étude technico-économique 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 station de 100.000 m<sup>3</sup>/jour qui utilise l'osmose inverse, RO, comme technique de production.

En guise de perspectives, puisque l'eau saumâtre d'In Salah est pompée de la nappe albienne à une température avoisinant les 34,5°C, des questions nous viennent à l'esprit :

- l'électricité que l'on pourrait produire à partir de cette énergie géothermique, serait-elle une solution économiquement viable pour alimenter la technique RO ?
- La technique dite « Membrane Distillation » (MD), qui utilise une membrane hydrophobe, est-elle tout aussi rentable pour la production d'eau douce ?

Pour ce dernier point, nous avons effectués un séjour d'un mois à la PSA, Plateforme Solaire d'Almería (Espagne) où nous avons menés une série de tests, sur différents modules, pour étudier la rentabilité de la technique « Membrane Distillation » quand à la déminéralisation de l'eau saumâtre d'In Salah. Les résultats, techniques et économiques, feront l'objet d'une prochaine publication in chaa Allah.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abid K, Zouari K, Abidi B. Identification and characterisation of hydrogeological relays of continental intercalaire aquifer of southern Tunisia, Carbonates. *Evaporites* 25 (2010) 65–75.
- Algerian Energy Company (AEC) (2011) website: [www.aec.dz](http://www.aec.dz)
- Algerienne des Eaux (ADE) (2011) website: [www.ade.dz](http://www.ade.dz)
- Al-Hallaj, S., Farid, M.M.&Tamimi, A.R.: Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle: performance of the unit. *Desalination* 120 (1998), pp. 273–280.
- Bernal-Agustin, J.L. & Dufo-Lopez, R.D.: Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009), pp. 2111–2118.
- Bessenasse M, Kettab A, Moulla AS (2010) Seawater desalination: study of three coastal stations in Algiers region. *Desalination* 250:423–427
- Bouhekima, B.: A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria. *Desalination* 159 (2003) pp. 197–204.
- Bourouni, K., Martin, R., Tadrist, L. & Chaibi, M.T.: Heat transfer and evaporation in geothermal desalination units. *Applied Energy* 64:1 (1999b), pp. 129–147.
- Bourouni K., Chaibi, M.T. & Tadrist, L.: Water desalination by humidification and dehumidification of air: state of the art. *Desalination* 137 (2001), pp. 167–176.
- Bourouni, K. & Chaibi, M.T.: Application of geothermal energy for brackish water desalination in the south of Tunisia. *Proceedings World Geothermal Congress*, 24–29 April 2005, Antalya, Turkey, 2005.
- BlurbWire: Kiwana desalination plant (2010). [http://www.blurbwire.com/topics/Kwinana\\_Desalination\\_Plant](http://www.blurbwire.com/topics/Kwinana_Desalination_Plant) (accessed Aout 2012).
- Burgess, G. & Lovegrove, K.: Solar thermal powered desalination: membrane versus distillation technologies. *Solar* 2005, <http://solar-thermal.anu.edu.au/wp-content/uploads/DesalANZSES05.pdf>
- Cataldi, R., Hodgson, S. & Lund, J. (eds): *Stories from a heated earth—our geothermal heritage*. Geothermal Resources Council, Davis, CA, 1999.
- Chapa, J.: Wave energy: Aquabuoy 2.0. 2007, <http://www.inhabitat.com/2007/10/08/wave-energy-aquabuoy-20-wave-power-generator/>
- Childs, W.D., Dabiri, A.E., Al-Hinai, H.A. & Abdullah, H.A.: VARI-RO solar powered desalting study. *Desalination* 125 (1999), pp. 155–166.
- Childs, W.D. & Dabiri, A.E.: MEDRC R&D report — VARI-RO solar-powered desalting study. ([www.medrc.org](http://www.medrc.org)). Research project 97-AS-005b, 2000.
- Cipollina A, Misseri A, Staiti G, Galia A, Micale G, Scialdone O. Integrated production of fresh water, sea salt and magnesium from sea water, *Desalination and Water Treatment*. 49 (2012) 390–403.
- Cours intensifs sur le dessalement par énergies renouvelables. Plate forme d'Almeria, Espagne. Mai 2014.

- Danis P. Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés. J 2 700, Juin 2003.
- Davies, P.A. & Paton, C.: The seawater greenhouse in the United Arab Emirates: thermal modelling and evaluation of design options. *Desalination* 173 (2005), pp. 103–111.
- Delucchi, M.A. & Jacobson, M.Z.: Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy* 39 (2011), pp. 1170–1190.
- Diaf S, Belhamel M, Haddadi M, Louche A. Assessment of wind energy resource in southern Algeria. *Revue des Énergies Renouvelables*, 10 (3) (2007), pp. 321–333
- Dorn, J.G.: World geothermal power generation nearing eruption. Plan B Updates; Earth Policy Institute: Washington DC, USA, 14 August 2008, <http://www.earthpolicy.org/Updates/2008/Update74.htm>
- Dow Water & Process solutions, Reverse Osmosis System Analysis (ROSA). Design software version 9.0.0. ([http://www.dowwaterandprocess.com/support\\_training/design\\_tools/rosa.htm](http://www.dowwaterandprocess.com/support_training/design_tools/rosa.htm))
- Drouiche N, Ghaffour N, Naceur M.W, Lounici H. Towards sustainable water management in Algeria, *Desalination and Water Treatment*. 50 (2012) 272–284.
- Drouiche, N. Ghaffour N, Naceur M.W, Mahmoudi H, Ouslimane T. Reasons for the fast growing seawater desalination capacity in Algeria, *Water Resource Management*. 25 (2011) 2743–2754.
- El Kharraz J, El-Sadek A, Ghaffour N, Mino E. Water scarcity and drought in WANA countries, *Proc. Eng.* 33 (2012) 14–29.
- Eltawil, M.A., Zhengminga, Z. & Yuana, L.: A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13:9 (2009), pp. 2245–2262.
- ESCWA (2009) Role of desalination in addressing water scarcity. E/ESCWA/SDPD/2009/4 ISSN. 1817-1990 ISBN. 978-92-1-128329-7 09-0479, United Nations Publication Sales No. E.09.II.L.7
- Fath, M.E.S.: Solar desalination: a promising alternative for water provision with free energy, technology and a clean environment. *Desalination* 116 (1998) pp. 45–56.
- Fekraoui, A. & Kedaid, F.: Geothermal resources and uses in Algeria: A country update report. *Proceedings World Geothermal Congress*, 24–29 April 2005, Antalya, Turkey, 2005, pp. 24–29.
- Fridleifsson, I.B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J.W., Ragnarsson, A. & Rybach, L.: The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In: O. Hohmeyer & T. Trittin (eds): *Proceedings IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*, 20–25 January 2008, Lübeck, Germany, 2008, pp. 59–80.
- Frondel, M., Ritter, N., Schmidt, C.M. & Vance, C.: Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies—the German experience. *Energy Policy* 38:8 (2010), pp. 4048–4056.
- Jacobson, M.Z. & Delucchi, M.A.: Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy* 39 (2011), pp. 1154–1169.

- Huttner K. Overview of existing water and energy policies in the MENA region and potential policy approaches to overcome the existing barriers to desalination using renewable energies, *Desalination and Water Treatment*. 51 (2013) 87–94.
- Ghaffour, N.: The challenge of capacity-building strategies and perspectives for desalination for sustainable water use in MENA. *Desalination and Water Treatment*. 5:1–3 (2009), pp. 48–53.
- Ghaffour N, Reddy V.K, Abu-Arabi M. Technology development and application of solar energy in desalination: MEDRC contribution, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 4410–4415.
- Ghaffour N, Missimer T.M, Amy G.L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination* 309 (2013) 197–207.
- Ghaffour N, Bundschuh J, Mahmoudi H, Goosen M.F.A . Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. In press. *Desalination*, 2014
- Ghermandi, A. & Messalem, R.: Solar-driven desalination with reverse osmosis: the state of the art. *Desalination and Water Treatment*. 7 (2009), pp. 285–296.
- Goosen, M.F.A. & Shayya, W.: Water management, purification and conservation in arid climates. In: M.F.A. Goosen & W.H. Shayya (eds): *Water management, purification and conservation in arid climates: Volume I: Water management*. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1999, pp. 1–6.
- Goosen, M.F.A., Sablani, S., Shayya, W.H., Paton, C. & Al-Hinai, H.: Thermodynamic and considerations in solar desalination. *Desalination* 129 (2000), pp. 63–89.
- Goosen, M.F.A., Mahmoudi, H. & Ghaffour, N.: Water desalination using geothermal Energy. *Energies* 3 (2010), pp. 1423–1442.
- Goosen, M., Mahmoudi, H., Ghaffour, N. & Sablani, S.S.: Application of renewable energies for water desalination, In: M. Schorr (ed.): *Desalination, trends and technologies*, InTech, 2011, pp. 89–118, <http://www.intechopen.com/articles/show/title/application-of-renewable-energies-for-water-desalination> (accessed October 2012).
- Goosen M, Mahmoudi H, Ghaffour N. Today's and future challenges in applications of renewable energy technologies for desalination, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, (2014) 44:929–999.
- Gude, V. & Nirmalakhandan, N.: Sustainable desalination using solar energy. *Energy Conversion Management*. 51 (2010), pp. 2245–2251.
- Guendouz A, Michelot J.L. Chlorine-36 dating of deep groundwater from northern Sahara, *Journal of Hydrology*. 328 (2006) 572–580.
- Hiestler, T.R. and Pennell, W.T., *The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems*, WindBooks, New York, NY, USA, 1981.
- Houcine, I., Benjemaa, F., Chahbani, M.H. & Maalej, M.: Renewable energy sources for water desalting in Tunisia. *Desalination* 125:1–3 (1999), pp. 123–132.

- Huang, S. & Liu, J.: Geothermal energy stuck between a rock and a hot place. *Nature* 463 (2010), p. 293.
- Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M (2007) Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resource Management* 21(4):775–788
- Journal officiel: [http:// www.joradp.dz/HAR/Index.htm](http://www.joradp.dz/HAR/Index.htm), consulté le 13 mai 2013.
- Justus C.G., / traduit et adapté par Plazy J.L., « Vent et performances des éoliennes », édition S.C.M, Paris, (1982).
- Kadyrzhanov, K.K., Lukashenko, S.N. & Lushchenko, V.N.: Assessment of environmental impact of reactor facilities in Khazakstan. In: J.D.B. Lambert & K.K. Kadyrzhanov (eds): Safety related issues of spent nuclear fuel storage. Springer, 2007, <http://www.springerlink.com/content/64270j0u525166u5/>
- Kalogirou, S.: Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy Combustion Science*. 31 (2005), pp. 242–281.
- Karabelas A.J. Key issues for improving the design and operation of membrane modules for desalination plants. *Desalination and Water Treatment*. doi:10.1080/19443994.2013.790322.
- Karabelas A.J, Koutsou C.P, Kostoglou M. The effect of spiral wound membrane element design characteristics on its performance in steady state desalination — A parametric study, *Desalination* 332 (2014) 76–90.
- Kedaid F.Z. Database on the geothermal resources of Algeria, *Geothermics* 36 (2007) 265–275.
- Kempton, W. & Dhanju, A.: Electric vehicles with V2G storage for large-scale wind power. *Windtech International* 1:2 (2006), [http://www.wwindea.org/technology/ch04/en/4\\_3\\_4.html](http://www.wwindea.org/technology/ch04/en/4_3_4.html)
- Khamis, I.: A global overview on nuclear desalination. *International Journal Nuclear Desalination*. 3:4 (2009), pp. 311–328.
- Koschikowski, J. & Heijman, B.: Renewable energy drives desalination processes in remote or arid regions. *Membrane Technology*. 8 (2008), pp. 8–9.
- Koutsou C.P, Yiantsios S.G, Karabelas A.J. Direct numerical simulation of flow in spacer-filled channels: Effect of spacer geometrical characteristics, *Journal of Membrane Sciences* 291 (2007) 53–69.
- Koutsou C.P, Yiantsios S.G, Karabelas A.J. A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number. *Journal of Membrane Science*. 326 (2009) 234–251.
- Krysanova V, Dickens C, Timmerman J, Varela-Ortega C, Schlüter M et al (2010) Cross-comparison of climate change adaptation strategies across large river basins in Europe, Africa and Asia. *Water Resource Management* 24(14):4121–4160
- Lerner, J., Grundmeyer, M. & Garvert, M.: The role of wind forecasting in the successful intergration and management of an intermittent energy source. *Energy Central, Wind Power* 3:8 (2009), pp. 1–6.
- Lund, J.W.: Characteristics, development and utilization of geothermal resources. *GHC Bulletin*, June (2007), pp. 1–9.

- Mahmoudi H. Etude d'une serre de dessalement par énergies renouvelables, cas de l'Algérie. Thèse de Doctorat ès Sciences, USTO, 1998.
- Mahmoudi, H., Abdul-Wahab, S.A., Goosen, M.F.A., Sablani, S.S., Perret, J. & Ouagued, A.: 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), pp. 119–127.
- Mahmoudi H, Ouagued A, Ghaffour N. Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009a) 921–926.
- Mahmoudi H, Spahis N, Goosen M.F, Sablani S, Abdul-wahab S.A, Ghaffour N, Drouiche N. Assessment of wind energy to power solar brackish water greenhouse desalination units: A case study from Algeria, *Renewable Sustainable Energy Reviews* 13 (2009b) 2149–2155.
- Mahmoudi H, Spahis N, Goosen M.F, Ghaffour N, Drouiche N, Ouagued A. Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 512–517.
- Mathioulakis, E., Belessiotis, V. & Delyannis, E.: Desalination by using alternative energy: review and state-of-the-art. *Desalination* 203 (2007), pp. 346–365.
- Maurel. A. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Lavoisier Tec&Doc. 2001.
- Ministère des Ressources en Eaux (MRE) (<http://www.mre.dz/>), consulté le 13 Juillet 2013.
- Misra, B.M.: Sustainable desalination technologies for the future. *International Journal of Nuclear Desalination*. 4:1 (2010), pp. 37–48.
- Mohamed MM, Al-Mualla AA (2010) Water demand forecasting in Umm Al-Quwain (UAE) using the IWR-MAIN specify forecasting model. *Water Resource Management* 24(14):4093–4120
- Mohamedou Ould Baba Sy. Thèse de Doctorat en Géologie, Faculté de Tunis. Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara septentrional. 2005.
- Morgan Mozas & Alexis Ghosn, État des lieux du secteur de l'eau en Algérie, IPEMED. Octobre 2013.
- Moriarty, P.&Honnery, D.: Hydrogen's role in an uncertain energy future. *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009), pp. 31–39.
- Moudjeber D.E, Mahmoudi H, Djennad M, Sioutopoulos D, Mitrouli S & Karabelas A.J. Brackish water desalination in the Algerian Sahara—Plant design considerations for optimal resource exploitation, *Desalination and Water Treatment*, 52:22-24 (2014), 4040-4052,
- Narayan, G.P., Sharqawy, M.H., Summers, E.K, Lienhard, J.H., Zubair, S.M. & Antar, M.A.: The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14:4 (2010), pp. 1187–1201.
- Office National des Statistiques (ONS) (2011) website: [www.ons.dz](http://www.ons.dz)

- Olivier Daniélo « Kepler-Chevreaux : 100 milliards investis dans le solaire photovoltaïque et l'éolien produisent davantage d'énergie qu'avec le pétrole » News letter-Technique de l'ingénieur ; 22 septembre 2014
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS) <http://www.who.int/> , site visité le 13 avril 2013,
- Ouali S, Khellaf A, Baddari K. Exploitation of Albian Geothermal Water in South Algeria. EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications. 2–4 November 2010, Ghardaïa, Algeria.
- Parkhursts D.L, Appelo C.A.J. User's guide to PHREEQC (version 2)—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 1999
- Popiel, C., Wojtkowiak, J. & Biernacka, B.: Measurements of temperature distribution in ground. *Exp. Thermal Fluid Science*. 25 (2001), pp. 301–309.
- Powell W.R., « An analytical expression for the average output power of a wind machine », *Solar Energy*, Vol. 26, N°2, pp. 77-80, Applied Physics Laboratory, John Hopkins University, John Hopkins Road, lawrel, MD 20810 U.S.A, July (1980).
- Rangi, R., Templin, J., Carpentier, M. and Argue, D., *Canadian Wind Energy Technical and Market Potential*, DTEER, énergie, mines et ressources Canada, 1992.
- Reddy, V.K. & Ghaffour, N.: Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies. *Desalination* 205 (2007), pp. 340–353.
- Reif, T.: Profitability analysis and risk management of geothermal projects. *GHC Bulletin* January (2008), pp. 1–4.
- Rodríguez, G., Rodríguez, M., Perez, J. & Veza, J.: A systematic approach to desalination powered by solar, wind and geothermal energy sources, In: *Proceedings of the Mediterranean conference on renewable energy sources for water production*. European Commission, EUORED Network, CRES, EDS, 10–12 June 1996, Santorini, Greece, 1996, pp. 20–25.
- Sadi A, Kehal S (2002) Retrospectives and potential use of saline water desalination in Algeria. *Desalination* 152:51–56
- Sadhvani, J.J. & Veza, J.M.: Desalination and energy consumption in Canary Islands, *Desalination* 221 (2008), pp. 143–150.
- Schwarzer, K., Vieira, M.E., Faber, C. & Müller, C.: Solar thermal desalination system with heat recovery. *Desalination* 137:1–3 (2001), pp. 23–29.
- Serpen, U., Aksoy, N. & ngür, T.: 2010 present status of geothermal energy in Turkey. *Proceedings Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1–3 February 2010, SGP-TR-188, Stanford University, Stanford, CA, 2010.
- Singh R. Brine recovery at industrial RO plants: Conceptual process design studies, *Desalination and Water Treatment*. 8 (2009) 54–67.
- Sioutopoulos D.C, Karabelas A.J. Correlation of organic fouling resistances in RO and UF membrane filtration under constant flux and constant pressure. *Journal of Membrane Science*. 407–408 (2012) 34–46.
- Shiklomanov I.A. in *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. 2000.
- Shulman A, David I, Gelman E, Priel M. Control and management of brine disposal for inland desalination plants, *Desalination and Water Treatment*. 31 (2011) 71–81.

- Stefansson, V.: World geothermal assessment. Proceedings of the World Geothermal Congress, 24–29 April 2005, Antalya, Turkey, 2005.
- Stock Trading: How quickly will Saudi Arabia turn to nuclear vitality? (July 3rd, 2010 by admin)(<http://www.profitablenicheinnovation.com/trading/day-trading/stock-trading-how-quickly-willsaudi-arabia-turn-to-nuclear-vitality>) (accessed July 2013).
- Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, 2010.
- Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., DiPippo, R., Drake, E.M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M.C., Nichols, K., Petty, S., Toksoz, M.N., Veatch, R.W., Baria, R., Augustine, C., Murphy, E., Negraru, P. & Richards, M.: Impact of enhanced geothermal systems on U.S. energy supply in the twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. A* 365 (2007), pp. 1057–1094.
- Todorov T, Rabadjieva D, Tepavitcharova S. New thermodynamic database for more precise simulation of metal species in natural Waters, *J. Univ. Chem. Tech. Metal.* 41 (2006) 97–102.
- Tzen, E., Theofilloyianakos, D. & Karamanis, K.: Design and development of a hybrid autonomous system for seawater desalination. *Desalination* 166 (2004), pp. 267–274.
- WDR/GWI (2010–2011) IDA Desalination Yearbook and market profile Wheida E, Verhoeven R (2007) An alternative solution of the water shortage problem in Libya. *Water Resour Manage* 21(6):961–982
- White, D.E. & Williams, D.L. (eds): Assessment of geothermal resources of the United States – 1975. U.S. Geological Survey Circular 727, U.S., Government Printing Office, 1975.
- Wright, J.D.: Selection of a working fluid for an organic Rankine cycle coupled to a salt-gradient solar pond by direct-contact heat exchange. *J. Sol. Energy Eng.* 104:4 (1982), pp. 286–293.
- Wright, M.: Nature of geothermal resources, In: J.W. Lund (ed.): Geothermal direct-use engineering and design guidebook. Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR, 1998, pp. 27–69.



**RETScreen® International**  
www.retscreen.net  
Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres

**Information sur le projet** [Voir la Base de données de projets](#)

Nom du projet: Station de demineralisation de In Salah  
Lieu du projet: In Salah

Préparé pour: Doctorat en Genie Mecanique  
Préparé par: Moudjebber Djamel Eddine

Type de projet: Production d'électricité

Technologie: Eolienne  
Type de réseau: Réseau central

Type d'analyse: Méthode 1

Pouvoir calorifique de référence: Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Afficher paramètres:

Langue - Language: English - Anglais  
Manuel de l'utilisateur: English - Anglais

Devise: Euro

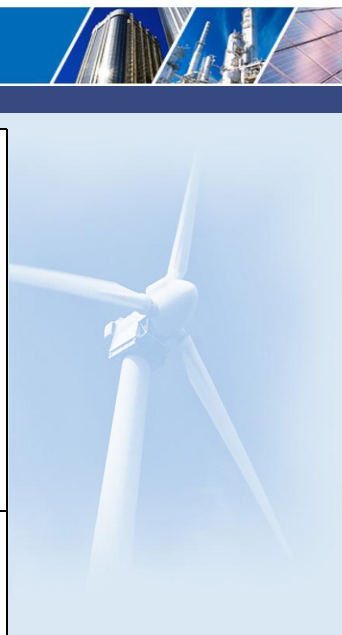
Unités: Unités métriques

---

**Conditions de référence du site** [Choisir le lieu des données climatiques](#)

Lieu des données climatiques: Adrar/Touat

Afficher information:



	Lieu des données	
	Unité	Lieu du projet
Latitude	°N	27.9
Longitude	°E	-0.2
Élévation	m	283
Température extérieure de calcul de chauffage	°C	4.2
Température extérieure de calcul de climatisation	°C	45.9
Amplitude des températures du sol	°C	27.0

Mois	Température de l'air	Humidité relative	Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Température du sol	Degrés-jours de chauffage	Degrés-jours de climatisation
	°C	%	kWh/m <sup>2</sup> /j	kPa	m/s	°C	°C-j	°C-j
Janvier	12.4	38.6%	4.42	98.8	5.8	13.3	174	74
Février	16.0	31.7%	5.22	98.6	6.5	16.8	56	168
Mars	19.4	26.5%	6.50	98.3	6.7	21.8	0	291
Avril	23.6	23.2%	7.22	97.9	6.6	27.3	0	408
Mai	28.1	20.1%	7.67	97.7	6.8	32.4	0	561
Juin	33.6	17.5%	8.14	97.7	6.4	37.6	0	708
Juillet	36.0	14.7%	8.03	97.6	6.5	39.7	0	806
Août	35.4	16.8%	7.56	97.7	6.3	38.9	0	787
Septembre	31.6	22.3%	6.50	97.9	6.3	34.9	0	648
Octobre	25.0	29.4%	5.36	98.2	5.9	28.0	0	465
Novembre	18.2	36.3%	4.42	98.5	5.7	20.4	0	246
Décembre	12.9	41.5%	3.83	98.7	5.7	14.8	158	90
Annuel	24.4	26.5%	6.24	98.1	6.3	27.2	388	5 253
Mesuré à	m				10.0	0.0		



[Compléter la feuille Modèle énergétique](#)

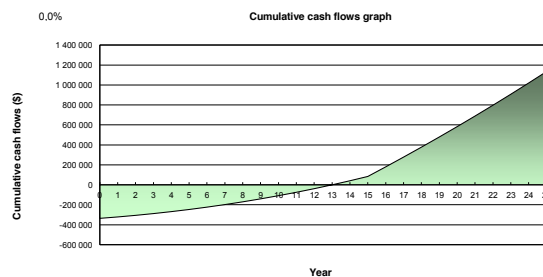
RETScreen Energy Model - Power project

Show alternative units

Proposed case power system		Incremental initial costs	
Analysis type	<input checked="" type="radio"/> Method 1 <input type="radio"/> Method 2 <input type="radio"/> Method 3		
Wind turbine			
Power capacity	kW	700.0	\$ 1 120 000
Manufacturer	Atlantic Orient		
Model	AOC 1550 - 25m		
Capacity factor	%	30.0%	14 unit(s)
Electricity exported to grid	MWh	1 840	
Electricity export rate	\$/MWh	38.00	\$/kWh 0.038

Emission Analysis				
Base case electricity system (Baseline)		GHG emission factor (excl. T&D)	T&D losses	GHG emission factor
Country - region	Fuel type	TCO2/MWh	%	TCO2/MWh
Algeria	Natural gas	0.540	30.0%	0.772
Electricity exported to grid	MWh	1 840	T&D losses	30.0%
<b>GHG emission</b>				
Base case	TCO2	1 419.7		
Proposed case	TCO2	425.9		
Gross annual GHG emission reduction	TCO2	993.8		
GHG credits transaction fee	%	2.0%		
Net annual GHG emission reduction	TCO2	973.9	is equivalent to	418 473 Litres of gasoline not consumed
<b>GHG reduction income</b>				
GHG reduction credit rate	\$/TCO2	20.00		
GHG reduction credit duration	yr	15		
GHG reduction credit escalation rate	%	2.0%		

Financial Analysis				
<b>Financial parameters</b>				
Inflation rate	%	2.0%		
Project life	yr	25		
Debt ratio	%	70%		
Debt interest rate	%	5.31%		
Debt term	yr	15		
<b>Initial costs</b>				
Power system	\$	1 120 000	100.0%	
Other	\$	0	0.0%	
<b>Total initial costs</b>	\$	1 120 000	100.0%	
Incentives and grants	\$		0.0%	
<b>Annual costs and debt payments</b>				
O&M (savings) costs	\$			
Fuel cost - proposed case	\$	0		
Debt payments - 15 yrs	\$	77 123		
<b>Total annual costs</b>	\$	77 123		
<b>Annual savings and income</b>				
Fuel cost - base case	\$	0		
Electricity export income	\$	69 905		
GHG reduction income - 15 yrs	\$	19 479		
<b>Total annual savings and income</b>	\$	89 384		
<b>Financial viability</b>				
Pre-tax IRR - equity	%	10.1%		
Pre-tax IRR - assets	%	1.6%		
Simple payback	yr	12.5		
Equity payback	yr	13.0		



RETScreen Energy Model - Power project

Show alternative units

Proposed case power system		Incremental initial costs	
Analysis type	<input type="radio"/> Method 1 <input checked="" type="radio"/> Method 2		
Photovoltaic			
Power capacity	kW	700.16	\$ 998 275
Manufacturer	Uni-Solar		
Model	a-Si - SSR-256W		
Capacity factor	%	25.0%	2735 unit(s)
Electricity exported to grid	MWh	1 533.4	
Electricity export rate	\$/MWh	38.00	\$/kWh 0.038

Emission Analysis				
Base case electricity system (Baseline)		GHG emission factor (excl. T&D)	T&D losses	GHG emission factor
Country - region	Fuel type	TCO2/MWh	%	TCO2/MWh
Algeria	Natural gas	0.540	15.0%	0.636
Electricity exported to grid	MWh	1 533	T&D losses	15.0%
<b>GHG emission</b>				
Base case	CO2	974.5		
Proposed case	CO2	146.2		
<b>Gross annual GHG emission reduction</b>		CO2	828.4	
GHG credits transaction fee	%	2.0%		
<b>Net annual GHG emission reduction</b>	CO2	811.8	is equivalent to	348 808 Litres of gasoline not consumed
<b>GHG reduction income</b>				
GHG reduction credit rate	\$/CO2	20.00		
GHG reduction credit duration	yr	15		
GHG reduction credit escalation rate	%	2.0%		

Financial Analysis			
<b>Financial parameters</b>			
Inflation rate	%	2.0%	
Project life	yr	25	
Debt ratio	%	70%	
Debt interest rate	%	5.31%	
Debt term	yr	15	
<b>Initial costs</b>			
Power system	\$	998 275	100.0%
Other	\$	0	0.0%
<b>Total initial costs</b>	\$	998 275	100.0%
<b>Incentives and grants</b>			
	\$	0	0.0%
<b>Annual costs and debt payments</b>			
OSM (savings) costs	\$	0	
Fuel cost - proposed case	\$	0	
Debt payments - 15 yrs	\$	68 741	
<b>Total annual costs</b>	\$	68 741	
<b>Annual savings and income</b>			
Fuel cost - base case	\$	0	
Electricity export income	\$	58 267	
GHG reduction income - 15 yrs	\$	16 236	
<b>Total annual savings and income</b>	\$	74 503	
<b>Financial viability</b>			
Pre-tax IRR - equity	%	8.6%	
Pre-tax IRR - assets	%	0.8%	
Simple payback	yr	13.4	
Equity payback	yr	15.2	

