



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Physique : Energies Renouvelables

Par :

Mr FELLAH Boumediène

Sur le thème

Aspects énergétiques, techniques et économiques de dessalement de l'eau de mer par le procédé d'osmose inverse, en utilisant un système d'énergie hybride : Photovoltaïque-Eolien

Soutenue publiquement le 28 Septembre 2019 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr N.E. CHABANE SARI	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr B.BENYOUCEF	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mme N.GHELLAI	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr B. LASRI	Professeur	Université de Saïda	Examineur
Mr G. BASSOU	Professeur	Université de Sidi Belabbes	Examineur
Mr A. CHERMITI	Professeur	Université de Tlemcen	Invité

*Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER)
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ,

La mémoire de Mon grand-père Chahid et à travers lui à tous nos martyrs, symboles de fidélité, de sincérité et de grandes sacrifices, pour que nous puissions vivre et produire aujourd'hui.

Mes chers parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que Dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

Mes cher frères et sœurs ;

Mes neveux et nièces ;

Mes enseignants depuis mon enfance ;

A ceux qui me sont chère et ceux que j'ai aimé du fond de mon cœur.

Boumediène.

« C'est quand le puits se tarit que nous nous rendons compte de la valeur de l'eau »

Benjamin Franklin.

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER) du Département de Physique de la Faculté des Sciences à l'Université Aboubekr Belkaid Tlemcen.

*Avant tout, Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans les meilleures conditions.*

*Je remercie vivement en premier lieu mon directeur de Thèse Monsieur : **B.BENYOUCEF**, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui par ses qualités scientifiques, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral a su m'informer, me conseiller, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.*

*Je remercie en 2^{ème} lieu mon ancien directeur de Thèse Monsieur : **A.CHERMITI**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour son encadrement durant trois ans, avant qu'il sorte en retraite. Je lui témoigne ma profonde reconnaissance pour ses précieux conseils, ses orientations, son infatigable dévouement. Je le remercie aussi, de m'avoir fait l'honneur en participant à ce jury de Thèse en tant qu'invité.*

*Mes sincères remerciements vont également à Monsieur **N.E. CHABANE SARI**, Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir bien voulu présider ce jury de Thèse.*

*Mes vis remerciements vont également à Madame **N.GHELLAI** Professeur à l'Université de Tlemcen, Monsieur **G. BASSOU** Professeur à l'Université de Sidi Belabbes et Monsieur **B. LASRI** Professeur à l'Université de Saïda, qui m'ont fait l'honneur de faire partie de ce jury.*

*Mes sincères remerciements, vont également au **Dr. Moussaab BELARBI**, pour son soutien moral et son aide précieuse surtout dans la phase d'élaboration et d'exécution du code source Matlab, où il a prouvé ces compétences et son savoir-faire ; sans qui je n'aurais pas pu accomplir ce travail.*

A la fin, je tiens à remercier tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Liste des figures	01
Liste des tableaux	05
Glossaire	07
Introduction générale.....	12
Chapitre I :	
Dessalement et énergie - Notions Globales.....	18
I.1. Introduction	19
I.2. Problématique de l'eau potable	19
I.3. Les Solutions envisagées	22
I.4. Définition de dessalement.....	23
I.5. Propriétés de l'eau de mer.....	23
I.6. Histoire de dessalement de l'eau de mer.....	24
I.7. L'énergie minimum de dessalement.....	25
I.8. Les principales technologies de dessalement des eaux.....	27
I.8.1. Les procédés thermiques de distillation.....	27
I.8.1.1. La distillation thermique multi-flash (MSF).....	27
I.8.1.2. La distillation à multiples effets (MED).....	28
I.8.1.3. La compression de vapeur (MVC, TVC).....	29
I.8.2. Les procédés membranaires.....	30
I.8.2.1. L'électrodialyse (ED).....	30
I.8.2.2. L'osmose inverse (RO).....	31
I.8.2.2. a. Définition du procédé Osmose Inverse.....	31
I.8.2.2. b. Description de la membrane RO.....	33
I.8.2.2. c. Pression osmotique.....	35

I.9. Comparaison énergétique des procédés de dessalement.....	39
I.10. La filière de dessalement par Osmose Inverse.....	40
I.10.1. La prise d'eau de mer.....	40
I.10.2. Les prétraitements.....	41
I.10.3. Les post-traitements.....	42
I.11. La consommation énergétiques et le coût de l'Osmose Inverse....	42
I.12. Sources d'énergies renouvelables pour le dessalement.....	43
I.13. Définition et typologie.....	44
I.13.1. Énergie solaire.....	45
I.13.2. Énergie éolienne.....	45
I.13.3. Énergie géothermique.....	46
I.14. Les énergies renouvelables dans le monde.....	46
I.15. Le développement des énergies renouvelables en Algérie.....	47
I.16. Systèmes de dessalements associés aux énergies renouvelables....	48
I.17. Les Réalisations en énergies renouvelables pour l'eau en Algérie..	49
I.18. Les énergies renouvelables dans le dessalement de l'eau de mer...	50
I.19. Conclusion.....	51
Références bibliographiques	53

Chapitre II :
Modélisation du système de dessalement à énergies
solaire photovoltaïque –éolienne.....57

II-1 Introduction	58
II.2. Couplage énergies renouvelables /osmose inverse.....	58
II.3. Description des technologies photovoltaïque-éolien/osmose	
inverse.....	60
II.4. Configuration du système de dessalement renouvelable.....	61

II.5. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien.....	62
II.5.1. Générateur photovoltaïque.....	62
II.5.1.1. Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	63
II.5.1.2. Présentation du modèle mathématique.....	64
II.5.1.3. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....	65
II.5.2. Générateur éolien.....	67
II.5.2.1. Définition.....	67
II.5.2.2. Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne..	67
II.5.2.3. Classification des systèmes éoliens.....	68
II.5.2.4. Évaluation des ressources éoliennes.....	69
II.5.2.4.a. Puissance éolienne disponible.....	69
II.5.2.4.b. Puissance éolienne récupérable (Théorème de Betz)....	70
II.5.3. Systèmes de Stockage pour la production d'électricité.....	73
II.5.3.1. Nécessité du stockage d'énergie.....	73
II.5.3.2. Types de Stockage d'énergie.....	73
II.5.3.2.1. Énergie intermédiaire : énergie électrochimique.....	73
a) Stockage sous forme d'hydrogène.....	73
b) Batteries et accumulateurs.....	74
II.5.3.2.2. Énergie intermédiaire : énergie mécanique.....	74
a) Stockage sous forme d'énergie potentielle.....	74
b) Stockage sous forme d'énergie cinétique.....	74
c) Stockage sous forme d'énergie de pression.....	74
II.5.3.3. Caractéristiques de charge et de décharge.....	74
II.5.4. Convertisseurs.....	76
II.6. Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien/osmose inverse.....	76
II.6.1. Modélisation du système photovoltaïque.....	76
II.6.2. Modélisation du système éolien.....	79

II.6.3. Modélisation du système de stockage (batterie au plomb).....	80
II.6.4. Modélisation de la pompe haute pression (HP).....	81
II.6.4.1. Principe de fonctionnement et construction.....	81
II.6.4.2. Caractéristiques fondamentales de la pompe.....	82
II.6.4.3. Caractéristique Hauteur manométrique –Débit : H(Q).....	83
II.6.4.4. Caractéristique du couple.....	84
II.7. Conclusion.....	84
Références bibliographiques	85

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude90

III-1 Introduction	91
III.2. Choix de la zone d'étude.....	91
III.3. Situation géographique.....	92
III.4. Potentiel solaire.....	92
III.5. Potentiel éolien.....	94
III.6. Données météorologiques.....	94
III.7. Description de la station de la ville de Honaine (Tlemcen).....	95
III.8. Description des étapes de traitement.....	98
III.8.1. Phase de Captation d'eau de mer et de pompage.....	98
III.8.2. Phase de filtration (prétraitement de l'eau).....	99
III.8.2.1. Prétraitement chimique.....	100
III.8.2.1.a. Dosage d'Hypochlorite de sodium.....	100
III.8.2.1.b. Dosage du chlorure ferrique.....	101
III.8.2.1.c. Dosage du métabisulfite de sodium.....	101

III.8.2.1.d. Dosage du dispersant.....	102
III.8.2.2. Prétraitement physique.....	102
III.8.2.2.a. L'ébauchage.....	102
III.8.2.2.b. La Filtration.....	103
a) Système de filtration à sable et anthracite.....	104
b) Filtre à cartouche.....	105
III.8.3. Phase d'osmose inverse.....	106
III.8.4. Phase de reminéralisation de l'eau (Post-traitement).....	107
III.9. Pompage de l'eau dessalée.....	108
III.10. Conclusion.....	108
Références bibliographiques	109

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride110

IV-1 Introduction	111
IV-2 Présentation de la station de dessalement de "Honaïne".....	112
IV-3 Présentation du système	113
IV-4 Dimensionnement du système hybride	116
IV-4-1 Données climatiques et l'énergie reçue	116
IV-4-2 Performance du système et détermination du mois le plus défavorable	118
IV-4-3 Taille des composantes renouvelables	118
IV-4-4 Scénarios traités.....	119
IV-4-5 Coefficient d'autonomie du système R	119

IV-4-6 Capacité du système de stockage	120
IV-5 Méthode de résolution.....	121
IV-5-1 Procédure	121
IV-5-2 Organigramme	121
IV-6 Résultats et discussions.....	121
IV-6-1 Scénario 1	121
IV-6-2 Scénario 2	124
IV-6-3 Comparaison entre le coût du système hybride et les énergies fossiles.....	128
IV-7 Conclusion	129
Références bibliographiques	131
<i>Conclusion générale</i>	135
<i>Annexes</i>	138
<i>Publications</i>	155

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Disponibilité en eau douce dans le monde.

Figure I.2 : Principaux procédés industriels de dessalement d'eau de mer.

Figure I.3 : Courbes Température-Pression de l'eau pure et de l'eau de mer.

Figure I.4 : La distillation multi-flash.

Figure I.5 : La distillation multiple effets.

Figure I.6 : La compression de vapeur.

Figure I.7 : Principe de l'électrodialyse.

Figure I.8 : Osmose Inverse.

Figure I.9 : Écoulement à travers la membrane.

Figure I.10 : Membrane en spirale.

Figure I.11 : Association des tubes de pression d'une manière modulaire.

Figure I.12 : La pression osmotique en fonction de la concentration.

Figure I.13 : Schéma de principe d'un module d'osmose inverse.

Figure I.14 : Schéma simplifié de la filière de dessalement par osmose inverse.

Figure I.15 : Coûts d'exploitation d'une usine de dessalement par osmose.

Figure I.16 : Répartition de la puissance électrique installée par application.

Figure I.17 : Combinaisons des sources d'énergies renouvelables.

Figure I.18 : Publications (1980-2010) sur le dessalement.

Chapitre II

Figure II.1 : Combinaisons osmose inverse/énergies renouvelables.

Figure II.2 : Schéma du système hybride photovoltaïque-éolien.

Figure II.3 : Caractéristiques $I=f(v)$ sous obscurité et sous éclaircissement.

Figure II.4 : Structure d'un système normal de conversion de l'énergie éolienne.

Figure II.5 : Veine d'air traversant la zone balayée par les pales d'une éolienne.

Figure II.6 : Évolution de F_c en fonction de a .

Figure II.7 : Caractéristique de décharge.

Figure II.8 : Caractéristique de charge.

Figure II.9 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Figure II.10 : Schéma bloc du Générateur Photovoltaïque.

Figure II.11 : Modèle de la voile.

Figure II.12 : Schéma électrique équivalent de n_b batteries en séries.

Figure II.13 : Modèle électrique de la batterie.

Figure II.14 : Les principaux constituants d'une pompe centrifuge.

Figure II.15 : Hauteur manométrique totale maximale.

Figure II.16 : Schéma électrique équivalent de n_b batteries en séries.

Figure II.17 : Schéma électrique équivalent de n_b batteries en séries.

Chapitre III

Figure III.1 : Moyenne annuelle de l'irradiation, Période 1992-2002.

Figure III.2 : Moyenne annuelle de la durée, Période 1992-2002.

Figure III.3 : Carte annuelle des vents à 10m du sol (m/s).

Figure III.4 : Station de dessalement de Honaïne (vue de haut).

Figure III.5 : Diagramme de processus dessalement de l'eau de mer-Honaïne.

Figure III.6 : Schéma des étapes de traitement à la station de Honaïne.

Figure III.7 : Le bloc des pompes de captation au niveau de la station-Honaïne.

Figure III.8 : Citerne de stockage d'hypochlorite de Sodium.

Figure III.9 : Citerne de stockage de chlorure ferrique.

Figure III.10 : Schéma de l'étape de filtration.

Figure III.11 : Filtres à sables et anthracite (Station de Dessalement-Honaïne).

Figure III.12 : Filtres à cartouches (microfiltration) au niveau de la station.

Figure III.13 : Bloc d'osmose inverse (Station de Dessalement- Honaïne).

Figure III.14 : Filtres à sables et anthracite (Station de Dessalement-Honaïne).

Figure III.15 : Filtres à sables et anthracite (Station de Dessalement-Honaïne).

Figure III.16 : Filtres à sables et anthracite (Station de Dessalement-Honaïne).

Figure III.17 : Filtres à sables et anthracite (Station de Dessalement-Honaïne).

Chapitre IV

Figure IV.1 : Station de Dessalement-Honaïne- Tlemcen.

Figure IV.2 : Schéma du système hybride photovoltaïque-éolien-batterie.

Figure IV.3 : Courbe de puissance de l'éolienne Aeolos-H 50KW.

Figure IV.4 : Conditions météorologiques pour le site étudié.

Figure IV.5 : Energie hybride reçue.

Figure IV.6 : Nombre de modules PV (Scénario 1).

Figure IV.7 : Nombre d'éoliennes (Scénario 1).

Figure IV.8 : Surface (Scénario 1).

Figure IV.9 : Coût Total (en Dollar \$) (Scénario 1).

Figure IV.10 : Coût Total (en Dinar Algérien DZD) (Scénario 1).

Figure IV.11 : Nombre de modules PV (Scénario 2).

Figure IV.12 : Nombre d'éoliennes (Scénario 2).

Figure IV.13 : Surface (Scénario 2).

Figure IV.14 : Coût Total (en Dollar \$) (Scénario 2).

Figure IV.15 : Coût Total (en Dinar Algérien DZD) (Scénario 2).

Annexes

Figure B.1 : Organigramme de l'algorithme proposé.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Répartition des diverses formes d'eau sur le globe terrestre.

Tableau I.2 : Chute des ressources en eau potable par habitant dans l'Algérie.

Tableau I.3 : Composition de l'eau de mer standard.

Tableau I.4 : Comparaison des énergies consommées par dessalement.

Tableau I.5 : Coût du mètre cube dessalé en Algérie en dollars.

Chapitre II

Tableau II.1 : Classification des systèmes éoliens.

Chapitre III

Tableau III.1 : Données géographiques de la station d'étude.

Tableau III.2 : Potentiel solaire en Algérie.

Tableau III.3 : Principales caractéristiques de fonctionnement de la station.

Tableau III.4 : Données géographiques de la station d'étude.

Tableau III.5 : Données géographiques de la station d'étude.

Tableau III.6 : Données géographiques de la station d'étude.

Tableau III.7 : Données géographiques de la station d'étude.

Tableau III.8 : Données géographiques de la station d'étude.

Tableau III.9 : Données géographiques de la station d'étude.

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Spécifications du module PV.

Tableau IV.2 : Spécifications de l'éolienne.

Tableau IV.3 : Vitesse du vent et puissance de l'éolienne.

Tableau IV.4 : Spécifications de la batterie.

Tableau IV.5 : Spécifications de l'onduleur.

Glossaire

Nomenclature :

C_f	Concentration en sels dans l'alimentation mol.Kg ⁻¹ ;
C_p	Concentration en sels dans le perméat mol.Kg ⁻¹ ;
T	Température (K) ;
R	Constante molaire des gaz (8,314 J.mol ⁻¹ K ⁻¹).
π	Pression osmotique (bar) ;
i	Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte ;
C	Concentration molaire en sels mol. L ⁻¹ ;
R_g	Constante des gaz parfaits (0,082 L. bar. mol. L ⁻¹ K ⁻¹);
T	Température absolue de la solution (K).
Q_p	Débit massique de perméat traversant la membrane Kg.s ⁻¹
L_p	Coefficient de perméabilité à l'eau de la membrane Kg.s ⁻¹ .m ⁻² .Pa ⁻¹
S	Surface de la membrane (m ²)
P	Pression de travail (Pa)
$\Delta\pi$	Différence de pression osmotique (Pa)
q_v	Débit volumique en m ³ /s ;
h_m	Différence entre pression de refoulement et la pression d'aspiration en Pa ;
η	Rendement de la pompe.
n	Nombre d'effets ;
m_e	Masse d'eau de mer admise;
m_s	Masse d'eau douce produite ;
c_p	Chaleur spécifique de l'eau de mer ;
ΔT	L'écart entre la température d'ébullition et la température de l'eau mer à l'entrée de l'enceinte ;
ΔH_{vap}	Chaleur de vaporisation moyenne de l'eau dans les différents corps.
ρ_a	Masse volumique de l'air généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne 1,25Kg/m ³ .
S	Surface de la cellule solaire (m ²);
ϕ	Flux incident (W/m ²);
I_m, V_m	Coordonnées de point de fonctionnement.
I	Courant de cellule [A] ;
V	Tension de cellule [Volt] ;
T	Température de la jonction en [°K] ;
q	Charge de l'électron (1,6 · 10 ⁻¹⁹ C) ;
I_0	Courant de saturation inverse de la diode en [A] ;
K	Constante de Boltzmann (1,38 · $\frac{10^{-23}J}{K}$) ;

v	Tension de seuil de diode (1,1V) ;
n	Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.
R_S	Résistance série de la cellule [Ω].
γ	Coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à (0.0045 / $^{\circ}\text{C}$) ;
η_r	Le rendement de référence du générateur photovoltaïque ;
T_a	Température ambiante moyenne journalière ($^{\circ}\text{C}$) ;
T_C	Température cellule moyenne journalière ($^{\circ}\text{C}$) ;
NOCT	Température nominale de fonctionnement de la cellule.
S_{PV}	La surface totale du générateur photovoltaïque (m^2) ;
R_{PV}	Le rendement du générateur photovoltaïque ;
H	L'irradiation solaire sur plan incliné (KWh/m^2) ;
P_f	Le facteur de remplissage du module, égal à 0.9.
Q_c	Débit de concentrât d'un module membranaire mer Kg.s^{-1} ;
C_c	Concentration en sels dans le concentrât mol.Kg^{-1} .
Q_f	Débit d'alimentation d'un module membranaire en eau de mer Kg.s^{-1} ;
Q_s	Débit de sels traversant la membrane Kg.s^{-1} ;
B	Coefficient de perméabilité aux sels de la membrane $\text{Kg}^2.\text{s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{mol}^{-1}$;
S	Surface de la membrane (m^2).
$\Delta\pi$	Différence de pression osmotique (Pa) ;
E_0	Tension à vide de la batterie chargée (V);
K	Constante qui dépend de la batterie ;
R_b	Résistance interne de la batterie [Ω];
I_b	Courant de décharge (> 0) ;
Q_0	Capacité de la batterie (Ah) ;
E_g	Energie de gap ;
P_4	Paramètre constant.
I_{Sat}	Courant de saturation (A) ;
K	Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$) ;
q	Charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$) ;
A	Facteur d'idéalité de la jonction.
$T_{\text{Jref}} = 25^{\circ}\text{C}$	Température de référence des modules ;
P_1, P_2, P_3	Paramètres constants.
I_G	Courant fourni par le groupe de modules (A) ;
V_G	Tension aux bornes du groupe de modules (Volts).
E_S	Ensoleillement dans le plan des modules (W / m^2) ;
T_J	Température de jonction de la cellule($^{\circ}\text{C}$).
η_m et η_g	Le rendement respectivement du multiplicateur et de la génératrice.
C_p	Le coefficient de performance de la turbine éolienne.

C_e	Facteur d'efficacité,
S	Surface traversée par le vent (m^2) ;
ρ	Densité de l'air ($\rho = 1,225Kg/m^3$) ;
V	Vitesse du vent (m/s) .
Ω_t	Vitesse de rotation avant la transmission.
A	Surface balayée par les pales ;
r	Longueur des pales.
C_{ff}	Coût total en utilisant les énergies fossiles ;
C_{kWh}	Prix d'un kWh d'électricité ;
V_{sys}	Tension nominale du système.
N_m	Nombre de jours dans mois le plus défavorable.
Δt	Durée relative en jours à l'autonomie demandée.
f	Perméabilité.
R_{PV}	Le rendement du générateur photovoltaïque.
H	L'irradiation solaire sur un plan incliné (KWh/m^2).
C_p	Le coefficient de performance de l'éolienne.
V	Vitesse du vent (m/s).
a et b	Paramètres de la pompe ;
c	Paramètre correspondant aux pertes de la pompe ;
Ω	Vitesse de rotation de l'arbre de la pompe (rd/s) ;
Q	Débit en m^3 /s .
P	Pression (Pa) ;
ρ	Masse volumique du fluide (Kg/m^3) ;
g	Accélération de la pesanteur ($9,81 m/s^2$) ;
H	Hauteur manométrique (m).

Abréviations :

PV → Photovoltaïque

DC → Courant Direct (continu)

AC → Courant Alternatif

DZD → Dinar Algérien

RO → Osmose Inverse

SDA → Société de Distribution d'électricité et de gaz d'Alger

SDC → Société de Distribution d'électricité et de gaz du Centre
SudSDO → Société de Distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest
SDE → Société de Distribution d'électricité et de gaz de l'Est
CREG → Organisme en charge de la régulation du marché énergétique.
OMS → l'organisation mondiale de santé.
TDS → Le total des solides dissous
MDT → la quantité du solide dissous.
MSF → La distillation multi-flash.
MED → La distillation à multiples effets.
MVC, TVC → La compression de vapeur.
ED → L'électrodialyse.
SDI → Indice de densité de l'envasement.
HP → haute pression.
MENA → Moyen-Orient et l'Afrique du Nord.
IRENA → Agence internationale des énergies renouvelables.
SEH → un Système d'Energie Hybride.
SER → sources d'énergies renouvelables.
DRE → Dispositifs de récupération d'énergie.
SOC → Etat de charge.
HMT → hauteur manométrique Totale.
AEC → Société algérienne d'énergie.
ADE → l'algérienne des eaux.

Liste des symboles

E_{PV} → Energie Photovoltaïque.
 E_W → Energie éolienne.
 E_d → Energie demandée par l'usine de dessalement.

S_{PV} → Surface des panneaux photovoltaïques.
 S_W → Surface balayée par le rotor de l'éolienne.
 f → Perméabilité.
 R_{PV} → Rendement du générateur photovoltaïque.
 I_{MP} → Courant à la puissance maximale.
 V_{MP} → Tension à la puissance maximale.
 H → Irradiation solaire.
 N_d → Jours déficitaires.
 N_{Tot} → Nombre de jours de fonctionnement (365 Jours).
 C_p → Coefficient de performance de l'éolienne.
 V → Vitesse du vent.
 C_{bat} → Capacité de la batterie.
 V_{sys} → Tension nominale du système.
 N_m → Nombre de jours du mois le plus défavorable.
 C_{ff} → Coût total en utilisant les énergies fossiles.
 C_{kWh} → Prix d'un kWh d'électricité.
 C_M → Coût de l'entretien du système hybride.
 C_{RE} → Coût total en utilisant les énergies renouvelables.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'eau et l'énergie sont liées entre eux d'une façon inséparable, ils constituent le secteur vital pour tout développement économique et industriel mondiale sur tous les plans. Le monde actuel s'affronte au défi majeur du XXIème siècle, qui est l'approvisionnement en eau potable et en électricité. Cet enjeu n'est pas au porté de tous les pays du monde, car la plupart d'entre eux sont des pays de tiers monde, qui ne possèdent pas les technologies suffisantes pour améliorer la qualité de vie quotidienne de leurs citoyens, dans les différents services de base tels que la santé, l'éducation, l'habitat, les transports,... et biensur l'eau. C'est donc une problématique de développement durable. Ainsi, l'eau comme l'énergie, en tant que capital à mobiliser, à évaluer, à gérer et à préserver, reste un enjeu majeur pour tous les pays du monde.

Par ailleurs, la quantité d'eau abondante sur la terre est énorme, elle représente 72 % de sa surface globale, est estimée à 1380 millions de km³. Cette formidable masse salée constitue 97,2 % d'eau de mer et 2,15 % de glace inutilisables directement. Sa salinité peut varier de 21 à 45g /l pour les eaux de mer et les océans et 0.5 à 10g/l dans les eaux saumâtres. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km³ [1]. Mais, L'eau est très inégalement répartie dans le globe.

Pour des raisons climatiques, tout d'abord : les zones arctiques, tempérées et tropicales humides se partagent des eaux qui circulent sur l'ensemble des terres émergées, tandis que les zones arides et semi-arides ne disposent que des restants, mais les écarts dans les modes et les niveaux de développement socio-économiques jouent aussi un rôle déterminant dans les disparités des ressources en eau réellement disponibles. En effet, les ressources naturelles en eau, potentiellement utilisables, varient suivant les régions de 200 à 2.000.000 litres / jour /habitant /an. On trouve dix pays se partagent 60 % des réserves mondiales 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 Ressources Institute, 250 millions de personnes, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³/ hab/ an (UN 2002). 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ / hab/ an. Et on estime que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution démographique et de l'augmentation des consommations d'eau [1].

Introduction Générale

L'Algérie, est l'un des pays qui souffre de la pénurie d'eau et se situe dans la catégorie des pays pauvres en ressources hydriques avec un climat semi-aride (de 200mm à 500mm). Les potentialités en eau sont globalement estimées à 19,4 milliards de m³/an (correspondant à environ 600 m³/ hab/ an) [2].

À chaque usage (domestique, industriel ou agricole), correspond des besoins en eau très variables en quantité et en qualité, suivant les secteurs et surtout les saisons. La demande en eau pour des usages domestiques devrait croître considérablement dans les prochaines années dans les pays en voie de développement.

Donc pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour palier au problème des ressources en eau et satisfaire les besoins de la population croissante. Parmi ces techniques prometteuses : le dessalement de l'eau de mer. Il constitue une solution fiable et durable utilisée par de nombreux pays côtiers notamment au Moyen-Orient et l'Afrique du nord.

Connu depuis l'antiquité, le dessalement de l'eau de mer est une activité en pleine expansion, du fait que, les chercheurs de nombreux pays développent des procédés de plus en plus performants, afin de produire une plus grande quantité d'eau potable à un coût plus réduit (investissement, production du m³). C'est pourquoi, dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par m³ ont connu une forte diminution. Parmi ces procédés, il y a deux grandes familles : les procédés thermiques de distillation, qui se sont fortement développés à partir de la fin des années 1940 et sont largement utilisés dans les pays où une source énergétique abondante et/ou peu chère est disponible (pétrole ou gaz) ; les procédés membranaires qui ont vu le jour à la fin des années 1960 et sont à leur apogée actuellement, principalement le procédé d'osmose inverse (OI), qui représente 53 % des capacités mondiales d'eau produites par dessalement et a ainsi dépassé les procédés de distillation depuis 2001[3].

L'osmose inverse présente l'intérêt de pouvoir fonctionner à température ambiante et de produire une eau de bonne qualité, constante quelles que soient les variations de la qualité de l'eau brute. Le taux de rejet en sels est de 99,4 à 99,8 % et les flux de perméat peuvent atteindre de 12 à 17 L.h⁻¹.m⁻² en fonction des conditions opératoires. Un inconvénient de l'OI est qu'elle nécessite des pressions opératoires très importantes (jusqu'à 60 bars pour une eau de mer de salinité 39 g.L⁻¹) [3]. En raison de la variation induite de la pression osmotique, la pression opératoire augmente avec la salinité de l'eau ce qui empêche l'utilisation de l'OI à de très fortes concentrations en sels. Cela a deux conséquences principales :

Introduction Générale

l'une économique en limitant le facteur de conversion de l'osmose inverse et donc la production d'eau et l'autre environnementale en limitant la possibilité de réduire les volumes de concentrats d'OI chargés en sels et généralement rejetés sans traitement dans la mer, ce qui provoque d'importantes perturbations sur l'équilibre du milieu et la biodiversité.

Cependant, face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources dans le dessalement et connaissant l'influence de la hausse des prix des énergies fossiles comme le pétrole sur le prix de l'eau produite, il est incontestable de conduire un effort mondial dans la recherche pour l'intégration des technologies d'énergies renouvelables, comme le solaire, l'éolienne, pour fournir une alternative d'approvisionnement en énergie fiable pour le dessalement de l'eau.

Or, le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable a connu une forte croissance ces dernières années. Il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en électricité, soit en chaleur selon les besoins. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. En plus, la possession de gisement solaire et éolien important offre aux pays concernés par cette technologie notamment l'Algérie, un avantage de contrôler et maîtriser à long terme ces ressources.

Les énergies solaires et éoliennes sont produites au gré de la variabilité du rayonnement solaire et de l'intensité du vent. Leurs caractères aléatoires nous imposent d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. Par conséquent, ces deux énergies ne peuvent pas subvenir seules aux besoins des pays. Il est donc nécessaire de conserver d'autres sources d'électricité. De ce fait, il devient plus judicieux d'envisager l'utilisation des systèmes d'énergies hybrides (photovoltaïque/éolien/batteries) dans la mesure où les gisements solaires et éoliens sont insuffisants. On peut donc envisager un couplage entre ces deux énergies et la production de l'eau potable, en les utilisant pour le dessalement de l'eau saline.

Dans les nouvelles prévisions de l'Algérie, qui valorise et favorise l'accès aux énergies renouvelables, s'inscrit notre travail qui porte sur l'alimentation en électricité de la

Introduction Générale

station de dessalement de l'eau de mer de Honaine à Tlemcen, en utilisant un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien, associé avec un système de stockage d'énergie.

Dans ce contexte, cette étude constitue une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergies renouvelables dans un système d'énergie hybride (SEH). Cela entraîne une étude des paramètres de dimensionnement de ce type d'application et leur simulation permettra de mettre en évidence les stratégies de contrôles disponibles et d'évaluer les techniques d'optimisations. Pour cette raison on présente une méthode de dimensionnement optimale de la taille du système hybride de production d'électricité.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre thèse en quatre chapitres :

- Le premier chapitre définit et expose les différents types de dessalement de l'eau de mer, en insistant sur le procédé osmose inverse. On présente les deux sources d'énergies renouvelables solaires et éoliennes ainsi que leurs principes de fonctionnement .
- Le deuxième chapitre est consacré à une étude qui décrit et justifie les différentes composantes du système hybride photovoltaïque-éolien proposée.
- Le troisième chapitre est dédié à une présentation détaillée de la zone d'étude, et une fiche descriptive sur les différentes composantes de la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine, ainsi leurs modes opératoires.
- Le quatrième chapitre présente d'une part ; les méthodes de dimensionnements, basées sur les moyennes mensuelles et le mois le plus défavorable, à partir des données météorologiques : l'irradiation solaire et la vitesse du vent du site. D'autre part, une analyse des résultats de la simulation numérique du système hybride traitée à l'aide du langage de programmation MATLAB, pour les deux méthodes citée précédemment.

Enfin, nous concluons ce modeste travail par une synthèse des travaux réalisés et des perspectives d'améliorations.

Introduction Générale

Références bibliographiques

[1]. O. CHARROUF, « Optimisation d'Un Système De Dessalement Renouvelable », Mémoire de magister en Electrotechnique Option : Energies Renouvelables, Université Mohamed Khider – Biskra, p 1, 2012.

[2]. A. KETTAB et al. 2004, « Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie par la simulation », 57è congrès annuel de l'association canadienne des ressources hydriques : Eau et changement climatique : comprendre pour mieux s'adapter, 16-18 Juin, 2004, Montréal, Canada.

[3]. J.P. MERIQ, « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire », Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p 23, 2009.

Chapitre I :

Dessalement et énergie - Notions Globales

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

I.1. Introduction

De nos jours, Sur le plan mondial, la demande en eau potable est en forte croissance. En effet, pour faire face à l'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'irrigation, de l'industrie, ainsi que dans les besoins incompressibles de la population dans les grandes agglomérations des différents pays, met en évidence la recherche dans le dessalement de l'eau comme un capitale du fait que le manque d'eau croissant dans les pays où les ressources en eau sont trop faibles par rapport à la population et à l'agriculture.

L'eau de mer représente donc une richesse quasiment inépuisable, mais elle contient 1000 fois plus de sel que la limite fixée par l'organisation mondiale de santé (OMS) pour pouvoir être consommée, c'est-à-dire une teneur maximale de 500 mg/l. Cela signifie qu'en fonction de la salinité de l'eau, une diminution de la teneur en sel de 75 à 99 % doit être réalisée, l'eau étant potable si elle contient moins de 500 ppm de sel (une ppm correspond à un rapport de 0,000001, soit, par exemple, un milligramme par kilogramme) [1].

C'est donc dans cette optique que les chercheurs de nombreux pays développent des techniques de dessalement de plus en plus performantes, afin de produire une plus grande quantité d'eau potable à un coût plus faible.

L'objectif de ce chapitre bibliographique est de donner un aperçu général sur les différentes filières classiques de dessalement, nous présentons encore plus en détail la filière de dessalement par osmose inverse qui représente actuellement la principale voie de dessalement. Nous examinerons par la suite l'association de ce procédé de dessalement avec les sources d'énergies renouvelables dans la littérature afin d'arriver à une configuration d'un système de dessalement renouvelable.

I.2. Problématique de l'eau potable

La quantité d'eau est abondante sur notre planète, et se trouve sous diverses formes. En effet, elle se transforme d'une forme à l'autre lors du cycle de l'eau. Alors que l'eau utilisée provient en majorité des lacs, cours d'eau et des nappes d'eau souterraine, la majorité de l'eau se retrouve à plus de 97 % dans les océans (Tableau I-1) qui couvrent 71 % de la surface de la Terre (61 % dans l'hémisphère nord et 81 % dans l'hémisphère sud). L'océan représente ainsi une ressource quasi-inépuisable en eau [2].

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Tableau I.1 : Répartition des diverses formes d'eau sur le globe terrestre [2].

Réservoirs	Volume (106 km ³)	%	Temps de résidence
Océans	1 350	97	2 500 ans
Glaciers (calotte glacière)	33	3,4	1000 à 10 000 ans
Eaux souterraines	8	0,6	1 500 ans
Lacs	0,1	< 0,01	17 ans
Eau dans le sol	0,07	< 0,01	1 an
Eau dans l'atmosphère	0,013	< 0,001	8 jours
Rivières	0,0017	0,0001	16 jours
Eau dans la matière vivante	0,0011	0,0001	Quelques heures
Total	1 391	100	-

Toutefois, cette eau est répartie d'une façon très inégale d'un point de vue géographique (Figure I.1). En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce dont le Brésil qui à lui seul en possède 12%, et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen- Orient sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce [3].

Le problème de la pénurie d'eau se pose par âcreté aujourd'hui et depuis quelques années, car la situation de certains pays situés dans des zones très désertiques et peuplées devient inquiétante, et suscite des tensions. Les régions touchées se trouvent souvent dans des pays en voie de développement, elles sont d'autant plus exposées que la croissance démographique importante crée des pressions supplémentaires à ces endroits sur la ressource en eau. D'autre part, l'Organisation Mondiale de Santé (OMS) a défini un minimum vital de 1000 m³ par habitant et par an soit 2,7 m³/jour, or ce seuil est loin d'être atteint. En effet, deux milliards d'individus vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an, 450 millions d'entre eux ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau et on estime que près du tiers de la population mondiale, soit environ 2,8 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 [4].

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

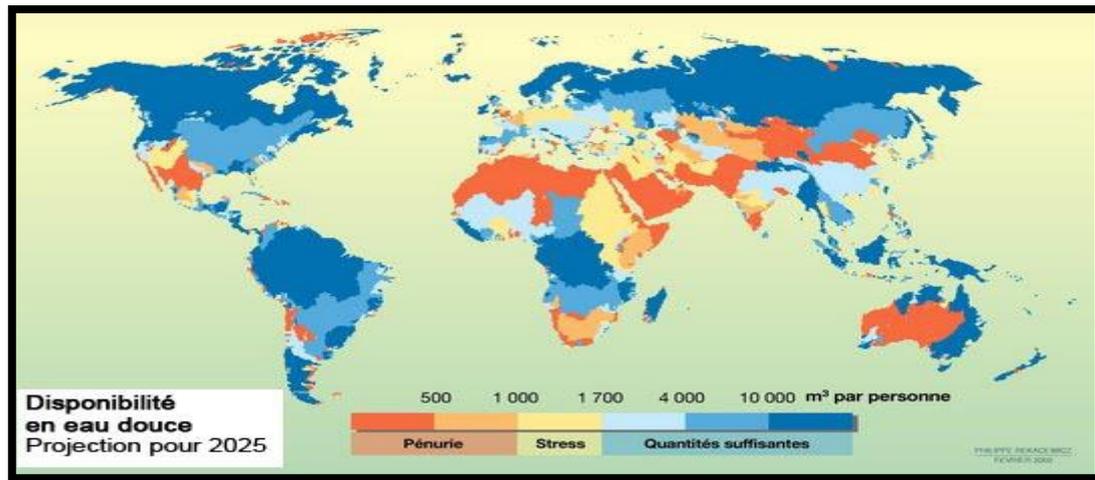


Figure I.1 : Disponibilité en eau douce dans le monde [5].

En Algérie, les potentialités globales en eau sont évaluées à 19,4 milliards de m³/an. Les ressources en eau souterraine contenues dans les nappes du Nord du pays (ressources renouvelables) sont estimées à près de 2 milliards de m³/an. Les ressources superficielles sont estimées à 12 milliards de m³/an [6].

Donc d'après ces indicateurs de ressources, L'Algérie est classée parmi les pays les plus déficitaires en eau. De part son appartenance à la zone géographique d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient et la quasi-totalité de son territoire classé en zone désertique, sa pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 89 mm. De ce fait, l'Algérie est classée parmi les treize pays africains qui souffrent le plus du manque d'eau. En effet, avec moins de 500 m³/habitant/an, le pays dispose de moins de 50% du seuil théorique de pénurie [7].

Par ailleurs, la demande en eau douce, croît chaque année de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources. Dans le tableau I.2 on remarque une diminution des potentialités en eau potable par habitant dans l'Algérie [8].

Tableau I.2 : Variation des ressources en eau potable par habitant dans l'Algérie [8].

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m ³ /habitant	1500	720	680	630	500	430

I.3. Les Solutions envisagées

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, le recours au dessalement d'eau de mer devient une solution prometteuse pour produire de l'eau potable, afin de couvrir les besoins incompressibles de la population croissante, ainsi dans les secteurs d'industrie et d'irrigation.

Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis pas mal d'années, mais leur coût élevé limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant, dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue compte tenu des progrès technologiques et économiques réalisés dans ce domaine ayant conduit notamment à la baisse importante du coût de production.

Les procédés de dessalement se répartissent en deux grandes catégories (Figure I.2), les procédés à membranes ou méthodes électriques (filtration), et les procédés à distillation ou méthodes thermiques (qui nécessitent un changement de phase, évaporation/condensation).

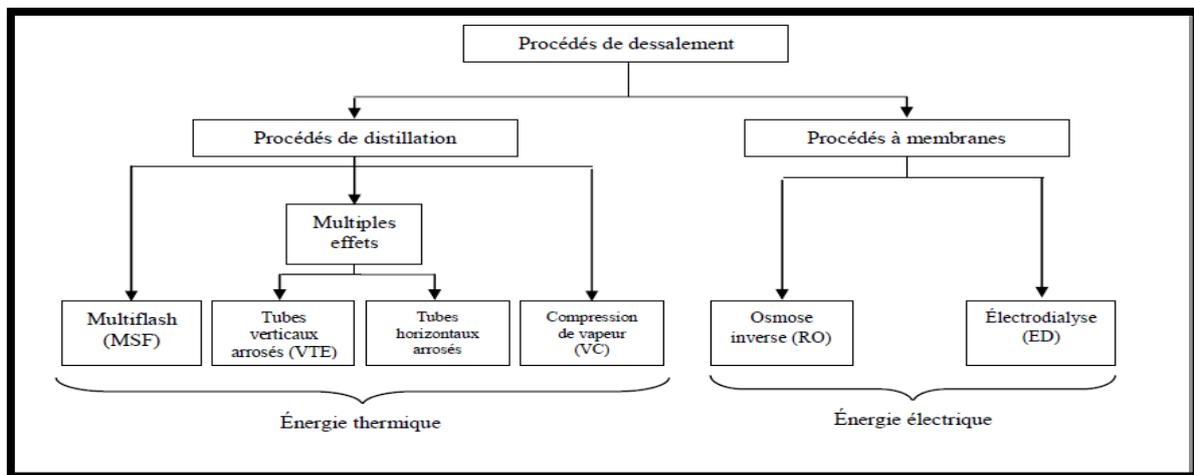


Figure I.2 : Principaux procédés industriels de dessalement d'eau de mer [9].

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 [10].

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

I.4. Définition de dessalement

Le dessalement est le processus d'élimination des solides dissous de l'eau de mer et de l'eau saumâtre pour produire de l'eau potable. La quantité de sel dans l'eau est généralement décrite par la concentration du total des solides dissous (TDS) dans l'eau. Le TDS se réfère à la somme de tous les minéraux, métaux, cations et anions dissous dans l'eau. Eau qui contient des quantités significatives de sel dissous, ce qui définit la salinité de l'eau, cette dernière est définie par la quantité de MDT (la matière dissoute totale) dans l'eau en mg / L.

I.5. Propriétés de l'eau de mer

La présence de sels dans l'eau modifie fortement certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, coefficient d'activité) tandis que d'autres sont moins influencées (viscosité, absorption de la lumière). D'autres propriétés dépendent essentiellement de la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).

La température de l'eau de mer peut varier de $-1,9^{\circ}\text{C}$ sous l'influence des courants polaires (point de congélation de l'eau de mer à une concentration de 35 g.L^{-1} de sels) jusqu'à 35°C au niveau de la péninsule arabique [11].

Les différentes propriétés de l'eau de mer dépendent de sa température, de sa salinité et de sa pression (liée à la profondeur). Elles peuvent être fortement variables d'un endroit à l'autre en raison des fortes variations de salinité, de température et de profondeur.

La composition chimique d'une eau de mer varie peu sauf dans les mers fermées. Dans le tableau I.3 sont rassemblées les caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau standard [12]. On peut constater que 85% environ poids total des sels est du chlorure de sodium.

Tableau I.3 : Composition de l'eau de mer standard [12].

Espèce	mg/L	mol/L	Masse molaire (g/mol)	Espèce	mg/L	mol/L	Masse molaire (g/mol)
Sodium	10900	0,47	23	Chlorure	19700	0,5549	35
Potassium	390	0,01	39	Sulfate	2740	0,0285	96
Magnésium	1310	0,05	24	Bromure	65	0,0008	80
Calcium	410	0,01	40	Hydrogénocarbo nate	152	0,0025	61
Strontium	13	0,000149	87	Nitrate	< 0,7	0,0000 13	62
Baryum	0,05	$3,65 \times 10^{-7}$	137	Fluorure	1,4	0,0000 737	19

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Fer	< 0,02	$3,57 \times 10^{-7}$	56	Silice	$0,04 \times 10^{-8}$	$2,86 \times 10^{-4}$	28
Manganèse	< 0,01	$1,82 \times 10^{-7}$	55	Acide borique		$1,43 \times 10^{-7}$	44
Caractéristiques							
pH	8,1			TDS (mg/L)	35000		

I.6. Histoire de dessalement de l'eau de mer

Depuis l'antiquité l'homme à chercher de produire l'eau potable à partir de l'eau de mer, en le faisant bouillir pour en extraire de l'eau non salée par condensation de la vapeur produite ce qui est le cas des marins de longue distance. En quatrième siècle avant JC, Aristote décrit une méthode pour évaporer l'eau impure, puis la condenser pour obtenir de l'eau potable.

Mais il a fallu attendre le 18^{ième} siècle pour l'apparition de procédés permettant la production tout en améliorant la pureté de l'eau ainsi que l'économie de l'énergie. Et ce n'est qu'au début du 20^{ième} siècle que sont apparus les premiers procédés industriels de distillation, de concentration des solutions et de production d'eau douce par vaporisation puis condensation.

A partir de la fin des années 1940, le dessalement de l'eau de mer s'est développé à grande échelle avec les technologies de dessalement thermique par distillation. Dans les années 1950, les premières usines industrielles de dessalement sont principalement apparues au Moyen-Orient. Puis, autour de 1959, le procédé d'osmose inverse a été mis au point à l'Université de Californie⁹ dans le prolongement de la méthode plus ancienne de séparation des sels contenus dans les mélasses et des colloïdes. Il s'agit d'un procédé membranaire : l'eau douce est extraite de l'eau salée à travers une membrane semi-poreuse, en appliquant une pression. Les premières membranes commerciales datent de 1970.

Les procédés de distillation et les procédés membranaires constituent les deux grandes familles de procédés utilisés aujourd'hui à l'échelle industrielle pour le dessalement d'eau de mer. De nos jours, il existe plus de 17000 usines de dessalement en activité pour une capacité de plus de 109 millions de m³/jour d'eau produite avec une augmentation de 12 % sur les cinq dernières années. Plus de 50 % des capacités mondiales de dessalement se trouvent au Moyen-Orient avec notamment l'Arabie Saoudite qui représente 26 % du dessalement mondial [13].

I.7. L'énergie minimum de dessalement

Le minimum d'énergie à dépenser correspond à l'énergie qui compense l'écart ébullioscopique pour la distillation et à l'énergie qui permet de vaincre la pression osmotique pour l'osmose inverse. Des calculs simples permettent d'avoir une très bonne estimation de cette énergie minimum. Dans le système international, elle s'exprime en Joules par kilogramme d'eau douce produite mais plus communément en kilowattheures par mètre cube d'eau douce (kWh/m^3) [14]. Ainsi, pour la distillation, comme l'eau salée bout à une température légèrement supérieure à l'eau pure (Figure I.3), si on considère de l'eau de mer et de l'eau pure à la même température de 25°C , il y aura moins de vapeur d'eau au-dessus de l'eau de mer qu'au-dessus de l'eau pure. En d'autres termes, la pression partielle de vapeur d'eau sera plus basse au-dessus de l'eau de mer. Pour obtenir la même pression, il faudrait que l'eau de mer soit légèrement plus chaude que l'eau pure.

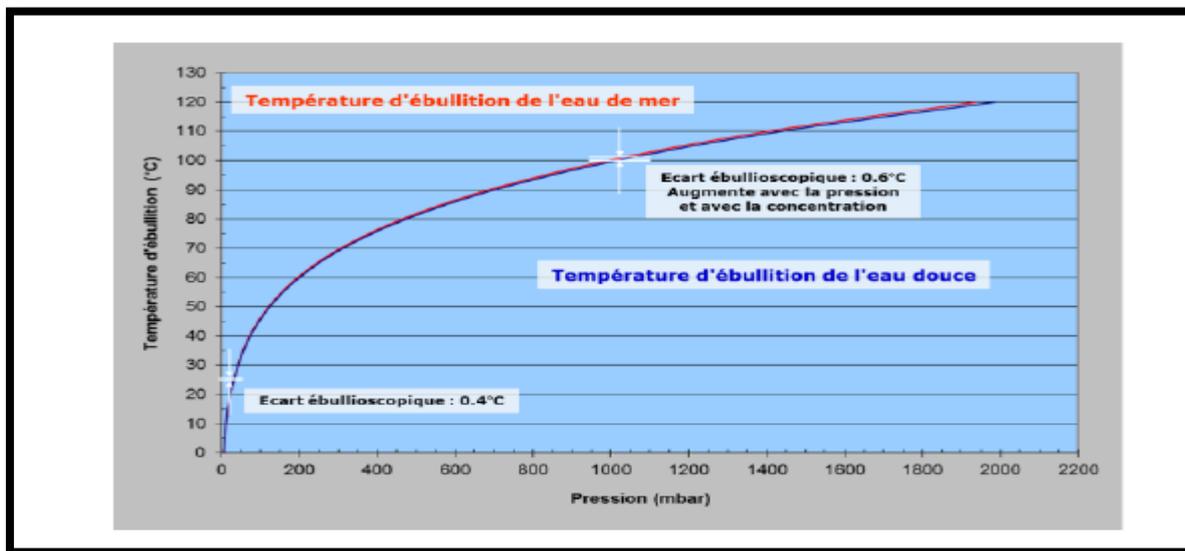


Figure I.3 : Courbes Température-Pression de l'eau pure et de l'eau de mer [14].

L'énergie minimum de dessalement sera donc le travail à fournir pour faire passer un kilogramme de vapeur (m) de la pression qui règne au-dessus de l'eau de mer à celle qui règne au-dessus de l'eau pure. Les tables thermodynamiques [15] nous indiquent ces pressions : 3170 Pa pour l'eau pure, 3105 Pa pour l'eau de mer. La loi de compression isotherme réversible nous donne le travail à fournir WD (M , R et T sont la masse molaire de l'eau, la constante des gaz parfaits et la température) :

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

$$\begin{aligned}W_D &= \frac{m}{M} R \cdot T \cdot \ln \frac{P_{\text{eau pure}}}{P_{\text{eau de mer}}} & \text{(I.1)} \\&= \frac{1}{0,018} \times 8,31 \times 298 \times \ln \frac{3170}{3105} \\&= 2850 \text{ j.Kg}^{-1} \\&= 0,79 \text{ KWh/m}^3\end{aligned}$$

Pour l'osmose inverse, l'énergie minimum à fournir W_{RO} correspond au travail pour transférer un kilogramme d'eau (m) avec un écart de pression égal à la pression osmotique (V et $\rho_{\text{eau pure}}$ sont le volume transféré et la masse volumique de l'eau) :

$$\begin{aligned}W_{RO} &= V \cdot P_{\text{osmotique eau de mer}} & \text{(I.2)} \\&= \frac{m}{\rho_{\text{eau pure}}} P_{\text{osmotique eau de mer}} \\&= \frac{1}{1000} \times 29,2 \cdot 10^5 \\&= 2920 \text{ J.Kg}^{-1} \\&= 0,81 \text{ KWh/m}^3\end{aligned}$$

Il est assez remarquable que les deux calculs correspondant à des principes physiques totalement différents conduisent finalement à des résultats aussi proches. Mais comme l'état initial - eau et sel mélangés - et l'état final - eau et sel séparés - sont identiques, le premier principe de la thermodynamique impose que l'énergie à mettre en jeu doit être la même dans les conditions de réversibilité totale, c'est-à-dire sans aucune perte. On remarquera toutefois que cette énergie minimum est très théorique car on suppose dans les calculs précédents que le taux de conversion est nul, c'est-à-dire qu'on est juste autour de l'équilibre.

I.8. Les principales technologies de dessalement des eaux

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué [16] :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

I.8.1. Les procédés thermiques de distillation

I.8.1.1. La distillation thermique multi-flash (MSF)

La distillation multi-flash (Figure I-4) plus connue sous son appellation anglo-saxonne MSF pour Multi-Stage Flash, est un procédé de distillation basé sur le principe de la vaporisation instantanée (distillation flash). L'eau de mer prétraitée pénètre dans l'installation où elle est préchauffée en traversant les condenseurs des différents étages du procédé. Elle est ensuite introduite dans une chaudière ou réchauffeur où elle est chauffée jusqu'à une température d'environ 110°C. L'eau de mer chaude est alors introduite dans le bas du premier étage où règne une pression inférieure à sa pression de vapeur saturante. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente (distillation flash).

La vapeur ainsi produite se condense sur les parois du condenseur et est recueillie. L'eau de mer restante pénètre dans la chambre suivante où règnent une température et une pression plus basses. Il se produit ainsi une nouvelle distillation flash dans cette chambre. Le phénomène se répète jusqu'à la dernière chambre. Les écarts de pressions entre les chambres permettent l'écoulement de l'eau de mer et de l'eau douce produite jusqu'à la dernière chambre sans l'utilisation de pompes [2]. Ce procédé permet d'obtenir une production supérieure à 25 000 m³.j⁻¹ avec une salinité de 50 à 100 mg.L⁻¹ pour une consommation électrique de 1 à 3 kWh.m⁻³ d'eau produite.

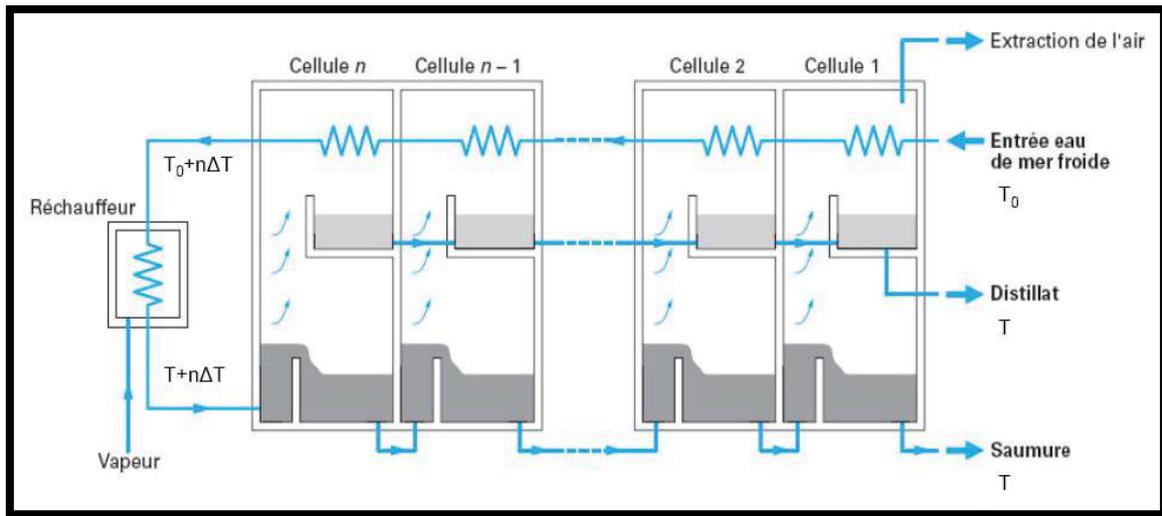


Figure I-4 : La distillation multi-flash [17].

1.8.1.2. La distillation à multiples effets (MED)

La distillation à simple effet (Multi-Effect Distillation, MED) reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de chauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Enfin, un éjecteur ou une pompe évacue les gaz incondensables. Deux groupes électropompes soutirent l'eau condensée et l'eau de mer concentrée ou saumure.

La distillation à multiples effets (Figure I-5) consiste simplement à la juxtaposition de plusieurs cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple. Le fluide caloporteur porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où une pression légèrement inférieure est maintenue. La température d'ébullition diminuant avec la pression, l'eau de mer présente dans la deuxième cellule est alors vaporisée grâce à la vapeur issue du premier effet. Il s'agit du deuxième effet. L'opération peut être répétée plusieurs fois [2]. Ce procédé permet d'obtenir une production de 10 000 à 25 000 $\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ avec une salinité de 1 à 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pour une consommation énergétique de 1 à 2 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ d'eau produite.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

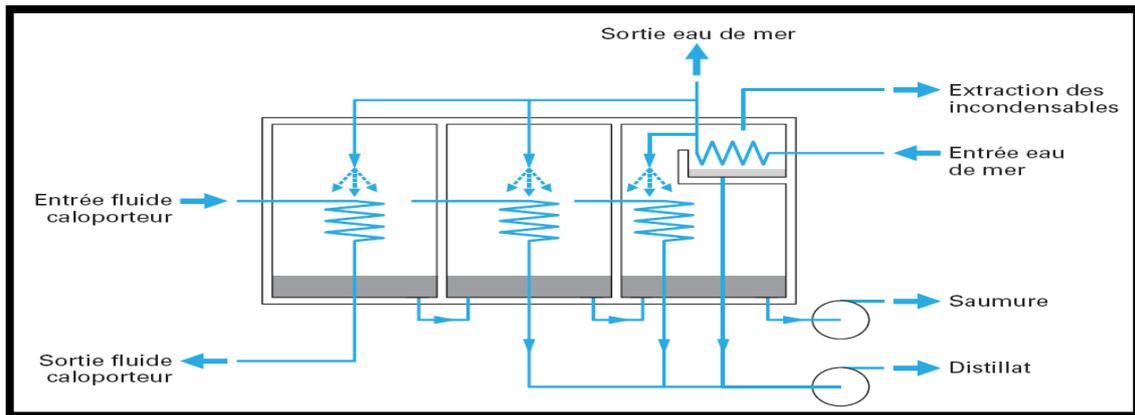


Figure I-5 : La distillation multiple effets [17].

La consommation d'énergie de la distillation à effet multiple s'exprime par :

$$Q = m_e c_p \Delta T + \frac{m_s \Delta H_{\text{vap}}}{n} \quad (\text{I.3})$$

Où :

- n : Nombre d'effets ;
- m_e : Masse d'eau de mer admise ;
- m_s : Masse d'eau douce produite ;
- c_p : Chaleur spécifique de l'eau de mer ;
- ΔT : L'écart entre la température d'ébullition et la température de l'eau mer à l'entrée de l'enceinte ;
- ΔH_{vap} : chaleur de vaporisation moyenne de l'eau dans les différents corps.

I.8.1.3. La compression de vapeur (MVC, TVC)

La compression peut être réalisée avec un compresseur mécanique (Mechanical Vapor Compression, MVC) ou avec un thermo-compresseur (Thermal Vapor Compression, TVC). Lors de la distillation par compression de vapeur (Figure I-6), l'eau de mer est portée à ébullition dans une enceinte thermiquement isolée. La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'évaporation de l'eau

salée. Ce procédé permet d'obtenir une production maximum $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{j}^{-1}$ avec une salinité de 1 à 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour une consommation énergétique de 12 à 17 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ d'eau produite [2].

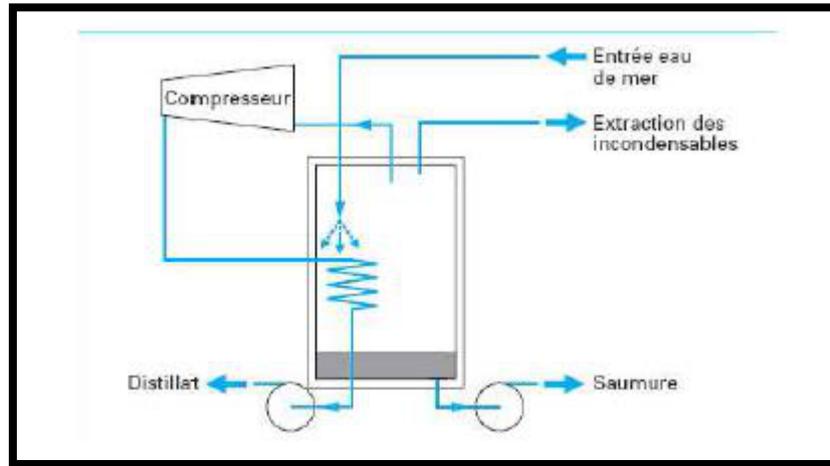


Figure I-6 :La compression de vapeur[17].

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

I.8.2. Les procédés membranaires

I.8.2.1. L'électrodialyse (ED)

L'électrodialyse (Electrodialysis, ED) est un procédé électro-membranaire permettant la concentration et la déminéralisation de solutions contenant des espèces chargées. La force motrice est un gradient de potentiel appliqué entre deux électrodes. Entre ces électrodes, sont placées alternativement des membranes échangeuses d'anions et des membranes échangeuses de cations. Le champ électrique provoque un déplacement des ions présents dans l'eau. Ces ions se concentrent dans un compartiment (concentrat) tandis que l'autre est appauvri en sel (Figure I-7). En raison de sa consommation électrique, l'électrodialyse n'est compétitive (face à l'osmose inverse) et donc utilisée que pour le traitement des eaux saumâtres de concentration inférieure à $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ [17].

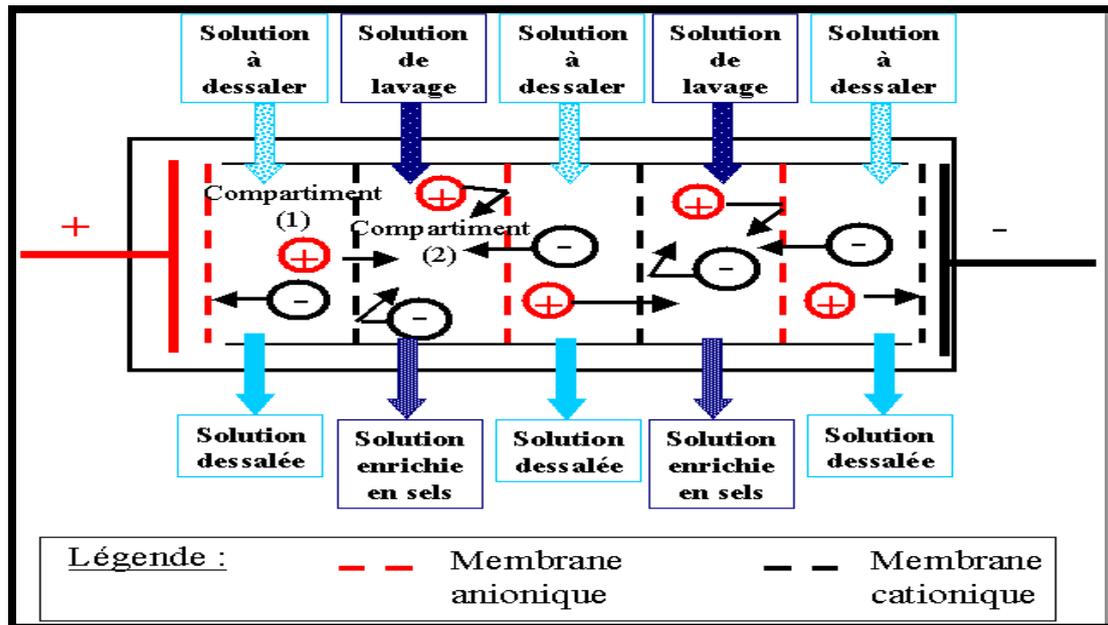


Figure I.7 : Principe de l'électrodialyse [18].

I.8.2.2. L'osmose inverse (RO)

I.8.2.2. a. Définition du procédé Osmose Inverse

L'osmose inverse (Reverse Osmosis, RO) est un procédé de purification de l'eau inspiré du phénomène chimique appelé l'osmose. Pour mettre en place le principe de l'osmose, on sépare deux solutions aqueuses de concentrations différentes par une membrane semi-perméable qui ne laisse passer que l'eau pure (Figure I.8). La solution dont la concentration est la plus basse va alors chercher à équilibrer les concentrations des deux solutions en faisant passer de l'eau pure dans le compartiment de la solution dont la concentration est la plus élevée [19].

Si on interpose une membrane gélatineuse, semi perméable, entre une solution aqueuse peu salée et une autre au contraire très salée, l'eau de faible concentration saline traverse la membrane en direction de la solution la plus concentrée en eau saline, cherchant, en diluant la solution la plus concentrée, à rendre égale les concentrations en sels des deux côtés de la membrane.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

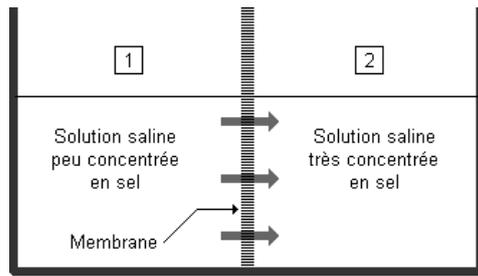


Figure. a

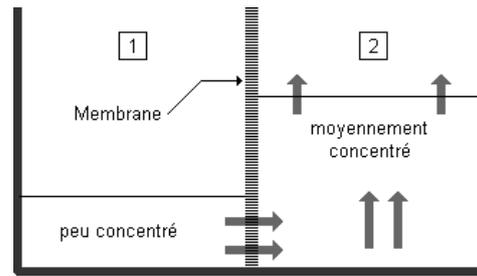


Figure. b

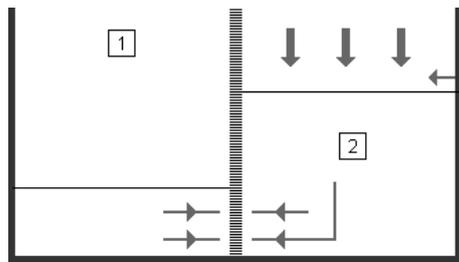


Figure. c

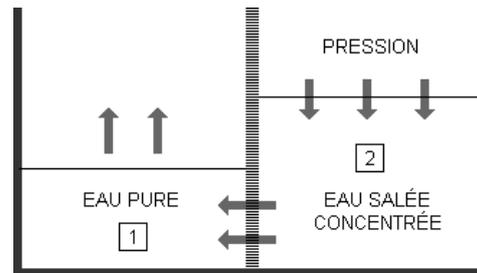


Figure. d

Figure I.8 : Osmose Inverse [19].

Dans la partie 2 de la Figure a le niveau de l'eau a tendance à monter et devenir une solution de plus en plus diluée se rapprochant du taux moyen de concentration de sel des deux solutions. (Figure b) jusqu'à atteindre un état d'équilibre appelé "équilibre osmotique" (Figure c). L'osmose inverse, comme son nom l'indique est en fait le même processus mais inversé. Le bassin 1 de la Figure d est vide au départ. En appliquant sur la partie la plus concentrée (partie 2 de la figure d) une pression mécanique, comme celle du réseau urbain, supérieure à cette pression d'équilibre osmotique (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer), on inverse le sens du courant et on provoque une production d'eau pure à partir d'eau très saline (Figure d). Le sel restera au fond du bassin 2 [19].

Donc L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide par permutation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression. L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane [20].

Une partie de la solution à traiter se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes (Figure I.9) :

- une partie passe à travers la membrane (perméat).
- une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat ou retentat) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.

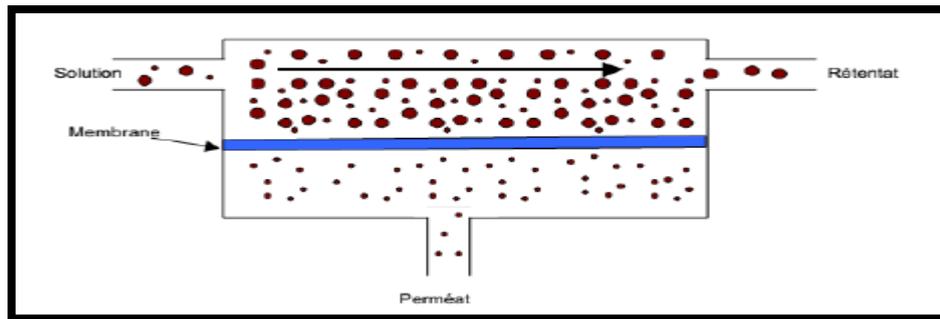


Figure I.9 : Écoulement à travers la membrane [20].

1.8.2.2. b. Description de la membrane RO

Les quatre types de modules disponibles dans le commerce OI sont tubulaires, plaque et cadre, enroulé en spirale et en fibres creuses. Les unités en spirale ont été favorisées en raison de leur utilisation généralisée, de faible coût et de disponibilité facile à partir d'un certain nombre de fabricants [10].

Un module enroulé en spirale est un sandwich de couches de la membrane et de la couche d'espacement enroulés autour d'un tube de collecte de l'eau produite (Figure I.10). Les couches sont collées sur les bords, à l'exception de l'extrémité du tube de produit, qui est relié à une ouverture sur le tube. Comme la solution d'alimentation est pompée à travers le module, à haute pression à travers l'une de ses extrémités, le solvant traverse la membrane, dont la plupart des blocs rejette du soluté. Le solvant dans la zone de la couche d'espacement, se diffuse dans le tube collecteur, par lequel il quitte le module comme perméat. La solution d'alimentation, maintenant avec une concentration élevée du soluté passe à travers la sortie (l'extrémité opposée du module) comme retentât.

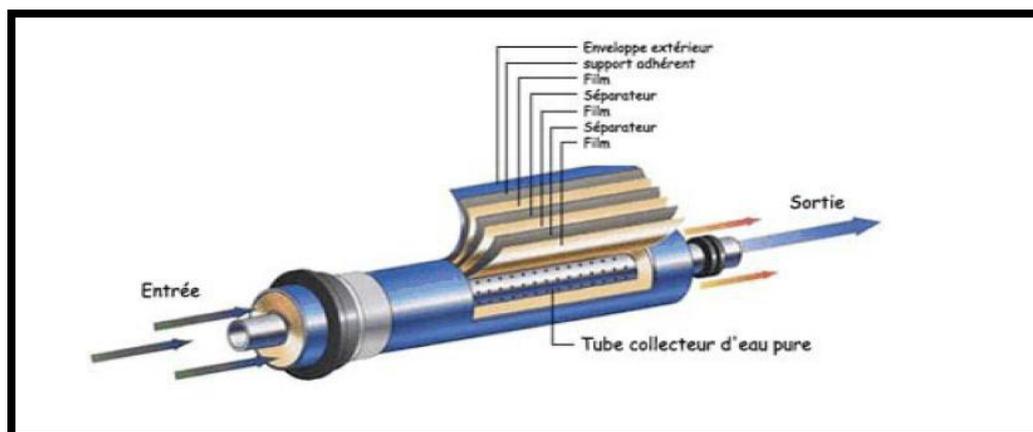


Figure I.10 : Membrane en spirale [10].

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Un module ainsi constitué développe une surface de l'ordre de 40 m² pour un diamètre de 200 millimètres (8 pouces) et une longueur de 1 mètre (40 pouces). Plusieurs modules, typiquement sept, sont ensuite assemblés dans un tube de pression [14]. Les tubes de pression sont ensuite associés en très grand nombre - plusieurs dizaines - d'une manière modulaire, chaque module s'appelant un train, ce qui permet d'atteindre des productions très importantes (Figure I.11).



Figure I.11 : Association des tubes de pression d'une manière modulaire [5].

La circulation de l'eau de mer à travers les modules d'osmose inverse est assurée par des pompes à haute pression dont la puissance est donnée par :

$$P_{\text{pompe}} = \frac{q_v h_m}{\eta} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

q_v : Débit volumique en m³/s ;

h_m : Différence entre pression de refoulement et la pression d'aspiration en Pa ;

η : Rendement de la pompe.

La pression de fonctionnement pour l'eau de mer est comprise entre 54 et 80 bars contre une pression osmotique de l'ordre de 25 bars.

La plupart des usines d'osmose inverse sont équipées par des systèmes de récupération d'énergie de pression à partir du débit de concentrât sortant à pression élevée. Cette récupération se fait au moyen d'une turbine, qui peut être couplée directement à une pompe d'alimentation des modules ou à un alternateur produisant de l'électricité [17].

La production d'eau à travers la membrane d'osmose est définie à partir de la relation :

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

$$Q_p = L_p S (P - \Delta\pi) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

- Q_p : Débit massique de perméat traversant la membrane Kg.s^{-1} ;
- L_p : Coefficient de perméabilité à l'eau de la membrane $\text{Kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{Pa}^{-1}$;
- S : Surface de la membrane (m^2) ;
- P : Pression de travail (Pa) ;
- $\Delta\pi$: Différence de pression osmotique (Pa).

I.8.2.2. c. Pression osmotique

Des relations permettent d'estimer la pression osmotique de différentes solutions. Ces variations sont comparées à des mesures expérimentales de pression osmotique afin de souligner l'écart à l'idéalité pouvant exister à des concentrations élevées.

En première approximation, la pression osmotique notée π peut être calculée en assimilant le comportement des molécules du soluté à celles de molécules gazeuses. Dans le cas d'une solution diluée, on peut appliquer la loi des gaz parfaits [20] :

$$\pi V = nRT \quad (\text{I.6})$$

La loi de Van't Hoff exprime que la pression osmotique exercée par le soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercée dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en i ions la pression osmotique sera i fois supérieure. La pression osmotique d'une solution est directement proportionnelle à la concentration en soluté (Figure I.12) :

$$\pi = i \times C \times R_g \times T \quad (\text{I.7})$$

Où :

- π : Pression osmotique (bar) ;
- i : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte ;
- C : Concentration molaire en sels mol. L^{-1} ;
- R_g : Constante des gaz parfaits ($0,082 \text{ L. bar. mol. L}^{-1}\text{K}^{-1}$) ;
- T : Température absolue de la solution (K).

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

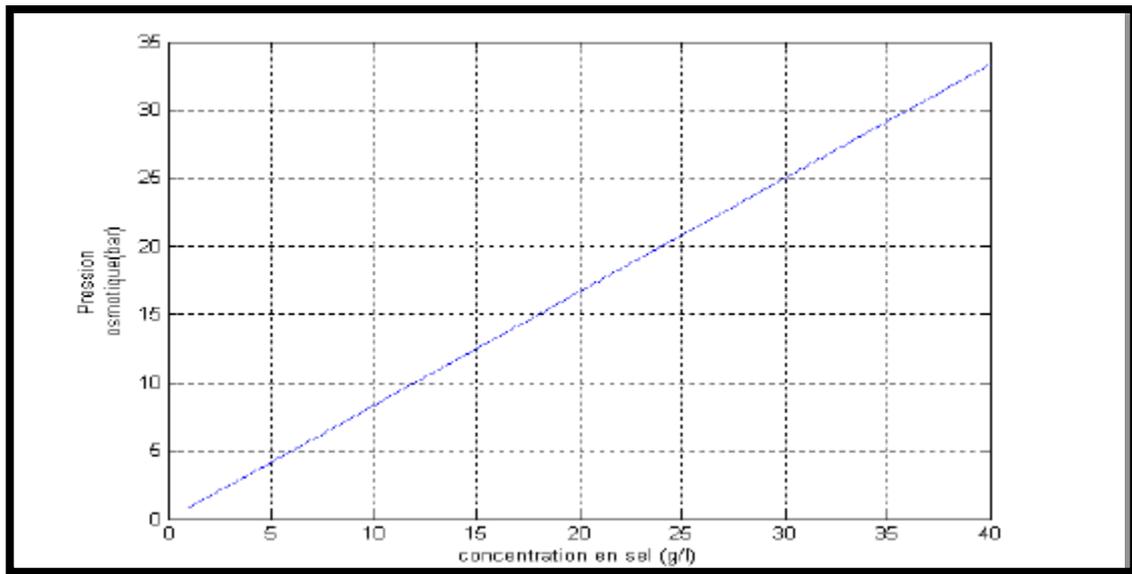


Figure I.12 : La pression osmotique d'une eau à 20°C en fonction de la concentration [10].

Dans le cas d'une solution saline, la pression osmotique peut être, en première approximation, estimée à 0,7 bar par g/L de salinité [2].

$$\pi=0,7C \quad (\text{I.8})$$

Dans le cas de solutions concentrées, la pression osmotique peut être calculée à partir des pressions partielles. Mais l'expérience montre que le domaine de validité de la loi de Van't Hoff recouvre assez bien celui du dessalement des eaux.

La différence de pression osmotique est définie dans le cas de solution thermodynamiquement idéale à partir de la relation de Van't Hoff :

$$\Delta\pi=10^3RT(C_f - C_p) \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$\Delta\pi$: Différence de pression osmotique (Pa) ;

C_f : Concentration en sels dans l'alimentation mol.Kg⁻¹ ;

C_p : Concentration en sels dans le perméat mol.Kg⁻¹ ;

T : Température (K) ;

R : Constante molaire des gaz (8,314 J.mol⁻¹K⁻¹).

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Dans le cas de l'eau de mer, $\Delta\pi$ est généralement de 2 300 à 2 600 kPa mais peut monter à 3 500 kPa ce qui implique des pressions de travail P de 6 000 à 8 000 kPa. La productivité d'une membrane d'osmose inverse dépend ainsi fortement de la concentration en sel. Augmenter la concentration en sel revient à augmenter la $\Delta\pi$ et donc la pression à appliquer pour produire un débit voulu. Pour des raisons énergétiques, techniques et économiques évidentes, les pressions applicables sont limitées et donc la concentration maximale en sels admissible sur les membranes l'est aussi. Dans le cas d'une pression appliquée de 6 000 kPa à 20°C, la concentration maximum sera de 70 g.L⁻¹. Il convient de noter que la pression de travail doit être généralement plus de deux fois supérieure à la différence de pression osmotique ce qui donne alors une concentration maximum de seulement 35 g.L⁻¹[11].

Le transfert des sels à travers la membrane est défini par la loi de Henry :

$$Q_s = BS (C_f - C_p) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

Q_s : Débit de sels traversant la membrane Kg.s⁻¹ ;

B : Coefficient de perméabilité aux sels de la membrane Kg².s⁻¹ m⁻²mol⁻¹ ;

S : Surface de la membrane (m²).

La mise en œuvre de l'OI se fait grâce à un module, la plupart du temps sous forme de membrane spiralée, dans lequel la filtration est tangentielle. Le schéma de principe du module est donné sur la Figure I.13.

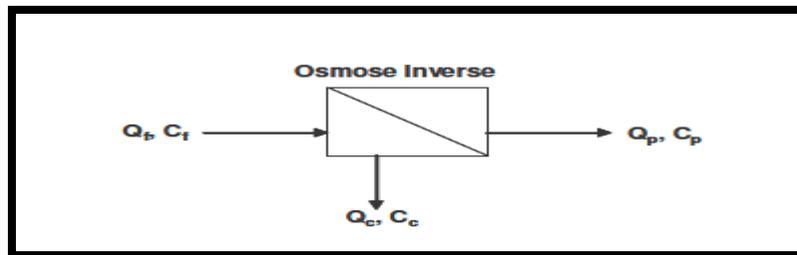


Figure I.13 : Schéma de principe d'un module d'osmose inverse [11].

Plusieurs paramètres définissent les performances de l'OI. Le taux de conversion R_w est le rapport entre le débit de perméat et le débit d'alimentation :

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

$$R_w = 100 \frac{Q_p}{Q_f} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

Q_f : Débit d'alimentation d'un module membranaire en eau de mer Kg.s^{-1} .

Il est généralement de 35 à 45 % suivant la composition de l'eau de mer, sa salinité, les prétraitements utilisés etc. La production d'eau est de 12 à 17 $\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ à des pressions de 6 000 à 8 000 kPa. Ces flux sont légèrement inférieurs à ceux obtenus par les procédés de dessalement par distillation.

Le taux de rejet en sels R_s est le rapport entre les sels présents dans le perméat et dans l'alimentation du module considéré :

$$R_s = 100 \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \quad (\text{I.12})$$

Pour le NaCl, il est généralement de 99,4 à 99,8 %. En raison du passage d'une partie des sels à travers la membrane, la salinité du perméat d'osmose inverse n'est pas nulle. Les valeurs admises sont d'environ 500 mg.L^{-1}

Le dernier paramètre défini est le facteur de concentration CF :

$$CF = \left(\frac{1}{1-R_w}\right) [1 - R_w (1-R_s)] \quad (\text{I.13})$$

En raison de la limite due à la pression osmotique précédemment évoquée, l'osmose inverse est limitée dans son facteur de concentration (2 à 3 maximum).

Le débit (Equation I-14) et la concentration (Equation I-15) des concentrats rejetés se déduit de l'équation I-11 :

$$Q_c = (1 - R_w) Q_f \quad (\text{I.14})$$

$$C_c = C_f \left(\frac{1}{1-R_w}\right) - C_p \left(\frac{R_w}{1-R_w}\right) \quad (\text{I.15})$$

Avec :

Q_c : Débit de concentrat d'un module membranaire mer Kg.s^{-1} ;

C_c : Concentration en sels dans le concentrat mol.Kg^{-1} .

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Une des principales limitations de l'osmose inverse est le phénomène de polarisation de concentration [22]. Le rejet des sels par la membrane conduit à une accumulation de ces sels au niveau de la membrane. La concentration en sels au niveau de la membrane augmente alors fortement par rapport à la concentration dans l'alimentation. Ce phénomène entraîne de nombreux effets négatifs sur le procédé :

- Une diminution du taux de rejet due à l'augmentation du passage des sels pour de fortes concentrations (voir Equation I-3).
- Une précipitation possible des sels en surface de membrane.
- Une réduction du flux de perméat due à l'augmentation de la pression osmotique pour de fortes concentrations (voir Equation I-2).
- Une accumulation de matières en surface de membrane pouvant conduire à la formation d'un dépôt.

I.9. Comparaison énergétique des procédés de dessalement

Plusieurs facteurs sont à considérer dans le calcul du coût énergétique des différents procédés de dessalement, comme le type d'énergie utilisée, la cogénération, et la capacité de l'usine, etc... Le tableau I.4 montre à titre indicatif l'ordre de grandeur de la consommation énergétique des différents procédés de dessalement de l'eau de mer.

Il ressort de ce tableau que les procédés thermiques consomment plus d'énergie que le procédé d'osmose inverse [23]. En pratique, ils sont surtout utilisés dans le cadre d'une cogénération (utilisation de la vapeur basse pression des centrales électrique).

Tableau I.4 : Comparaison des énergies consommées par les différents procédés de dessalement [23].

Procédé	Consommation d'énergie (KWh/m ³)
Distillation à détente étagées (multi stage flash)	18
Distillation à multiple effet	15
Osiose inverse	5

I.10. La filière de dessalement par Osmose Inverse

La Figure I.14 présente un schéma simplifié de la filière de dessalement par osmose inverse depuis l'eau de mer jusqu'à l'eau potable. Les différents éléments de la filière sont :

- La prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- Les prétraitements avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- L'osmose inverse ;
- Les post-traitements avec une éventuelle reminéralisations de l'eau produite.

A 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 [11].

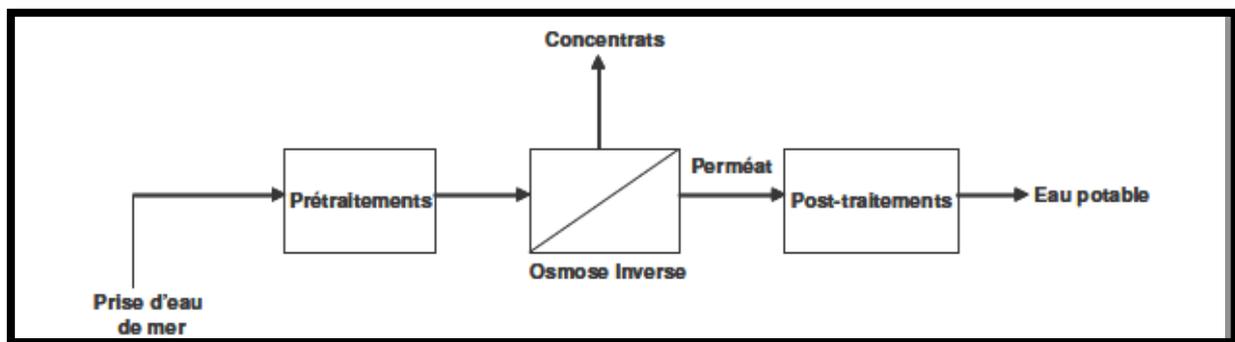


Figure I.14 : Schéma simplifié de la filière de dessalement par osmose inverse [11].

I.10.1. La prise d'eau de mer

La prise d'eau de mer est la première étape de la filière de dessalement. Elle doit permettre d'obtenir une eau en entrée de filière de la meilleure qualité possible et surtout minimiser les matières en suspension présentes. Il existe deux technologies : les forages côtiers et les prises d'eau de surface. Les forages côtiers permettent d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stable. Le prélèvement s'effectue à travers le sol qui sert de filtre naturel. Cependant, cette technique est limitée en débit suivant la nature du terrain et elle est ainsi utilisée pour des usines de dessalement de capacité inférieure à 40 000 m³/jour

L'inconvénient de cette méthode est le colmatage éventuel au cours du temps du filtre. Les prises d'eau en pleine mer (ou open intake) sont effectuées en zones profondes, éloignées de la côte et protégées des pollutions par rejets et des forts courants. Cette technique permet d'obtenir des débits supérieurs à 100 000 m³/jour mais des variations de la qualité de l'eau

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

peuvent avoir lieu avec la présence de particules, colloïdes, polluants hydrocarbures ou d'organismes biologiques [11].

I.10.2. Les prétraitements

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

Le pouvoir colmatant de l'eau de mer est caractérisé par le Silt Density Index (SDI) :

$$SDI=100\left(\frac{1-\frac{t_1}{t_2}}{t}\right) \quad (\text{I.13})$$

Où :

t_1 et t_2 sont les temps de filtration de 500 ml d'eau de mer sur une membrane de 0,45 microns à 207 kPa respectivement au temps 0 et après t minutes de filtration (généralement $t = 15$ minutes).

Le SDI doit être inférieur à 5 pour l'OI. L'utilisation du SDI est largement répandue dans le dessalement. Cependant, cet indice présente plusieurs limitations : il n'utilise pas une membrane d'osmose mais une membrane de microfiltration, la pression utilisée pour ce test est très inférieure aux pressions appliquées en OI et les essais sont effectués en mode frontal et non tangentiel comme en OI.

Afin de prévenir le colmatage des membranes d'OI, plusieurs techniques de prétraitement existent : les prétraitements conventionnels et les prétraitements membranaires.

Le premier type de prétraitement est l'ajout d'acide (généralement acide sulfurique ou acide chlorhydrique lorsqu'il y a risque de précipitation des sulfates) afin de diminuer le pH à 5-7 et ainsi augmenter la solubilité des carbonates de calcium et empêcher leur précipitation qui cause l'entartrage. Le deuxième prétraitement est la floculation en ligne qui permet d'agglomérer les particules entre elles pour former des flocons en neutralisant les charges

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

négatives des particules. Ce traitement est effectué par ajout de 5 à 30 mg.L⁻¹ de sels ferriques ou aluminiques comme le chlorure de fer ou le sulfate d'aluminium (moins utilisé car l'aluminium peut attaquer les membranes) ; ou par ajout de 0,2 à 1,0 mg.L⁻¹ de polymères organiques à faible poids moléculaire comme le chlorure de diméthylamonium ou les polyamines. Une filtration gravitaire ou une filtration sous pression a ensuite lieu à travers un filtre particulaire (sable anthracite, gravier...).

Dans le cas de fort colmatage organique possible, la floculation et la filtration sur sable peuvent être remplacées par une coagulation et une décantation. Enfin, l'eau de mer est traitée par des filtres de 1 à 10 microns afin d'éliminer les dernières particules. Une désinfection par ozone ou chloration peut aussi avoir lieu. Dans le cas du chlore, celui-ci devra être éliminé ensuite par ajout de charbon actif ou de bisulfite de sodium afin de ne pas dégrader la membrane d'osmose sensible au chlore.

Récemment, des prétraitements faisant appel aux procédés membranaires tels que la microfiltration et ultrafiltration sont apparues et ont été mis en place sur des filières de production industrielle. La nanofiltration est également étudiée. L'ultrafiltration est le procédé le plus étudié car il permet une meilleure rétention de la matière organique que la microfiltration et des flux plus importants que la nanofiltration [24, 25]. Cependant, les procédés membranaires peuvent ne faire que déplacer le problème du colmatage qui ne se retrouve plus sur la membrane d'osmose mais désormais sur la membrane de prétraitement. De nouvelles pistes de prétraitements hybrides sont ainsi en cours d'étude dans l'objectif d'améliorer la rétention des matières organiques avant osmose inverse et de limiter le colmatage des membranes d'ultrafiltration [13]. Il s'agit de filtrations membranaires combinées à la coagulation ou à une adsorption par charbon actif.

I.10.3. Les post-traitements

Les post-traitements consistent principalement à reminéraliser l'eau en la diluant avec une autre source d'eau potable afin d'ajuster sa salinité à des salinités acceptables pour la consommation. Sa dureté et son alcalinité sont également augmentées. Un traitement complémentaire pour éliminer le bore et une chloration peuvent également avoir lieu [11].

I.11. La consommation énergétiques et le coût de l'Osmose Inverse

Comme pour toute technologie, le coût énergétique et économique du procédé doit être réduit au maximum. Il est aujourd'hui inférieur à 1 \$.m⁻³ d'eau produite. Le principal coût est

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

celui de la pompe qui doit appliquer la pression de travail et représente une consommation électrique de 7 à 10 kWh.m⁻³ d'eau produite sans récupération d'énergie [11]. Il est plus important pour le traitement des eaux de mer que pour celui des eaux saumâtres moins concentrées. Le coût énergétique et économique augmente également avec la concentration en sels. Outre les systèmes de récupération d'énergie (baisse de la demande énergétique à 5 à 7 kWh.m⁻³), il est intéressant d'envisager le couplage de l'OI avec des sources d'énergie renouvelable comme le solaire, l'éolien ou la géothermie.

L'énergie requise par l'OI est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression (HP). Quoi qu'il en soit, le coût de cette énergie représente environ 40% du coût total de production de chaque mètre cube d'eau dessalée (Figure I.15) [26]. En effet, c'est dans cette direction que les recherches et les développements ont toujours été orientés, et continuent à l'être, pour obtenir les gains ayant les répercussions les plus importantes sur le coût de la production d'eau douce à partir de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre.

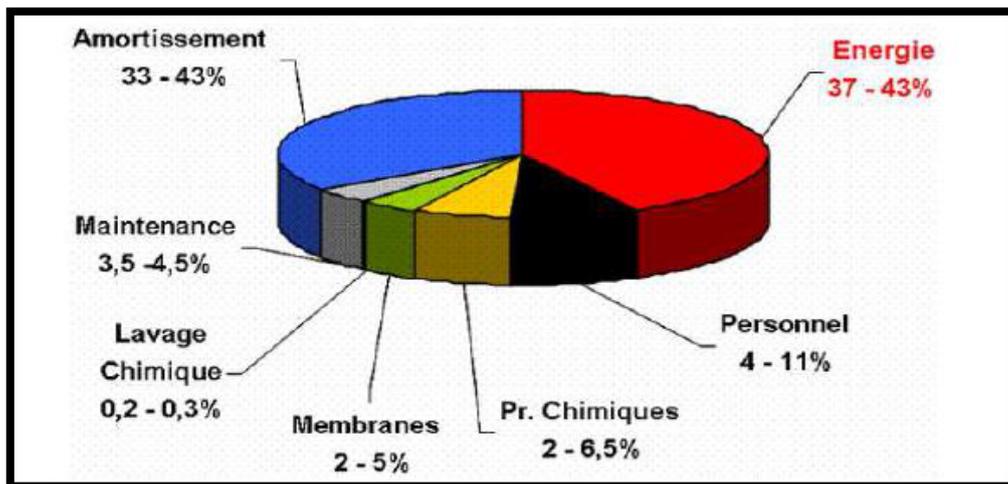


Figure I.15 : Structure moyenne des coûts d'exploitation d'une usine de dessalement par osmose inverse [26].

I.12. Sources d'énergies renouvelables pour le dessalement

Le dessalement est un processus intensif en énergie et les besoins en énergie sont énormes puisque les usines de dessalement sont des usines à fort tonnage. À l'heure actuelle, ces besoins énergétiques sont satisfaits avec des combustibles fossiles très coûteux qui continuent à augmenter dans le prix et contribuent grandement au réchauffement climatique.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Il est donc essentiel à l'avenir de rechercher des sources d'énergie alternatives pour répondre à la demande croissante de dessalement. Le développement d'une méthode de dessalement durable nécessite la minimisation de la consommation d'énergie, mais aussi l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Cela pourrait permettre aux pays moins développés d'avoir accès à des quantités suffisantes d'eau fraîche (dessalée). Différentes options peuvent être suggérées.

Les sources d'énergie renouvelables les plus courantes sont l'énergie solaire et l'énergie éolienne [27]. À l'heure actuelle, les utilisations des sources d'énergie renouvelables pour le dessalement sont très limitées. La part mondiale des sources d'énergie renouvelables totales utilisées pour le dessalement ne représente qu'environ 0,02% de l'énergie totale utilisée [28]. Une grande partie de la région (MENA) dont l'Algérie, est confrontée à une grave pénurie d'eau et, dans certains pays, a de graves problèmes de gestion de l'eau. L'énergie renouvelable est le choix le plus évident, en particulier l'énergie solaire dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) qui est caractérisée par des environnements arides et semi-arides [29]. Cependant, cette technologie doit être développée pour réduire sa limitation, car elle est actuellement au moins quatre fois plus chère que le carburant fossile.

I.13. Définition et typologie

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas à la source. L'énergie étant une grandeur physique, on parlera en théorie de sources d'énergies renouvelables ou d'énergie d'origine renouvelable. Elles présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée. Leur exploitation est un moyen de réponse aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement [30]. Les principales formes d'énergie renouvelables sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie issue de la biomasse, l'énergie géothermique,...

Les énergies renouvelables sont celles qui nous parviennent directement ou indirectement du Soleil. Il est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la photosynthèse, ou lors du cycle de l'eau (qui permet l'hydroélectricité), le vent (énergie éolienne), l'énergie des vagues (énergie holomotrice) et des courants sous-marins (énergie hydrolienne), la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans (énergie thermique des mers) ou encore la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salées de la mer (énergie

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

osmotique). La chaleur interne de la terre (géothermie) est assimilée à une forme d'énergie renouvelable, et le système terre-lune engendre des mouvements d'eau à la surface des mers et océans qui permettent la génération d'énergie marémotrice.

I.13.1. Énergie solaire

De nombreuses zones côtières et intérieures du monde ont beaucoup de soleil et manquent d'eau douce. La réponse logique au problème est le dessalement solaire en utilisant l'eau de mer ou l'eau saumâtre disponible. L'énergie solaire peut être utilisée comme une combinaison améliorée de distillation solaire et de MED [31-32]. Parmi les différents systèmes, les bassins solaires à gradient de sel et le creux parabolique sont les plus courants. Les utilisations possibles doivent être trouvées dans le préchauffage de la génération d'eau de mer et de ruisseau. À ce jour, l'énergie solaire pour MED n'est toujours pas en mesure de concurrencer l'énergie fossile aux prix actuels du marché du pétrole brut, sauf pour zones ensoleillées (ensoleillées) où l'énergie solaire peut être une alternative intéressante [27]. Actuellement, la technologie de l'énergie solaire la plus prometteuse est celle des panneaux photovoltaïques (PV).

Les réseaux photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en électricité grâce au transfert d'électrons. Des centaines de petites centrales photovoltaïques ont été développées. Les systèmes d'osmose inverse raccordés aux centrales photovoltaïques sont déjà commercialisés et considérés comme la combinaison d'énergie solaire la plus prometteuse avec le dessalement. De nombreux exemples de systèmes de traitement par osmose inverse (PV-OI) photovoltaïques peuvent être trouvés dans la littérature [33-37]; L'adaptation réussie de ces systèmes à des endroits éloignés, où les installations de maintenance ne sont généralement pas disponibles, est en grande partie une question de conception robuste du système et d'intégration socio-économique. Le couplage avec des systèmes photovoltaïques peut également être réalisable avec l'électrodialyse.

I.13.2. Énergie éolienne

L'énergie éolienne fait tourner les moulins à vent créant de l'énergie mécanique qui peut être convertie en énergie électrique. Pour une meilleure efficacité, la vitesse moyenne du vent devrait être supérieure à 5m / s. Ainsi, le dessalement éolien est une option réalisable pour les îles venteuses, comme les îles Canaries où l'énergie éolienne est utilisée partiellement

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

pour la production d'électricité et en partie pour le dessalement de l'eau de mer [38]. L'électrodialyse et les systèmes MVC sont bien adaptés à l'utilisation de l'énergie éolienne. L'utilisation de cette énergie pour alimenter les systèmes OI n'est pas faisable car Les systèmes OI doivent être exploités en continu. Les coûts d'exploitation d'un système éolien sont minimales, mais un investissement important doit être fait [28].

I.13.3. Énergie géothermique

Les ressources d'énergie géothermique existent sous trois formes : thermique, hydraulique et gaz méthane. La géothermie peut être harnachée et appliquée pour produire de l'électricité qui est envoyée aux réseaux locaux ou pour alimenter directement des usines de dessalement thermique.

I.14. Les énergies renouvelables dans le monde

Selon les chiffres rendus publics par l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), la production mondiale d'électricité renouvelable a atteint 1.700 GW en 2013 représentant 30% de la production globale installée. Les technologies des énergies renouvelables ont gagné en fiabilité et en efficacité et peuvent aujourd'hui générer de l'électricité même dans les conditions sous-optimales comme par exemple en cas de faible vitesse de vent ou de faible ensoleillement. Les prix de l'énergie solaire photovoltaïque ont chuté de 80% depuis 2008, ainsi Le solaire photovoltaïque rivalise de plus en plus avec les autres ressources sans recourir à des subventions de l'état. D'autre part, Le coût de l'électricité éolienne terrestre a lui aussi baissé de 18% depuis 2009. Avec une chute des coûts des turbines de près de 30% depuis 2008, cette énergie est devenue la source d'électricité nouvelle la moins chère sur un éventail de marchés large et qui ne cesse de s'étendre. Ainsi, le développement des énergies renouvelables va considérablement participer aux efforts de limitation du réchauffement climatique à moins de 2° (seuil critique cité par les experts) [5].

I.15. Le développement des énergies renouvelables en Algérie

En conformité avec ses engagements internationaux, l'Algérie a intégré la dimension de durabilité dans sa politique nationale de développement à travers les instruments de planification, et ce, dans un souci de maintenir l'équilibre entre les impératifs de son développement socio-économique et l'utilisation rationnelle de ses ressources naturelles (notamment l'eau et l'énergie) [38].

En effet, En Algérie, la part des SER dans le bilan énergétique national est encore très faible. Cependant, notre pays dispose actuellement de tous les atouts nécessaires pour le développement des énergies renouvelables. La stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie vise à porter la part des énergies renouvelables, à l'horizon 2025, à environ 5% de la production nationale d'électricité (Figure I.16).

Pour atteindre cet objectif, plusieurs projets sont à développer et à réaliser dans ce domaine. Comme : les chauffe-eau solaires, le pompage à l'aide de l'énergie solaire ou éolienne, une vingtaine de villages solaires (Tamanrasset, Illizi, Tindouf et Adrar),... Près de 2000 kits solaires photovoltaïques pour l'éclairage et 200 pompes fonctionnant avec l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau potable et d'irrigation ont pu être installés à ce jour dans les zones les plus reculées du pays [38](Illizi, Tamanrasset, Adrar).et les fermes éoliennes dans le sud du pays dont la première est celle d'une puissance de 10 MW qui est réalisée à Adrar et mise en service récemment.

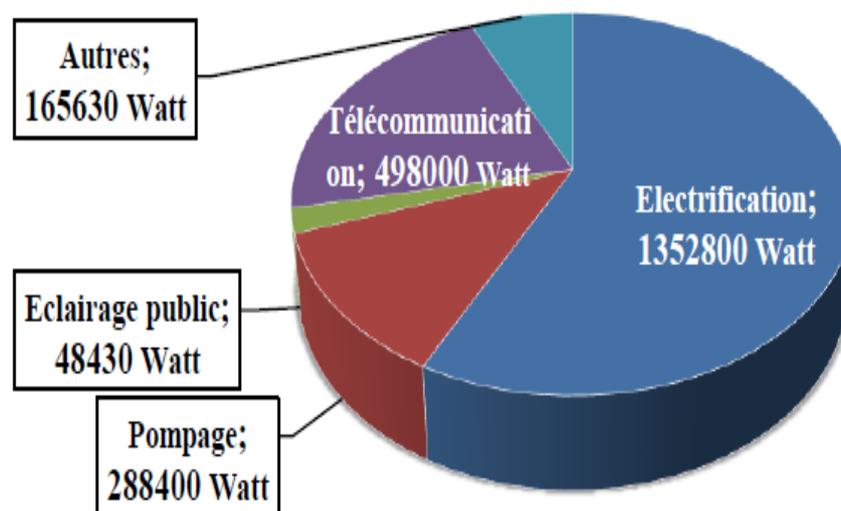


Figure I.16 : Répartition de la puissance électrique installée par application [38].

I.16. Systèmes de dessalements associés aux énergies renouvelables

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables, tels que le soleil (thermique et photovoltaïque) et le vent, dans les systèmes de dessalement autonomes ont été largement discutés [10,39-40].

En outre, les sources marémotrice et géothermique ont également été considérées [41] de même que les piles à combustibles et la bioénergie [10]. Le dessalement est considéré comme une application particulièrement prometteuse qui implique de vastes champs d'étude. Cela a conduit à proposer un bon nombre de solutions dans ces applications. Même si l'on se concentre sur une source d'énergie renouvelable et une méthode particulière de dessalement, il y a peut-être encore beaucoup d'options disponibles en fonction de la configuration du système final. La Figure I.17 illustre les combinaisons techniquement possibles des sources d'énergies renouvelables et des techniques de dessalement les plus employées.

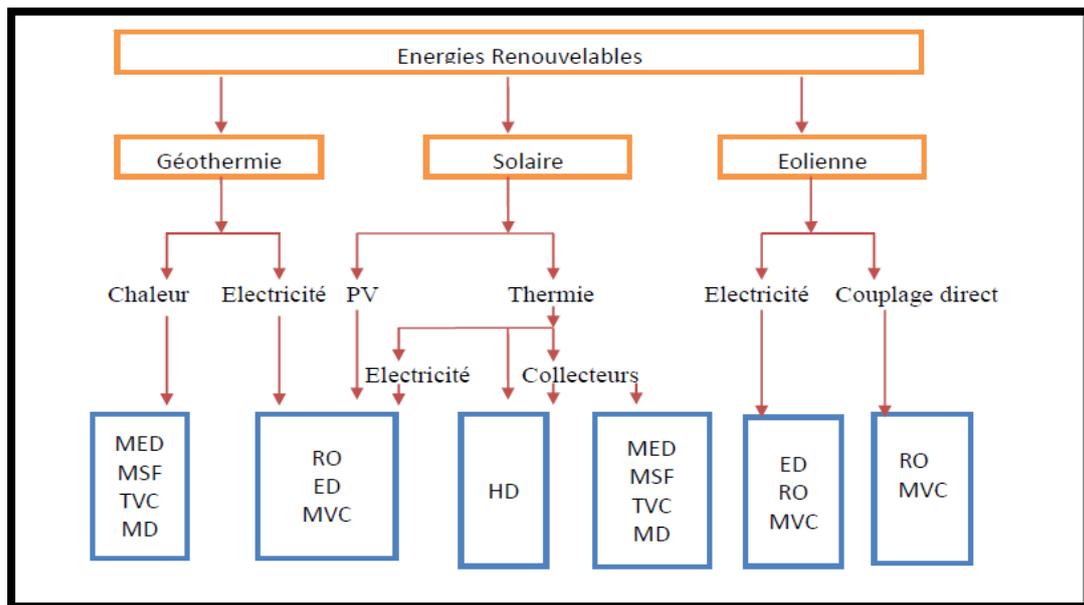


Figure I.17 : Représentation de quelques combinaisons possibles des sources d'énergies renouvelables et les procédés de dessalement [10].

L'énergie solaire et l'énergie éolienne sont les sources d'énergies renouvelables qui connaissent un grand essor dans cette association avec les procédés de dessalement. Les choix s'orientent vers l'utilisation des procédés de distillation avec la thermie et les méthodes membranaires avec les systèmes de conversion électromécanique. Toutefois les membranes

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

d'osmose inverse sont les plus favorisées dans les systèmes de dessalement renouvelables suivi des procédés MED et MSF [42].

La Figure I.18 illustre la tendance des recherches dans les publications durant les trente dernières années concernant les énergies renouvelables utilisées avec les procédés de dessalement [10].

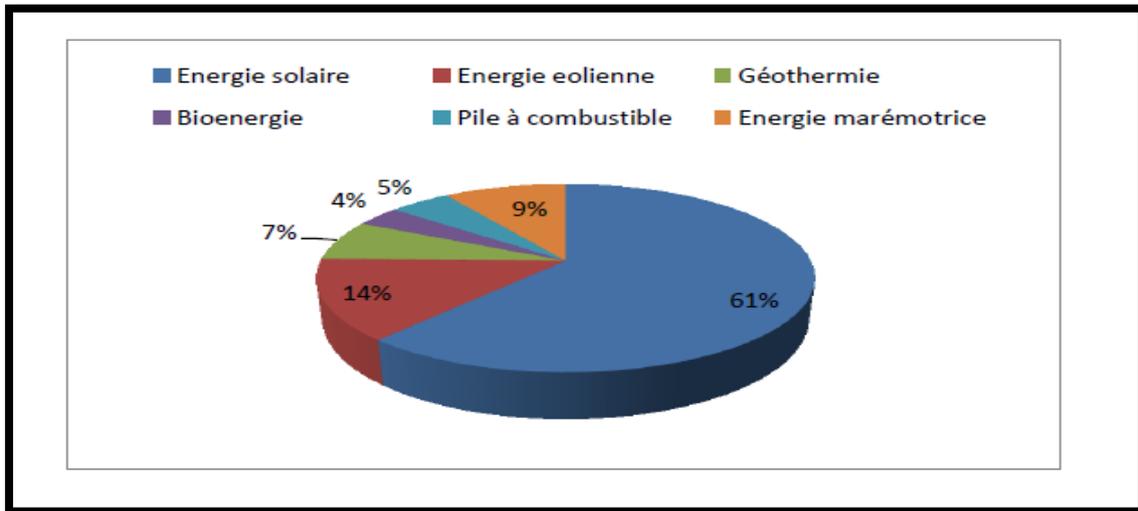


Figure I.18 : Publications (1980-2010) sur le dessalement par les énergies Renouvelables [38].

Toutefois, il est nécessaire de souligner qu'il y a quelques facteurs qui limitent l'intégration de toutes les sources des énergies renouvelables dans les applications du dessalement. Le premier est l'imprévisibilité de la source renouvelable qui ne peut pas satisfaire la demande en eau douce à tout moment. Le second est que la plupart des technologies de dessalement ne sont pas adaptés pour un fonctionnement à puissance variable. D'autre part, la taille de l'installation intervient fortement comme critère décisif pour le choix de tel ou tel source d'énergie.

I.17. Les Réalisations en énergies renouvelables pour l'eau en Algérie

Vue l'insuffisance des ressources en eau conventionnelles et la croissance démographique induisant des besoins en eau potable en constantes croissance, l'Algérie a retenue comme alternatives le recours au dessalement d'eau de mer [38].

L'optimisation des ressources en Algérie (eau et énergie) recèle un énorme potentiel de réduction des coûts de production d'eau non conventionnelle (dessalement et épuration). À titre d'exemple et d'après un calcul de l'Union Européenne, une meilleure utilisation des

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

ressources permettrait à l'industrie européenne d'économiser globalement 630 milliard d'euros par an [43].

Pour assurer l'autonomie des ouvrages hydrauliques en énergie électrique et réduire leur coût d'utilisation, l'entreprise SEOR s'est investie dans l'acquisition des panneaux photovoltaïques pour assurer l'éclairage et le chauffage. Une première expérience a été réalisée au niveau du réservoir 2x1500 situé à Hassi Ameur dans la commune de Hassi Bounif en Mars 2014 [44]. Cette solution économique pour l'exploitation de l'énergie solaire au profit des ouvrages SEOR sera bientôt généralisée pour l'ensemble des stations et réservoirs afin d'assurer une autonomie de production énergétique pour chaque ouvrage.

I.18. Les énergies renouvelables dans le Dessalement de l'eau de mer

En 2007 l'Algérie produisait 1 million de m³/jour d'eau dessalée, consommant ainsi 4KWh par mètre cube [45]. Aujourd'hui et avec 13 grandes stations de Dessalement d'eau de mer, le pays produit plus de 2 millions de m³/Jour.

Tableau I.5 : Coût du mètre cube dessalé en Algérie en dollars [38].

Stations	Wilaya	Coût en \$/m ³
Kahrma	Oran	0,87
El Hamma	Alger	0,82
Skikda	Skikda	0,74
Beni Saf	Ain Temouchent	0,69
Mostaganem	Mostaganem	0,72
Cap Djenet	Boumerdes	0,72
Honaine	Tlemcen	0,76
Fouka	Tipaza	0,75
Maktaa	Oran	0,5577
Ténès	Chlef	0,5885
Echoutt	El Taref	/
Souk Telata	Tlemcen	0,7645
Oued Sept	Tipaza	0,6794
	Moyenne	0,72

L'Algérie possède des ressources considérables en eaux salines (eau de mer et eaux saumâtres). Afin de bénéficier de cette richesse inexploitable, le CDER a entrepris une étude expérimentale de Dessalement d'eau saumâtre dans la localité de HASSI-KHEBI (Wilaya de

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Tindouf). Cette petite unité d'osmose inverse alimentée par un générateur solaire produit de l'eau potable pour les quelques 1000 habitants de ce village.

L'unité de HASSI-KHEBI produit approximativement 950 L/h d'eau potable à partir des eaux saumâtres provenant d'un forage avec une salinité de 3,2 g/L [46]. Le coût du mètre cube d'eau traitée sur la base d'un amortissement sur 20 ans [20] a été estimé à 6 \$/m³, ce qui reste très élevé comparé au coût de l'eau produite par les systèmes de dessalement conventionnels et qui s'élève à 0.72 \$/m³ (Tableau I.5).

La plus grande part d'eau dessalée en Algérie est produite par de grande station de dessalement d'eau de mer du fait de leur capacité et de leur continuel fonctionnement [38]. Or, les différentes applications à travers le monde ont montré que le dessalement solaire est beaucoup plus approprié pour les installations de petites capacités, et que leur champ d'application est très vaste (à usage domestique, santé, industrie, tourisme...). Le recours à l'énergie éolienne couplée aux unités de dessalement peut constituer une alternative potentielle pour pallier le déficit en ressources conventionnelles, comme c'est le cas pour certaines régions isolées possédant un gisement éolien important.

Il est à souligner qu'aujourd'hui, les technologies des énergies renouvelables ont gagné en fiabilité et en efficacité et peuvent aujourd'hui générer de l'électricité même dans les conditions sous-optimales comme par exemple en cas de faible vitesse de vent ou de faible ensoleillement, ce qui offre des possibilités de développement de ces énergies en faveur des petites stations de dessalement installées dans le Sud du pays en premier lieu, puis d'envisager le développement de ces technologies (éolienne et solaire) pour une généralisation d'usage au service du dessalement pour échapper à la dépendance énergétique des énergies fossiles mais surtout pour un développement durable.

I.19. Conclusion

Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, est une solution qui a prouvé son efficacité pour subvenir au besoin en eau potable dans certaines régions. Ses performances et son coût énergétique, le rendent aujourd'hui compétitive face aux procédés « historiques » de dessalement thermique.

Mais Le challenge technique, est de mettre au point des procédés toujours plus économes en énergie, si possible renouvelable, en cherchant à se rapprocher de l'ultime limite de l'énergie minimum de dessalement, cela en étant respectueux de l'environnement.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

Aujourd'hui, les technologies des énergies renouvelables peuvent générer de l'électricité dans les conditions sous-optimales ce qui offre des possibilités de développement de ces énergies en faveur des stations de dessalement. Cette transition énergétique est urgente, en particulier pour assurer l'indépendance énergétique du secteur de l'eau en Algérie pour les prochaines décennies.

Cette étude s'intéresse à une technologie alternative pour alimenter la station de dessalement de Honâine par un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien associé par un système de stockage d'énergie, qui va être présenté dans le prochain chapitre.

Références bibliographiques

- [1]. www.Oboulo.com
- [2]. A. Maurel, «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non Conventionnels d'approvisionnement en eau douce», 2ème édition, Paris : Lavoisier Tec&Doc, 2006.
- [3]. V. RENAUDIN, «Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres», Dossiers Chimie et question de société sur le site Culture Sciences chimie : site de ressources scientifiques pour les enseignants en chimie, Novembre 2003.
- [4]. C. LARUE, A. LIBERMANN, «L'eau : une ressource en péril», Les dossiers des Yeux du Monde – Numéro 1 – Janvier 2014.
- [5]. www.irena.org
- [6]. www.mre.gov.dz (Site du Ministère des Ressources en Eau).
- [7]. B. MOUHOUCHE, «Maîtrise de la pratique de l'arido culture comme palliatif au manque d'eau en Algérie », 9ème Conférence Internationale « EURO-RIOB 2011» sur l'application actuelle et future de la Directive - Cadre Européenne sur l'Eau, Porto, Portugal, 27–30 Septembre 2011.
- [8]. A. KETTAB, «Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision». Desalination 136 (2001) 25–33.
- [9]. A. MAUREL. «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres», édition technique et documentation, 2001.
- [10]. O. CHARROUF, «Optimisation d'Un Système De Dessalement Renouvelable», Mémoire de magister en Electrotechnique Option : Energies Renouvelables, Université Mohamed Khider – Biskra, p 4, 2012.
- [11]. J.P. MERIQ, «Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire», Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p 33, 2009.
- [12]. LE GUERN, P. LACHASSAGNE, Y. NOEL, F. PERSIN et L. DE BUVSSCHER, « Dessalement et recharge artificielle : synthèse technico-économique», Rapport BRGM/RP-52262-FR, 2003, 80 p.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

- [13]. C. TANSAKUL, «Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse», Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p 22, 2009.
- [14]. P. BANDELIER, «Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres», Encyclopédie de l'énergie 121(Jan 2017) p 1–36.
- [15]. ww.laboceano.coppe.ufrj.br/ittc2011/documents/2011/pdf%20Procedures%202011/7.5-02-01-03.pdf.
- [16]. K. A. AL-SHAYJI, «Modeling, Simulation, and Optimization of Large- Scale Commercial Desalination Plants», Thèse de doctorat de Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [17]. P. DANIS, «Dessalement de l'eau de mer», Techniques de l'ingénieur traité Génie des Procédés, J2700. Juin 2003.
- [18]. J.P. BRUN; «procédés de séparation par membranes» ; MASSON ; 1989.
- [19]. C .GALUS, «les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor», extrait du monde, p 23, 2000.
- [20]. Z .TRIKI, «Études, Analyses et Optimisation de la Consommation Énergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés», Thèse de doctorat en Sciences Spécialité : Génie Climatique, Université Constantine 1, p 38, 2014.
- [21]. O.K. BUROS, «The ABCs of Desalting», Second ed. International Desalination Association, Topsfield, Mass, 2000.
- [22]. V. CALABRO, E. DRIOLI, «Polarization phenomena in integrated reverse osmosis and membrane distillation for seawater desalination and waste water treatment», Desalination 108 (1996) 81-82.
- [23]. M. Al-SAHALI et H. ETTOUNEY, «Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects», Desalination 214 (2007) 227– 240.
- [24]. H.K. SHON, S. VIGNESWARAN, J. CHO, «Comparison of physico-chemical pretreatment methods to seawater reverse osmosis: Detailed analyses of molecular weight distribution of organic matter in initial stage», Journal of Membrane Science 320 (2008) 151-158.
- [25]. H.K. SHON, S.H. KIM, S. VIGNESWARAN, R. BEN AIM, S. LEE, J. CHO, «Physicochemical pretreatment of seawater: fouling reduction and membrane characterization», Desalination 238 (2009) 10-21.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

- [26]. V. BONNELYE, «Dessalement des eaux : les récentes évolutions techniques et le développement des applications en production d'eau potable», Revue HTE, No 142 (2009) 72–77.
- [27]. B.VAN DER BRUGGEN, C.VANDECASTEELE, «Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry», Environmental Pollution, No 122 (2003), 435- 445.
- [28]. G.R. LOURDES, «Seawater desalination driven by renewable energy», A review, Desalination, No 143 (2002), 103-113.
- [29]. H.MAHMOUDI, and N. GHAF FOUR, «Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria», Renewable and Sustainable Energy Reviews,(2008).
- [30]. N. BOUBOU-BOUZIANI, «Problématique de gestion de l'eau et déficit énergétique», In Revue LJEE, N°24&25, Blida, Juin-Décembre 2014, P50.
- [31]. A. E I-NASHAR «The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas», Desalination, No 134 (2001), 173-186.
- [32]. E.S. HRAYSHAT and A.E. AL-RAWAJFEH, «A solar multiple effect distiller for Jordan», Desalination, No 220(2008), 558-565.
- [33]. D.HEROLD, «Small scale photovoltaic desalination for rural water supply- Demonstration plant in Gran Canaria», Renewable Energy, No 14(1998), 293-298.
- [34]. B.RICHARDS, C. REMY, and A.I.SCHAFER, «Sustainable drinking water production from brackish sources using photovoltaics», 19th European Photovoltaic and Solar Energy Conversion Conference, Paris, France, p.p 3369–3372.
- [35]. P.COTE, J.CADERA, J. COBURM, and A.MUNRO, «A new immersed membrane for pretreatment to reverse osmosis», Desalination, No 139 (2001), 229-236.
- [36]. M.THOMSON, M.S .MIRANDA, and D. INFIELD, «A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range», Desalination, No 153(2003), 229- 236.
- [37]. A.G.GOTOR, I.PESTANA, and C.A.ESPINOZA, «Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies», Desalination, No 156(2003), 351- 360.
- [38]. J. A.CARTA, J. GONZALEZ, and V.SUBIELA, «Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands», Solar Energy, No 75(2003), 153-168.

Chapitre I : Dessalement et énergie - Notions Globales

- [38]. N. BOUBOU-Bouziani, «Les énergies renouvelables et l'eau en Algérie», Communication Science & technology vol 17. July 2016, 1-13.
- [39].M.TURKI, A.BEN RHOUMA, J.BELHADJ, «Control strategy of an autonomous desalination unit fed by PV-Wind hybrid system. », J. Electrical Systems 4-2(2008):1-12.
- [40]. Q.WEI, L.JINFENG and D. PANAGIOTIS CHRISTOFIDES, «Supervisory Predictive Control for Long-Term Scheduling of an Integrated Wind/Solar Energy Generation and Water Desalination System», IEEE,10.1109/TCST.2011.2119318.
- [41]. A.HANAFI, «Desalination using renewable energy sources», Desalination (1994), 97 (1-3), 339-352.
- [42]. E .MATHIOUKALIS, V. BELIOSSOTIS, E .DELYANIS. «Desalination by using alternative energy: Review and stat of the art», Desalination203 (2007) 346-365.
- [43]. «Entreprises et Industrie», Magazine de la Commission européenne, ISSN 1831-1245, Septembre 2014, P10.
- [44]. Société de l'Eau et de l'assainissement d'Oran (SEOR), 2015.
- [45]. ROYER Jean-Loup & BEN LANNET ALLAL Houda, «Les besoins en énergie pour l'eau en Méditerranée», In Atelier Plan Bleu / MEDITEP Eau, énergie et changement climatique en Méditerranée, Carthage, 17 décembre 2007.
- [46]. MAUREL Alain, «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce», Édition Lavoisier, France, 2006, p 221.

Chapitre II :

Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.1. Introduction

Le recours aux sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc.) dans un Système d'Énergie Hybride (SEH) aura sans doute une incidence profitable sur la production d'énergie électrique, en termes de coût, de disponibilité, de la protection de l'environnement et du développement sociale des différentes régions. Cependant l'utilisation de ces énergies est souvent liée par la variabilité et la disponibilité des ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes journalières ou annuelles ne sont pas toujours corrélées avec les variations des potentiels renouvelables. C'est ainsi que l'idée de couplage entre plusieurs sources est intéressante afin de remédier à cette contrainte.

Dans ce contexte, plusieurs combinaisons de systèmes de dessalement à énergie renouvelables existent mais certains seulement sont techniquement et économiquement réalisables. Ils dépendent de plusieurs facteurs tels que la disponibilité de ressource d'énergies renouvelables, la présence de stockage hydraulique et de la qualité d'eau à dessaler. En outre certains sont adaptés pour les installations de grande taille, tandis que d'autres sont utiles pour des installations de petite taille. Dans ce chapitre, nous présenterons la configuration de notre système de dessalement renouvelable et la motivation pour notre choix.

II.2. Couplage énergies renouvelables /osmose inverse

Une combinaison des sources d'énergies renouvelables (SER) et de la technologie du dessalement pourrait offrir une source durable d'eau potable. Il y a plusieurs possibilités de combinaisons des procédés de dessalement avec les différentes SER [1,2], cependant la correspondance d'un procédé de dessalement à une SER n'est pas très simple, du fait que principalement le processus de dessalement est plus adapté à un fonctionnement continu. En effet, la majorité des SER sont non continues et elles sont intermittentes, et souvent sont diurnes. Un approvisionnement en énergie qui n'est pas prédictible et qui n'est pas continu entraîne un fonctionnement non optimal de l'unité de dessalement et par conséquent des problèmes sur le plan opérationnel.

Le meilleur couplage de SER avec les systèmes de dessalement est déterminé à partir de différents critères, tels que le rendement du système, les coûts O&M, la disponibilité du personnel opérationnel, l'adéquation du système au site, la possibilité d'une augmentation

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

ultérieure de la production du système, etc. Le choix approprié de la technologie de dessalement par énergie renouvelable dépend d'un certain nombre de facteurs, à savoir [1] :

- La quantité requise d'eau potable (capacité de production).
- La salinité de l'eau d'alimentation.
- L'éloignement.
- La disponibilité du réseau électrique.
- L'infrastructure technique.
- Le type et le potentiel de la ressource d'énergie renouvelable locale.

Parmi les différents procédés de dessalement actuellement opérationnels le procédé d'OI ne nécessite pas une grande énergie électrique. Ce procédé a la consommation spécifique énergétique la plus faible.

La figure II.1 montre les principales combinaisons de l'osmose inverse avec les sources des énergies renouvelables. Les capteurs solaires PV sont particulièrement adaptés pour des applications de petite échelle, alors que l'énergie éolienne est mieux indiquée pour des systèmes plus larges ou dans le cas de petites unités en combinaison avec les capteurs solaires, comme les PV [2].

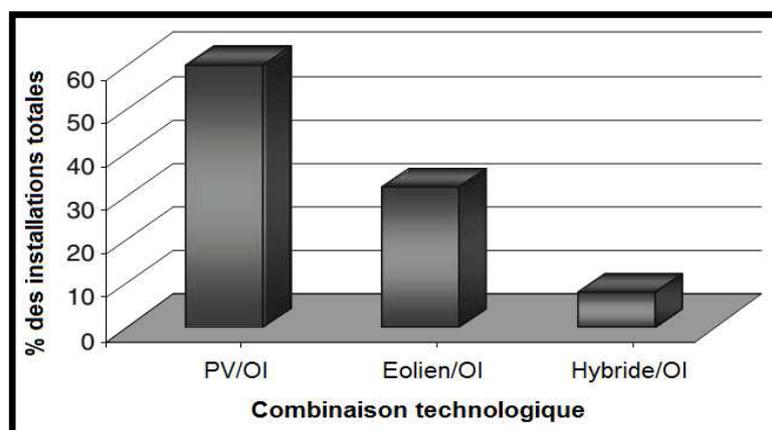


Figure II.1 : Combinaisons osmose inverse/énergies renouvelables [1].

L'utilisation des sources des énergies renouvelables pour alimenter les unités de dessalement par osmose inverse n'est pas nouvelle. Déjà dans les années 80, plusieurs travaux sur le dessalement par OI couplé aux énergies renouvelables peuvent être trouvés dans la littérature [3-5]. Une revue est donnée dans [6]. De petites unités d'OI alimentés par énergie

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

solaire PV peuvent également être trouvées dans [7-10]. Plus récemment, de nombreuses applications dans ce domaine ont été reportées dont certaines d'entre elles sont données dans [11-14]. Dans [15], une approche a été présentée qui ne nécessite pas de batteries. Les travaux de Pioneer sur des unités d'OI alimentées par énergie éolienne sont [7, 16-20]. Des travaux plus récents sont donnés dans [21–24]. Une unité fonctionnant sans batteries a été présentée par [25]. La combinaison OI/PV/éolien a été premièrement proposée dans un environnement de simulation par [26]. D'autres projets, comportant cette combinaison, ont été également présentés dans [27–30].

II.3. Description des technologies photovoltaïque-éolien/osmose inverse

L'utilisation des panneaux photovoltaïques et les turbines éoliennes pour alimenter les unités d'OI, est techniquement faisable. L'inconvénient majeur de la combinaison des procédés de dessalement avec les énergies solaire et éolienne, est la fluctuation de l'alimentation électrique générée. En général, les systèmes de dessalement sont traditionnellement conçus pour fonctionner avec une puissance d'alimentation constante car l'imprédictibilité et le non stabilité du courant électrique, force l'unité de dessalement à fonctionner à des conditions sous-optimales, pour cela le système de stockage (batteries), est généralement utilisé pour le stockage à moyen terme [31].

Un facteur important, en particulier dans les systèmes d'énergies hybride autonomes, est la commande et l'automatisation complète du système. Dans les deux systèmes, autonomes et connectés au réseau, un dispositif spécial de gestion de l'énergie doit être conçu.

Un système hybride photovoltaïque-éolien/batteries/OI (Figure II.2), se compose des équipements suivants :

- Générateur photovoltaïque ;
- Générateur éolien ;
- Banque de batteries ;
- Contrôleur de charge ;
- Convertisseur ;
- Unité d'OI.

Les batteries sont utilisées pour la stabilité de la puissance et comme source d'énergie pendant les périodes creuses, où les énergies solaires et éoliennes ne sont pas suffisantes pour entraîner l'unité de dessalement.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

Les contrôleurs de charge sont utilisés pour la protection des batteries contre les surcharges, et Les onduleurs pour convertir le courant continu (DC) de la sortie de la batterie, à la charge de courant alternatif (AC).

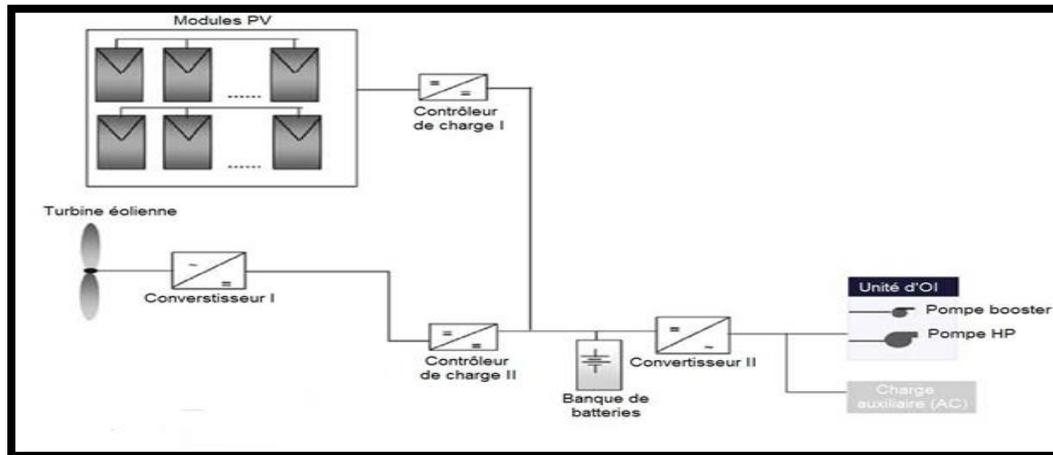


Figure II.2 : Schéma du système hybride photovoltaïque-éolien typique pour l'unité d'osmose inverse.

Les grandes unités d'OI utilisent des Dispositifs de récupération d'énergie (DRE) pour réduire la consommation d'énergie de 2 à 2,5 kWh/m³. Leur utilisation augmente le coût initial du système, mais réduit le besoin en énergie de manière efficace.

En général, le but de chaque projet est l'évaluation de la combinaison des technologies et le développement de systèmes compacts et fiables. Les conceptions en général permettent également la production parallèle de l'eau et de l'électricité.

II.4. Configuration du système de dessalement renouvelable

Pour notre système, les énergies solaire et éolienne sont choisies comme source d'alimentation pour l'unité d'osmose inverse, en considérant que la technologie mixte photovoltaïque-éolienne, est plus attrayante dans le court terme, puisque elle est bien développée et économiquement très compétitive. Ainsi que le procédé d'osmose inverse a gagné une importance considérable, en raison des avantages qu'offre cette technologie par rapport aux techniques thermiques de dessalement.

En effet, la flexibilité dans les dimensions des installations (OI), la consommation d'énergie réduite et l'amélioration dans les membranes, les ont rendus des processus à

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

rendement économique très compétitifs [32]. En outre, la nature des systèmes modulaires (OI) permet au processus de s'adapter facilement aux changements climatiques, lors de l'alimentation par les sources d'énergies renouvelables.

II.5. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

II.5.1. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire.

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé. L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par [33] :

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot S_{PV} \cdot P_f \cdot H \quad (\text{II.1})$$

Où :

S_{PV} : La surface totale du générateur photovoltaïque (m^2) ;

R_{PV} : Le rendement du générateur photovoltaïque ;

H : L'irradiation solaire sur plan incliné (KWh/m^2) ;

P_f : Le facteur de remplissage du module, égal à 0.9.

Le rendement du générateur photovoltaïque est représenté par l'équation suivante :

$$R_{PV} = \eta_r \{1 - \gamma(T_C - 25)\} \quad (\text{II.2})$$

$$T_C = T_a + G_{inc} \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

γ : Coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à ($0.0045 / ^\circ C$) ;

η_r : Le rendement de référence du générateur photovoltaïque ;

T_a : Température ambiante moyenne journalière ($^\circ C$) ;

T_C : Température cellule moyenne journalière ($^\circ C$) ;

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.5.1.1. Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode [34].

La cellule comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou Shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [35].

Le courant délivré sur une charge par une cellule PV éclairée s'écrit [36] :

$$I(V) = I_{ph}(V) - I_{obs}(V) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

I_{ph} : Densité de courant photogénéré ;

I_{obs} : Densité de courant d'obscurité.

Dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant photogénéré et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à la cellule d'une cellule sous éclairage (Figure II.3).

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

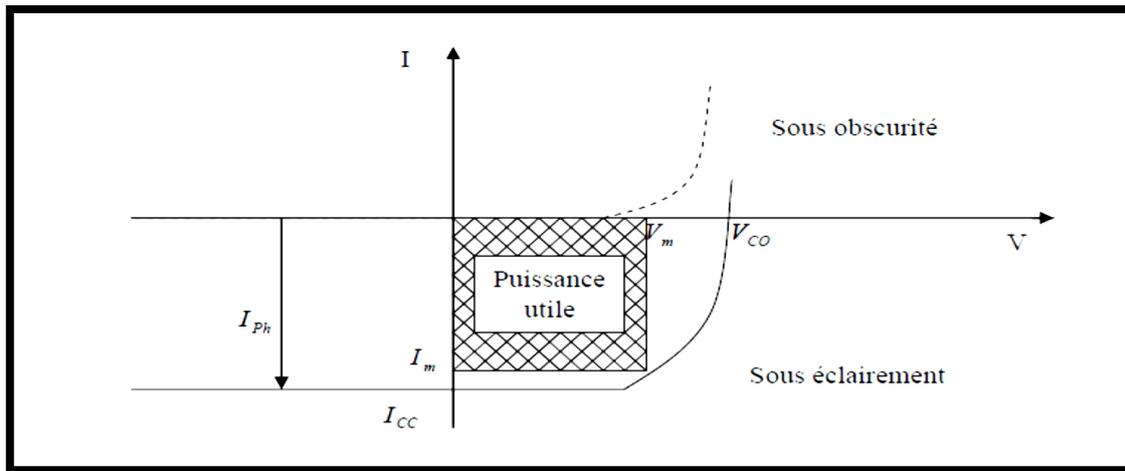


Figure II.3 : Caractéristiques $I=f(v)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque [37].

II.5.1.2. Présentation du modèle mathématique

La loi de Kirchhoff (loi des nœuds) nous permet d'écrire la relation du courant photopile suivante [36, 38-39] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) \quad I_{ph}: \text{Photo-courant de cellule,}$$

Le courant de jonction I_d (courant traversant la diode) est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

Le courant dérivé par la résistance shunt, est :

$$I_r = \frac{V + R_S I}{R_{Sh}} \quad (\text{II.7})$$

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

$$I = I_{SC} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_{Sh}} \quad (\text{II.8})$$

Où :

- I : Courant de cellule [A] ;
- V : Tension de cellule [Volt] ;
- T : Température de la jonction en [°K] ;
- q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$) ;
- I_0 : Courant de saturation inverse de la diode en [A] ;
- K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot \frac{10^{-23} J}{K}$) ;
- v : Tension de seuil de diode (1,1V) ;
- n : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- R_S : Résistance série de la cellule [Ω].

II.5.1.3. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant–tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [36, 40] :

- **Courant de court –circuit I_{CC}** : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle [37]. Dans le cas idéal (R_S est nulle et R_{Sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.5), on obtient :

$$I_{CC} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{R_S I_{CC}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_S I_{CC}}{R_{Sh}} \quad (\text{II.9})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible),

On peut négliger le terme : $I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{nkt}} - 1 \right)$

Devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court circuit est alors : $I_{CC} \cong \frac{I_{Ph}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_{Sh}} \right)}$

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

- **Tension en circuit ouvert V_{CO}** : C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [37].

$$0 = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{CO}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{CO}}{R_{Sh}} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

- **Puissance optimale** : La puissance utile maximale s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left(\frac{dI}{dV} \right) M \quad (\text{II.12})$$

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairage de $1000W/m^2$ et à une température de $25^\circ C$.

- **Facteur de forme FF**

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} , et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \cdot V_{CO}$ (puissance optimale) [41] :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (\text{II.13})$$

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

- **Rendement énergétique maximum η_m** :

Le rendement énergétique maximum η_m des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance maximale (P_{max}) fournie par la cellule sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{S\phi} = \frac{FF \cdot V_{CO} \cdot I_{CC}}{P_i} \quad (\text{II.14})$$

S : Surface de la cellule solaire (m^2) ;

ϕ : Flux incident (W/m^2) ;

I_m, V_m : Coordonnées de point de fonctionnement.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [42].

II.5.2. Générateur éolien

II.5.2.1. Définition

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [43].

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part du marché des systèmes à axe vertical est insignifiante. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [44].

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [45].

II.5.2.2. Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Les principales composantes d'un système ordinaire de conversion de l'énergie éolienne sont ; une turbine, une génératrice triphasée, un dispositif d'interconnexion et un système de contrôle, comme le montre la Figure II.4. Les turbines peuvent être à axe vertical ou horizontal. La plupart des turbines modernes sont dotées d'un axe horizontal comprenant deux ou trois pales, et peuvent fonctionner face au vent ou sous le vent [46].

La turbine peut être à vitesse constante ou à vitesse variable. Les turbines à vitesse variable peuvent produire de 8 à 15 % plus d'énergie que les turbines à vitesse constante, mais elles doivent être dotées d'un convertisseur électronique de puissance pour produire une

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

tension et une fréquence fixes pour les charges. La plupart des fabricants de turbines installent maintenant un démultiplicateur entre le rotor de la turbine à basse vitesse et la génératrice triphasée à haute vitesse.

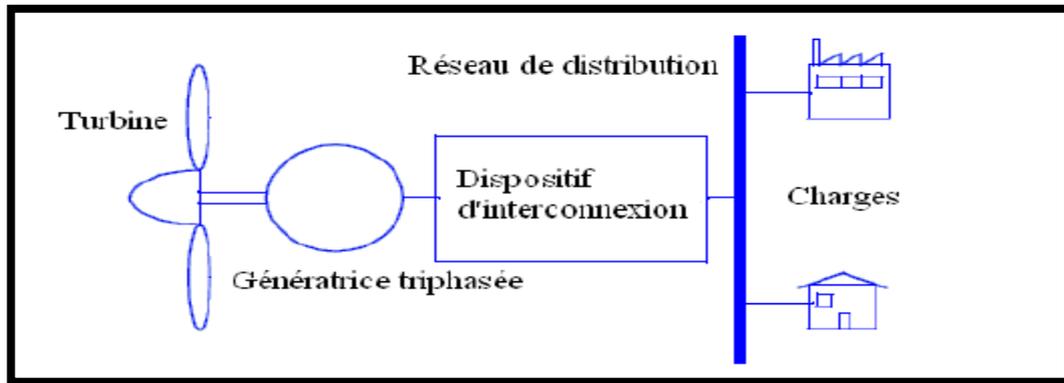


Figure II.4 : Structure d'un système normal de conversion de l'énergie éolienne [46].

Dans un avenir proche, les éoliennes seront dotées de génératrices synchrones, de génératrices synchrones à aimants permanents ou de génératrices asynchrones, y compris les modèles à cage d'écureuil et à rotor bobiné ; certaines en sont d'ailleurs déjà pourvues. On utilise souvent les génératrices à aimants permanents et les génératrices à induction à cage d'écureuil pour les petites et moyennes turbines en raison de leur fiabilité et de leur coût moins élevé. Diverses turbines à haute puissance sont actuellement dotées de génératrices à induction, de génératrices synchrones à aimants permanents et de génératrices synchrones à bobines de champs.

II.5.2.3. Classification des systèmes éoliens

Les systèmes éoliens autonomes sont des systèmes de génération d'énergie comprenant plusieurs éoliennes pour une puissance installée totalisant entre 10 kW et 10 MW. Ils sont classifiés selon le type de production d'énergie accompagnant l'éolienne et par le degré de pénétration de l'énergie éolienne dans le système. Présentement, leur développement est limité par les coûts capitaux et les coûts d'opération qui sont élevés comparativement aux systèmes de production d'énergie dits traditionnels [47].

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

La répartition d'un système éolien est donnée par le tableau suivant:

Tableau II.1 : Classification des systèmes éoliens [47].

Puissance installée	Classification
< 1 KW	Système éolien micro
1-100 KW	Système éolien maison
10 KW-10MW	Système éolien autonome
> 10MW	Système éolien industriel

II.5.2.4. Évaluation des ressources éoliennes

II.5.2.4.a. Puissance éolienne disponible

Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables pendant le temps : sa direction sa vitesse et son intensité. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la vitesse du vent, la densité de l'air et la surface balayée par les pales. En effet l'énergie cinétique du vent par unité de volume est :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_a V^2 \quad (\text{II.15})$$

Où :

ρ_a : Masse volumique de l'air généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne 1,25Kg/m³.

Le volume d'air qui traverse la zone balayée par les pales du rotor par unité de temps (débit volumique) est :

$$D = VA = V\pi r^2 \quad (\text{II.16})$$

Où :

A : Surface balayée par les pales ;

r : Longueur des pales.

Ainsi la puissance disponible (énergie par unité de temps) est :

$$P = E_c \times D = \frac{1}{2} \rho_a r^2 V^3 \quad (\text{II.17})$$

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

On remarque ainsi que la puissance disponible varie avec le cube de la vitesse, le carré de la longueur des pales et la masse volumique de l'air.

II.5.2.4.b. Puissance éolienne récupérable (Théorème de Betz)

En effet, toute la puissance éolienne disponible ne peut pas être transformée en puissance mécanique par l'éolienne. Ainsi, en 1919 Albert Betz démontre que la puissance théorique maximale récupérable par une éolienne est égale à 16/27 soit 0,59 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne [48].

Ce résultat est connu sous le nom de « la loi de Betz ». Considérons une veine d'air telle que la section au niveau de l'éolienne est égale à la surface balayée par les pales (Figure. II.5). Les hypothèses sont celle d'un fluide parfait (pas de frottement) incompressible en régime permanent. Par conservation de la masse, le débit massique le long de veine d'air est constant :

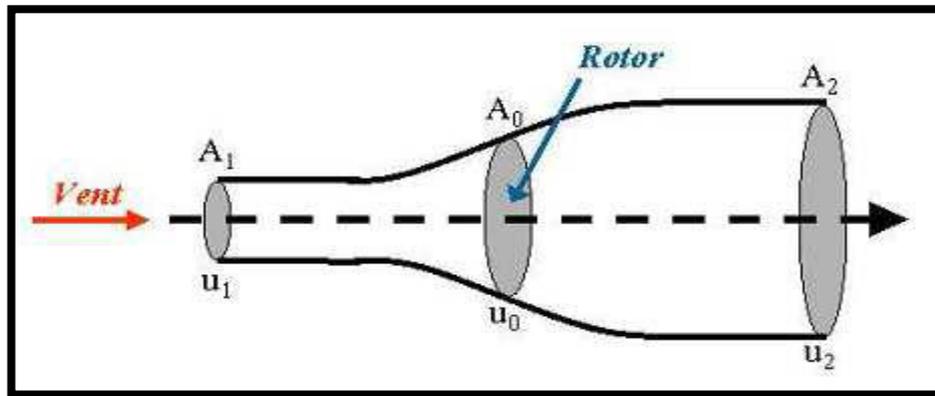


Figure II.5 : Veine d'air traversant la zone balayée par les pales d'une éolienne [48].

$$\dot{m} = \rho_a V_1 A_1 = \rho_a V_2 A_2 \quad (\text{II.18})$$

Comme $V_1 > V_2$, on a bien $A_1 < A_2$. La puissance extraite par l'éolienne est :

$$P_u = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_a (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) \quad (\text{II.19})$$

En utilisant l'équation (II.18) et en faisant l'hypothèse que $V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2}$, on a :

$$P_u = \frac{1}{2} \rho_a A_0 u_0 (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho_a A_0 (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.20})$$

En divisant (II.20) par la puissance totale disponible, on fait alors apparaître le facteur de capacité :

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

$$F_c = \frac{P_u}{\frac{1}{2}\rho_a A_0 V_1^3} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \quad (\text{II.21})$$

$$F_c = \frac{1}{2} (1+a)(1-a^2) \quad (\text{II.22})$$

On voit que C_p admet un maximum (Figure .II.6). En écrivant F_c par rapport à a , il suffit de résoudre une équation des seconds degrés pour déterminer la valeur de a qui correspond au maximum du coefficient de puissance :

$$\frac{dF_c}{da} = 0 \Leftrightarrow -3a^2 - 2a + 1 = 0 \quad (\text{II.23})$$

Cette équation admet pour seule racine positive $a = 1/3$. On a alors $F_c = 16/27$.

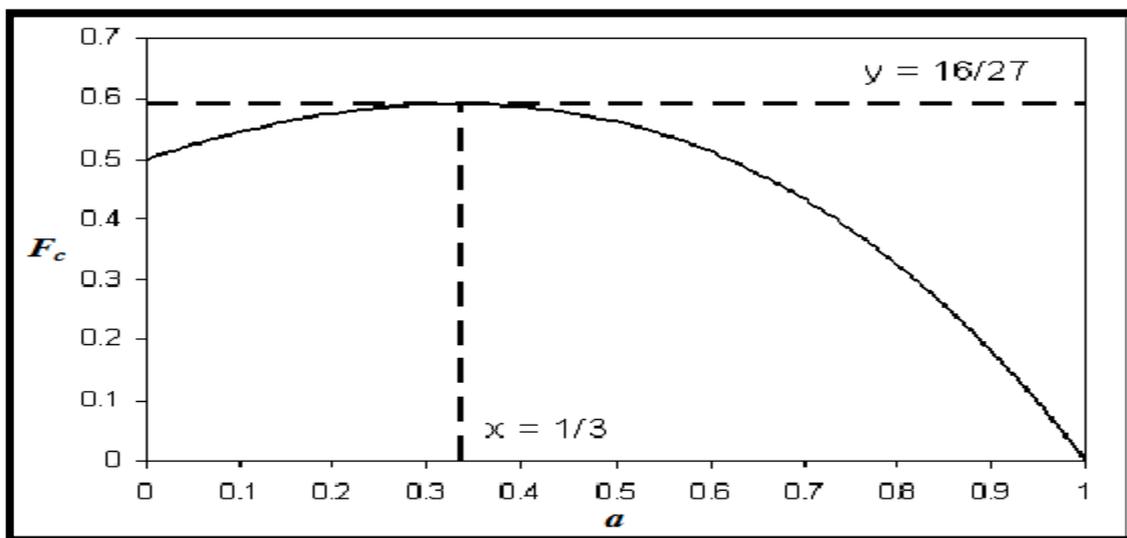


Figure II.6 : Évolution de F_c en fonction de a [48].

Ainsi, quelque soit la géométrie de l'éolienne, la puissance maximale que l'éolienne peut théoriquement extraire est égale à environ 60% de la puissance disponible. Il est aussi intéressant de connaître, à ce niveau, un facteur clé lié à la conception de l'éolienne (λ). Le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne (sans unité), λ , représente le rapport entre la vitesse du bout de la pale et celle du vent au niveau de l'axe rotor. On a donc :

$$\lambda = \frac{\Omega_t r}{V_1} \quad (\text{II.24})$$

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

Où :

Ω_t : vitesse de rotation avant la transmission.

II.5.2.5. Aérogénérateur :

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique, P (W), dans le vent est exprimée par :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.25})$$

Avec :

S : Surface traversée par le vent (m^2) ;

ρ : Densité de l'air ($\rho = 1,225Kg/m^3$) ;

V : Vitesse du vent (m/s) .

Le générateur éolien ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance de vent et qui représente la puissance produite par le générateur éolien :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho C_e S V^3 10^{-3} \quad (\text{II.26})$$

Où :

C_e : Facteur d'efficacité, qui dépend de la vitesse du vent et de l'architecture du système [49].

Il est déterminé à partir des performances de l'unité de transformation.

$$C_e = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (\text{II.27})$$

Où :

η_m et η_g : le rendement respectivement du multiplicateur et de la génératrice.

C_p : Le coefficient de performance de la turbine éolienne. Il ne peut théoriquement pas dépasser une limite dite limite de Betz (C_p limite = 0.593).

Par conséquent, l'énergie produite par le générateur éolien est exprimée par :

$$E_{eol} = P_{eol} \cdot \Delta t \quad (\text{II.28})$$

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.5.3. Systèmes de Stockage pour la production d'électricité

II.5.3.1. Nécessité du stockage d'énergie

Le stockage d'électricité présente plusieurs attraits importants pour la génération, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Pour le réseau public, par exemple, une installation de stockage d'énergie est utile pour conserver l'électricité générée durant les périodes creuses de consommation afin de la restituer lors des fortes demandes. Le stockage d'énergie permet de fournir de l'énergie de soutien (back-up) en cas de panne de réseau ; le stockage d'énergie est la seule réponse possible à une perte du réseau d'alimentation électrique.

Le stockage d'énergie joue aussi un rôle important dans la génération d'électricité à partir de sources renouvelables [50]. La nature intermittente des SER comme le solaire, l'éolien rendent nécessaire une forme de stockage. Cependant, le stockage de l'énergie n'est pas encore largement répandu. La disponibilité et le coût élevé des différentes technologies expliquent en partie cet état de fait. Avant les années 1980, le pompage de l'eau dans les centrales hydrauliques constituait pratiquement le seul système de stockage de l'énergie électrique à grande échelle. Depuis, d'autres systèmes se sont développés et les applications domestiques sont en plein développement mais le coût reste un handicap.

Actuellement, dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable.

Elles sont d'habitude du type Plomb –Acide car cette technologie bénéficie d'un coût faible et d'une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Bien que la tension nominale du système soit 380 V, Le nombre de batteries nécessaires est déterminé à partir de la consommation énergétique du système et du nombre de jours d'autonomie des batteries.

II.5.3.2. Types de Stockage d'énergie

Plusieurs techniques de stockage de l'énergie sont utilisées et peuvent être classés selon la forme de l'énergie intermédiaire [51]. On distingue deux grandes catégories :

II.5.3.2.1. Énergie intermédiaire : énergie électrochimique

a) Stockage sous forme d'hydrogène

L'énergie disponible est utilisée pour produire de l'hydrogène par le phénomène d'électrolyse. La combustion de cet hydrogène permet de dégager l'énergie quand on en a besoin.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

b) Batteries et accumulateurs

Ce sont des systèmes qui permettent de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique ; de stocker de l'électricité quand on les charge et de la restituer, à la décharge. Ils sont constitués de couples électrochimiques composés de deux électrodes séparées par un électrolyte et où se produisent des réactions d'oxydoréduction. Lors de ces réactions, le déplacement des ions dans le milieu induit la production d'énergie électrochimique.

II.5.3.2.2. Énergie intermédiaire : énergie mécanique

a) Stockage sous forme d'énergie potentielle

Comme, par exemple, les systèmes hydrauliques permettant de stocker l'eau dans des réservoirs élevés et réutiliser l'énergie fournie par la chute d'eau quand on en a besoin.

b) Stockage sous forme d'énergie cinétique

Utilisée pour le stockage à basse échelle. L'accumulateur à volant d'inertie est le modèle le plus utilisé.

c) Stockage sous forme d'énergie de pression

Le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé dans des réservoirs ou des cavernes souterraines devient de plus en plus réputé [52]. L'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur.

L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au-dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air. L'énergie libérée par la détente de l'air comprimé peut être utilisée par plusieurs techniques notamment la turbine à air, une turbine à gaz ou même un moteur diesel.

II.5.3.3. Caractéristiques de charge et de décharge

Plusieurs techniques de régulation ont été développées, se basant sur la tension mesurée aux bornes de la batterie comme étant le seul indicateur de son état de charge « State Of Charge-SOC ». La technologie de la batterie choisie permet 20% de décharge (SOC min=20%). Elle a un rendement énergétique η_{bat} de 100% à la décharge, et 90% à la charge. Une des technologies de contrôle de l'état de charge de la batterie (State Of Charge SOC), consiste en la mesure et le calcul des quantités d'électricité entrantes et sortantes dans les deux processus de charge et de décharge en termes d'ampères-heures. Cette technique est appelée la mesure coulomb métrique.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

L'état de charge de la batterie à un instant donné dépend directement de l'état de charge précédent, qui doit être connu au préalable. Toutefois, cette méthode devient insuffisante en cas de mise en service de l'une des sources renouvelables. Ainsi, une approche complémentaire basée sur la mesure de la tension en circuit-ouvert de la batterie à l'état complètement stable permet de calculer le « SOC ». Cette approche considère que la tension de circuit-ouvert V_{oc} est directement proportionnelle au « SOC », et que la température de l'électrolyte a peu d'influence.

Les caractéristiques tension – courant d'un élément batterie en cas de décharge et de charge sont données respectivement par les figures ci-dessous (Figures II.7 et II.8) [53] :

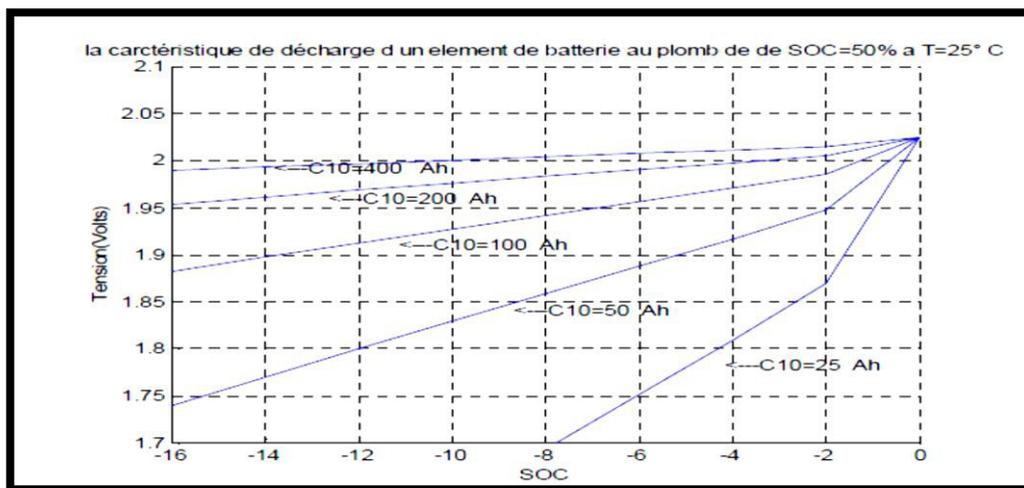


Figure II.7 : Caractéristique de décharge [53].

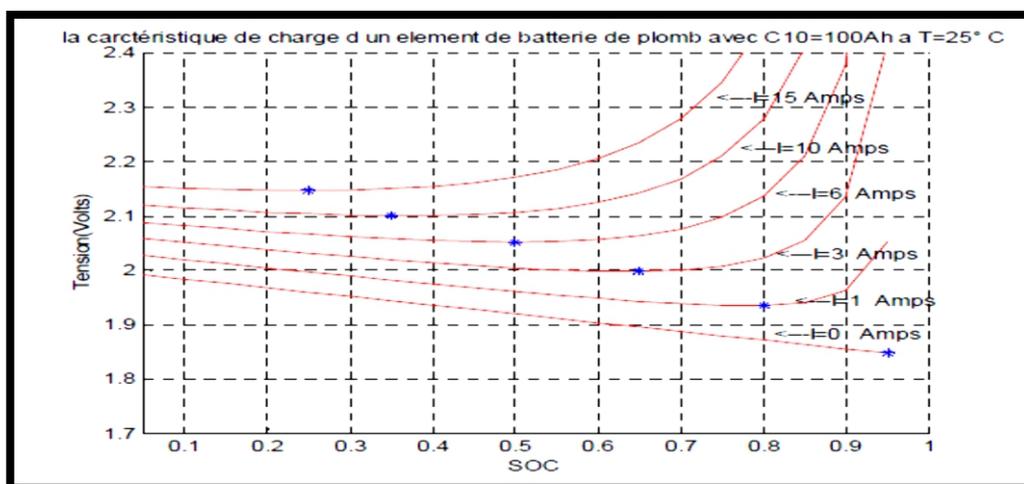


Figure II.8 : Caractéristique de charge [53].

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.5.4. Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

II.6. Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien/osmose inverse

II.6.1. Modélisation du système photovoltaïque

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature [54]. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (série et shunte) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous (Figure II.9).

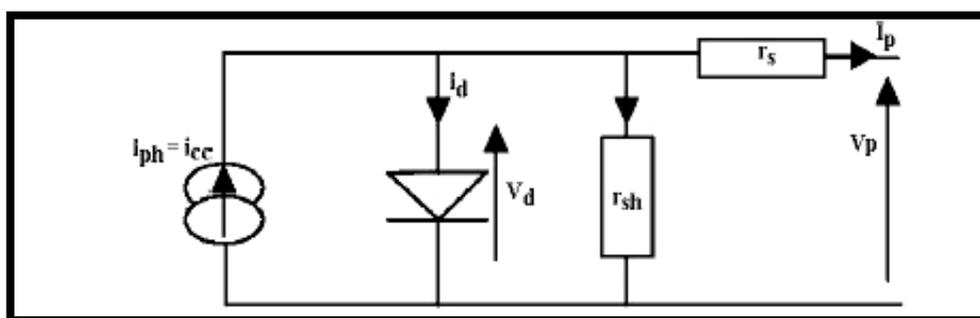


Figure II.9 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle comporte quatre variables (Figure II.10). Les deux variables d'entrée sont :

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

E_s : Ensoleillement dans le plan des modules (W / m^2) ;

T_j : Température de jonction de la cellule($^{\circ}C$).

Les deux variables de sortie sont :

I_G : Courant fourni par le groupe de modules (A) ;

V_G : Tension aux bornes du groupe de modules (Volts).

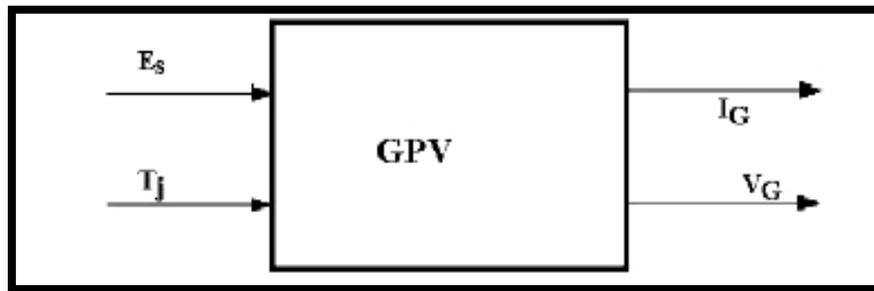


Figure II.10 : Schéma bloc du Générateur Photovoltaïque.

Nous obtenons alors l'équation caractéristique pour un groupe de modules photovoltaïques déduite du schéma électrique équivalent de la figure II.9.

$$I_G = I_{ph} - I_d - I \cdot R_{Sh} \quad (\text{II.29})$$

Le courant, I_{ph} est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température des modules et peut se mettre sous la forme :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2(E_s - E_{Sref}) + P_3(T_j - T_{Jref})] \quad (\text{II.30})$$

Où :

$E_{Sref}=1000W / m^2$: Ensoleillement de référence ;

$T_{Jref} = 25^{\circ}C$: Température de référence des modules ;

P_1, P_2, P_3 : Paramètres constants.

Le courant de polarisation de la jonction P-N, I_d est donné par l'expression :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left[\exp \left(\frac{q}{K \cdot A \cdot n_s T_j} (V_G + R_s \cdot I_G) \right) - 1 \right] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

I_{sat} : Courant de saturation (A) ;

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

- K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$) ;
 q : Charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19} C$) ;
 A : Facteur d'idéalité de la jonction.

Le courant de saturation de la diode est :

$$I_{Sat} = P_4 \cdot T_J^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{K \cdot T_J}\right) \quad (\text{II.32})$$

Où :

- E_g : Energie de gap ;
 P_4 : Paramètre constant.

Enfin, le courant traversant la résistance shunt s'écrit sous la forme :

$$I_{Sh} = \frac{V_G}{R_{Sh}} \quad (\text{II.33})$$

Nous pouvons alors écrire l'équation finale :

$$I_G = P_1 \cdot E_S \cdot [1 + P_2(E_S - E_{Sref}) + P_3(T_J - T_{Jref})] - \frac{V_G}{R_{Sh}} - P_4 \cdot T_J^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{K \cdot T_J}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{K \cdot A \cdot n_S \cdot T_J}(V_G + R_S \cdot I_G)\right) - 1 \right] \quad (\text{II.34})$$

Nous obtenons une fonction implicite de la forme :

$$I_G = f(I_G, V_G, E_S, T_J)$$

Avec 7 paramètres à déterminer $A, P_1, P_2, P_3, P_4, R_S$ et R_{Sh} .

La résistance série doit être plus petite que possible et la résistance shunt doit être très grande pour que le maximum de courant soit délivré pour la charge.

$$P_1 = 0,0036 ; P_2 = 0,0001 ; P_3 = -0,0005 ; P_4 = 70,843 ; A = 1 ; R_S = 0,614 ; R_{Sh} = 151.16.$$

II.6.2. Modélisation du système éolien

Une voile éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique, caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique (Figure II.11) [54].

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

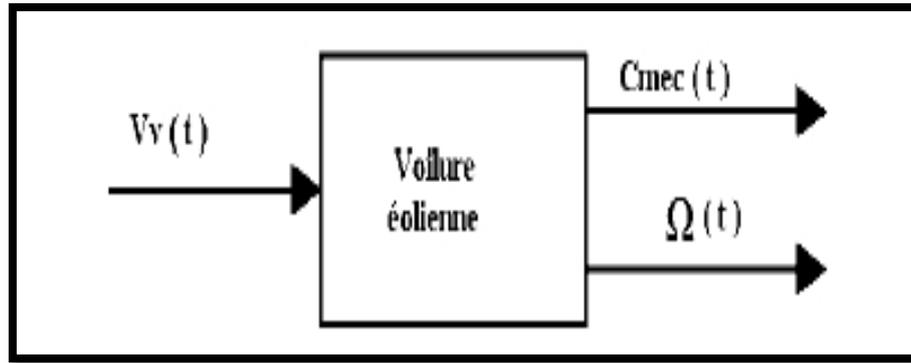


Figure II.11 : Modèle de la voilure.

Selon la caractéristique propre de la voilure $C_p(\lambda)$ donnée par l'équation suivante :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\tau \cdot S \cdot V_V^3} \quad (\text{II.35})$$

On peut calculer la puissance éolienne qui est donnée par l'équation ci-dessous :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (\text{II.36})$$

Le couple éolien est donné par l'équation suivante :

$$C_{eol} = C_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R \cdot S \cdot V_V^2}{\lambda} \quad (\text{II.37})$$

Dans notre travail, nous avons utilisé un modèle simplifié basé sur la connaissance de la densité de probabilité de Weibull et qui a donnée preuve de précision. Ce modèle suppose que la puissance moyenne produite par un aérogénérateur est estimée par la relation suivante et proposé par [53] :

$$P = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P(v) f(v) dv \quad (\text{II.38})$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, de la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et de la densité de probabilité correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par l'aérogénérateur.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.6.3. Modélisation du système de stockage (batterie au plomb)

Parmi les modèles des batteries, celui basé sur l'observation du phénomène physico-chimique de la charge et de la décharge du système de stockage. Ce modèle [55] est basé sur le schéma électrique. (Figure II.12), la batterie est alors décrite par seulement deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres : une source de tensions et sa résistance interne.

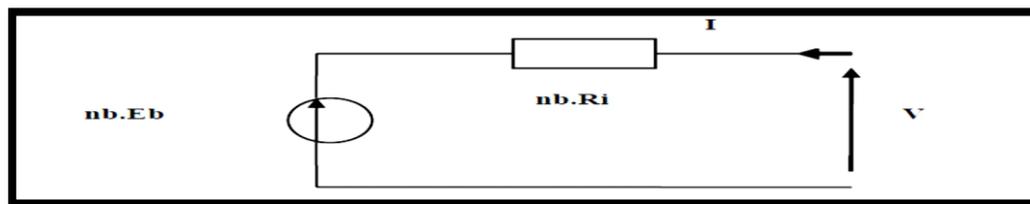


Figure II.12 : Schéma électrique équivalent de nb éléments de batteries en séries.

Soit U , la tension aux bornes de la batterie (Figure II.13) :

$$U = E_0 - K \cdot \frac{\int I_b \cdot dt}{Q_0} - R_b \cdot I_b \quad (\text{II.39})$$

Avec :

E_0 : Tension à vide de la batterie chargée (V);

K : Constante qui dépend de la batterie ;

R_b : Résistance interne de la batterie [Ω];

I_b : Courant de décharge (> 0) ;

Q_0 : Capacité de la batterie (Ah) ;

$-\frac{\int I_b \cdot dt}{Q_0}$: Indique l'état de décharge de la batterie.

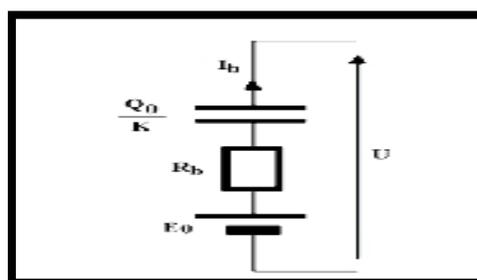


Figure II.13 : Modèle électrique de la batterie.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.6.4. Modélisation de la pompe haute pression (HP)

Les pompes centrifuges multi-étages ou multicellulaires conçues pour un fonctionnement à vitesse variable sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes d'osmose inverse. Elles permettent de transformer la vitesse de rotation du moteur asynchrone en un débit d'eau à haute pression capable de vaincre la pression opposée due au phénomène de l'osmose. Elles sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit [56].

II.6.4.1. Principe de fonctionnement et construction

Le principe consiste à actionner une roue à ailettes qui communique au fluide de l'énergie mécanique, transformée en énergie potentielle (représentée par la pression) et cinétique (représentée par le débit). Sur la figure II.14 sont représentés les principaux constituants d'une pompe centrifuge simple à une seule roue :

- ✓ le corps de pompe comportant les tubulures d'admission et de refoulement.
- ✓ la roue à ailette solidaire de l'arbre d'entraînement.

Une augmentation de la pression peut être obtenue par mise en série de plusieurs corps de pompes.

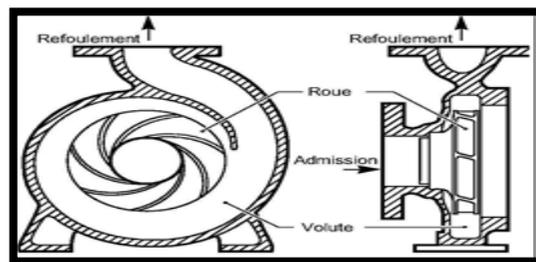


Figure II.14 : Les principaux constituants d'une pompe centrifuge [56].

II.6.4.2. Caractéristiques fondamentales de la pompe

La fonction de base d'une pompe est de faire circuler une certaine quantité de fluide et de lui communiquer une certaine pression. Les grandeurs significatives utilisées en pompage sont le débit, et la hauteur manométrique. Le débit (Q) représente le volume de fluide transporté par unité de temps, exprimé en m^3/s . La hauteur manométrique (H) représente la pression en un point donné du circuit, exprimée en hauteur de colonne du fluide transporté (en m). La relation entre hauteur manométrique et pression s'écrit comme suit :

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

$$P=\rho gH \quad (\text{II.40})$$

Tel que:

P : Pression (Pa) ;

ρ : Masse volumique du fluide (Kg/m^3) ;

g : Accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$) ;

H : Hauteur manométrique (m).

La hauteur manométrique Totale(HMT) d'une pompe représente le différentiel de Pression apporté au fluide par la pompe, entre l'entrée et la sortie, exprimé en hauteur de colonne du fluide transporté. La HMT varie en fonction du débit. La courbe représentant la HMT en fonction du débit est caractéristique de la pompe. Il existe une courbe de HMT pour chaque valeur de vitesse d'entraînement de la pompe.

La hauteur manométrique totale maximale(HMTmax) ou Hauteur de barbotage est la pression maximale que la pompe peut communiquer au fluide, à débit nul. Ceci correspond à la hauteur maximale de colonne de fluide que la pompe peut maintenir, Comme illustré sur la figure II.15.

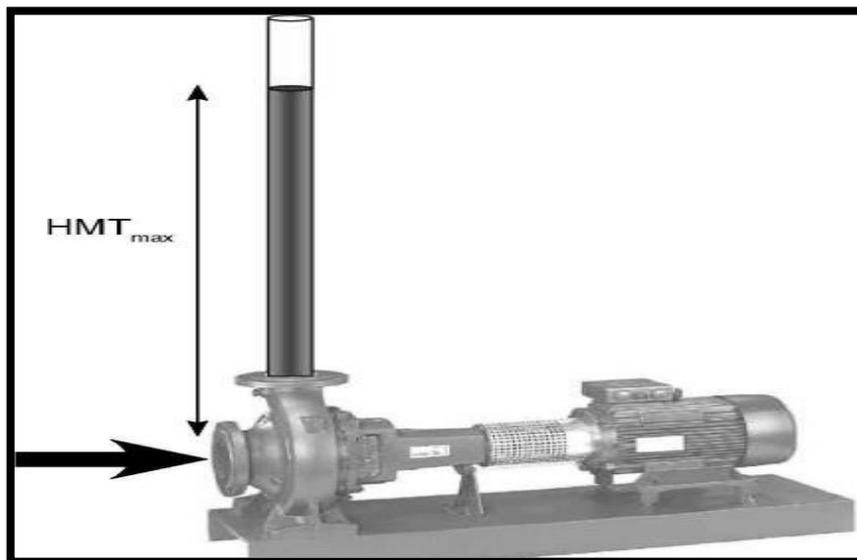


Figure II.15 : Hauteur manométrique totale maximale [56].

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

II.6.4.3. Caractéristique Hauteur manométrique –Débit : H(Q)

Les pompes sont généralement décrites par leurs caractéristiques H (Q). H (en mètre), est la charge hydraulique appliquée par le fluide sur la roue à aubes et Q (m³/s) est le débit de la pompe (Figure II.16). La relation reliant la pression au débit et la vitesse de rotation de la pompe est exprimée par la relation « Pleiderer et Peterman » [57,58], ainsi :

$$P=a\Omega^2+b\Omega Q+cQ^2 \quad (\text{II.41})$$

Tel que :

a et b : Paramètres de la pompe ;

c : Paramètre correspondant aux pertes de la pompe ;

Ω : Vitesse de rotation de l'arbre de la pompe (rd/s) ;

Q : Débit en m³ /s.

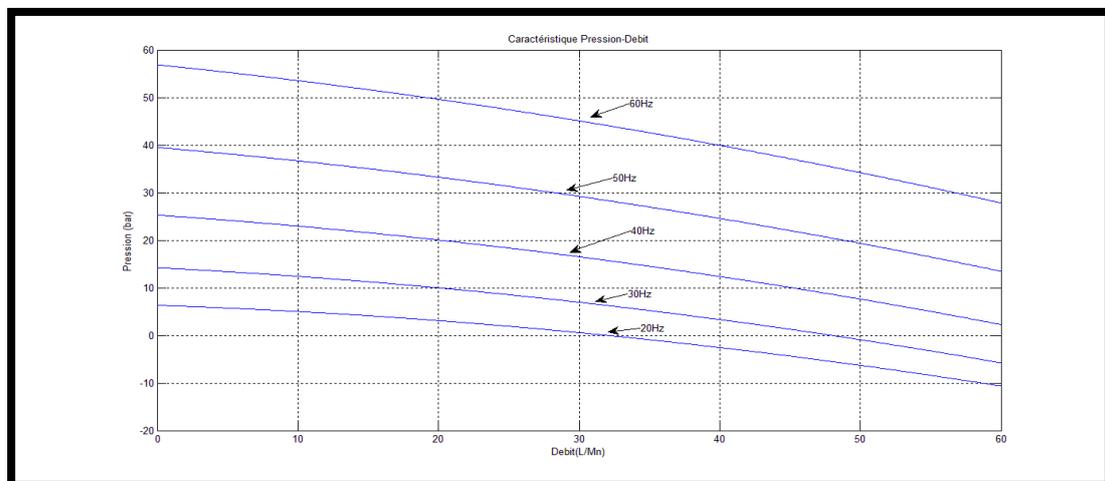


Figure II.16 : Courbe caractéristique Pression-débit de la pompe HP pour différentes fréquences [56].

II.6.4.4. Caractéristique du couple

Le couple de la pompe centrifuge est de forme quadratique .il s'écrit ainsi [57] :

$$T_r=a\Omega^2+bQ\Omega \quad (\text{II.42})$$

Où :

Q : Débit ;

T_r : Couple statique ;

Ω : vitesse de rotation de l'arbre de la pompe.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

La figure II.17 représente l'évolution du couple de la pompe en fonction de la vitesse de rotation.

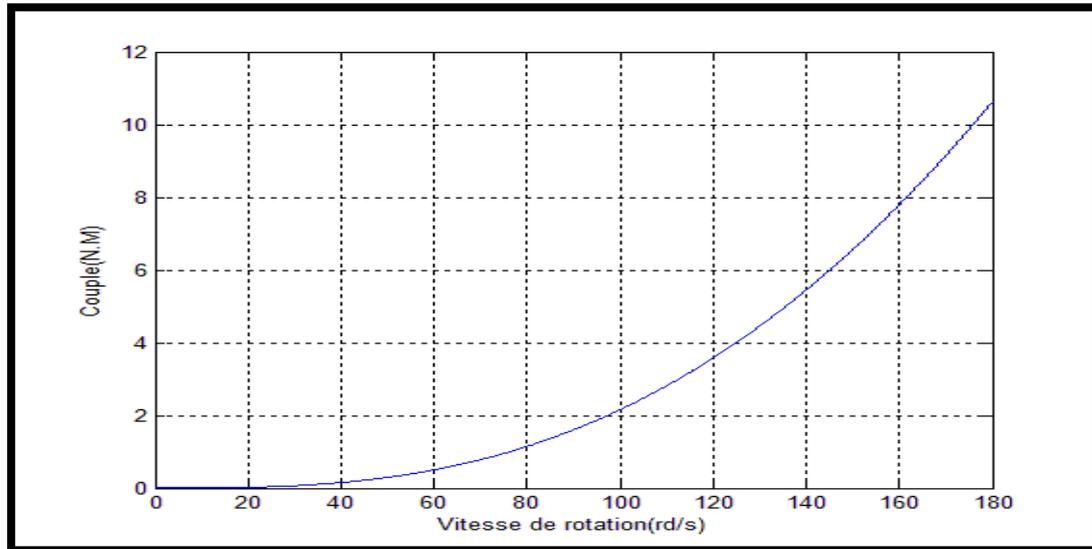


Figure II.17 : Caractéristique du couple résistant de la pompe [56].

II.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (SEH), consacré pour l'alimentation en énergie électrique de l'unité d'osmose inverse. Il combine deux systèmes très commercialisés actuellement dans le marché mondial de l'électricité d'origine renouvelable, qui sont en l'occurrence, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens, ainsi consolider par un système de stockage d'énergie (batteries).

Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans ces SEH ont été données, avec Les différents types d'architectures qui existent, et les outils de dimensionnement nécessaire pour modéliser Les différentes parties de ce système.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du SEH, doivent tenir compte des variations des ressources renouvelables, disponibles sur le site, pour optimiser le rendement de la station de l'eau de mer. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités de la zone d'étude. Cela fait l'objet d'une étude présentée dans le 3^{ème} chapitre.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

Références Bibliographiques

- [1]. E. MATHIOUKALIS, V. BELIOSSOTIS, E. DELYANIS, «Desalination by using alternative energy: Review and stat of the art», *Desalination* 203 (2007) 346-365.
- [2]. E. TZEN, «Wind and Wave Energy for Reverse Osmosis», *Seawater Desalination Green Energy and Technology* (2009) 213–245.
- [3]. J.L. CRUTCHER, J.R. WOOD, A.J. NORBEDO, A.B. CUMMINGS, J.P. DUFFY, «A stand-alone seawater desalting system powered by an 8 kW ribbon photovoltaic array», *Proc. 19th International Energy Society Congress, Brighton, 1981.*
- [4]. B.G. KEEPER, R.D. HEMBREE, F.C. SCHRACK, «Optimized matching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination», *Desalination* 54 (1985) 89–103.
- [5]. G. PETERSEN, S. FRIES, «Water desalination plant powered by wind energy in the Hallig Süderoog island (in German) », *Application of small wind energy plants in developing countries, 1985.*
- [6]. L. GARCIA-RODRIGUEZ, «Seawater desalination driven by renewable energies: a review», *Desalination* 143 (2002) 103–113.
- [7]. I.M.A. PERAL, A.C. GOMEZ, J.M. TRUJILLO, «IDM-Project: Results of one year of operation», *Proc. New Technologies for the Use of Renewable Energy Sources in Water Desalination, Athens, 1991.*
- [8]. F. PALMA, «Photovoltaic powered sea water desalination unit», *Proc. New technologies for the Use of Renewable Energy Sources in Water Desalination, Athens, 1991.*
- [9]. J. HUGGINS, J. DUNLOP, L. DEMETRIUSS, «Photovoltaic-powered reverse osmosis water desalination», *Proc. International Desalination Association (IDA) World Congress, Abu Dhabi, 5 (1995) 381–396.*
- [10]. D. WEINER, G. MERON, «Operational optimization of a photo-voltaic water pumping system for desalination application», *Proc. International Desalination Association (IDA) World Congress, Abu Dhabi, 5 (1995) 325–336.*
- [11]. M.S. MOHSEN, J.O. JABER, «A photovoltaic powered system for water desalination», *Desalination* 138 (2001) 129–136.
- [12]. D.HEROLD, A. NESKAKIS, «A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria », *Desalination* 137 (2001) 285–292.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

- [13]. A.L. MOVRA JOYCE, D. LOUREIRO, C. RODRIGUES, S. CASTRO, «Small reverse osmosis units using PV systems for water purification in rural places», *Desalination* 137 (2001) 39–44.
- [14]. Y. KUNCZYNSKI, A. KUNCZYNSKI, D. SCOTT, «Development and optimization of 1000-5000 GPD solar power SWRO», *Proc. International Desalination Association (IDA) World Congress, Bahamas, 2003, Paper no. BAH03-040.*
- [15]. M.THOMSON, D. INFIELD, «A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries», *Desalination*, No 153(2002), 1–8.
- [16]. G. PETERSEN, S. FRIES, J. MOHN, A. MULLER, «Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units description of two demonstration projects», *Desalination* 31 (1979) 501– 509.
- [17]. G. PETERSEN, S. FRIES, J. MOHN, A. MULLER, «Wind and solar powered reverse osmosis desalination- design, start up, operating experience», *Desalination* 39 (1981) 125–135.
- [18]. R. ROBINSON, G. Ho, K. MATHEW, «Development of a reliable low-cost reverse osmosis desalination unit for remote communities», *Desalination* 86 (1992) 9–26.
- [19]. W. GRAEF, «ROWEP Reverse Osmosis Wind Energy Program», *Proc. International Desalination Association (IDA) World Congress, Abu Dhabi, 5 (1995) 311–323.*
- [20]. H. EHMANN, A. WOBLEN, M. CENDAGORTA, «PRODESAL The development and pilot operation of the first wind powered re-verse osmosis sea water desalination plant», *Proc. 1996 European Union Wind Energy Conference, Göteborg, 1996.*
- [21]. K. TAHRI, «The prospects of fresh water supply for Tan-Tan City from non-conventional water resources», *Desalination*, 135 (2001) 43–50.
- [22]. L. GARCIA-RODRIGUEZ, V. ROMERO-TERNERO, C. GOMEZ-CAMACHO, «Economic analysis of wind-powered desalination», *Desalination* 137 (2001) 259–265.
- [23]. C.C.K. LIU, J.W. PARK, R. MIGITA, G. QIN, «Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system for Pacific islands», *Desalination* 150 (2002) 277–288.
- [24]. S. A. KERSHMAN, J. RHEINLANDER and H. GABLER, «Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya», *Desalination* 153 (2002) 17–23.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

- [25]. M.S. MIRANDA, D. INFELD, «A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries», *Desalination* 153 (2002) 9–16.
- [26]. P.C.M. CARVALHO, «Reverse osmosis plant powered by photovoltaic and wind energy in isolated operation», Dr.-Ing dissertation, University of Paderborn, Germany, 1997.
- [27]. D. WEINER, D. FISHER, E.J. MOSES, B. KATZ, G. MERON, «Operation experience of a solar and wind powered desalination demonstration plant», *Desalination* 137 (2001) 7–13.
- [28]. S. A. KERSHMAN, J. RHEINLANDER, T. NEUMANN, O. GOEBEL, «Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya-GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder», *Desalination* 183 (2005) 1–12.
- [29]. E.S. MOHAMED, G. PAPADAKIS, «Design, simulation and economic analysis of a standalone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaic's», *Desalination* 164 (2004) 87–97.
- [30]. E.S. MOHAMED, G. PAPADAKIS, E. MATHIOULAKIS, V. BELESSIOTIS, «An experimental comparative study of the technical and economic performance of a small reverse osmosis desalination system equipped with a hydraulic energy system», *Desalination* 194 (2006) 239– 250.
- [31]. M. FOLLEY, B. PENATE SUAREZ, T. WHITTEKER, «An autonomous wave-powered desalination system», *Desalination* 220 (2008) 412–421.
- [32]. A. ABBAS, «Simulation and analysis of an industrial water desalination plant », *Chemical engineering and processing* 44(2005) 999- 1004 , ELSEVIER.
- [33]. D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL, «Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel)», *Revue des Energies Renouvelables*, ICRES-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.
- [34]. M. ANGEL CID PASTOR, «Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïque Electronique», Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 2006.
- [35]. M. R. PATEL, «Wind and Solar Power Systems», U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
- [36]. Y. PANKOW, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque», Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de L'ENSAM ED 432, Lille, 2004.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

- [37]. N. OLEKSIY, «Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités», Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2005.
- [38]. B. BROUSSE, «Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique», Thèse Doctorat, Université de LIMOGES, 2004.
- [39]. T.MARKVART, A. MCEVOY, L. CASTANER, «Practical Handbook of Photovoltaic's: Fundamentals and Applications», Edition 1 - 30 October 2003 - EBook Kindle.
- [40]. J. ROYER, «LE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE», Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, 56 rue Saint-Pierre 3e étage, Québec (Québec) G1K 4A1 CANADA,
Site Internet : <http://www.iepf.org>.
- [41]. S. PETIBON, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [42]. Ministère de l'Énergie et des Mines (Algérie), «Guide des Energies Renouvelables», Edition 2002.
- [43]. F. POITIERS, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée aux réseaux)», Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [44]. V.ROGEZ, «Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseaux de distribution insulaire», Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 2004.
- [45]. S. EL AIMANI, «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension», Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 2004.
- [46]. Z. CHEN, F. BLAABJERG, «Wind Energy – The World's Fastest Growing Energy Source», IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3, (2006) 15–18.
- [47]. H. IBRAHIM, A. ILINCA, J. PERRON, «Solutions de stockage de l'énergie éolienne», Rapport interne, UQAR, UQAC, LREE, 01 Janvier 2006.
- [48]. M. LANDRY, Y. GAGNON, D. RICHARD, A. SAULNIER, «Technology Risks Associated with a Community Based Wind Energy Project: Wind Resource Assessment», Renewable Energy Congress X, Glasgow, Scotland, 19–25 Juillet 2008.

Chapitre II : Modélisation du système de dessalement à énergies solaire photovoltaïque –éolienne

- [49]. D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, «Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008.
- [50]. L. CHANG, «Systèmes de conversion de l'énergie éolienne», IEEE Canadian Review – Été 2002.
- [51]. L. MIGUEL, «Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée», Thèse de Doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, France, Février 2008.
- [52]. P. RIBEIRO, B. JOHNSON, M. CROW, A. ARSOY, Y. LIU, «Energy storage systems for advanced power applications», Proc. IEEE, 12 (2001) 1744 –56.
- [53]. D.SAHEB-KOUSSA, M. BELHAMEL et K.BENFERHAT, «Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien- photovoltaïque- diesel) de production d'électricité sans interruption», Afrique SCIENCE, Vol. 05 N°1, pp. 23 – 38, ISSN 1813-548X, 2009.
- [54]. D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, «Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel», Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4, pp. 623 – 633, 2008.
- [55]. O.GERGAUD, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un Accumulateur». Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [56]. O. CHARROUF, «Optimisation d'Un Système De Dessalement Renouvelable», Mémoire de magister en Electrotechnique Option : Energies Renouvelables, Université Mohamed Khider – Biskra, p 38-42, 2012.
- [57]. M.TURKI, A.BEN RHOUMA, J. BELHADJ, «Experimental characterization of a Reverse Osmosis desalination process fed by hybrid power source», 2009, 6th Multi-conference on systems, Signals and Devices; IEEE.
- [58]. A. BETKA and A. MOUSSI, «Performance optimization of a photovoltaic induction motor pumping system», Renewable energy, vol 29, 2167– 2181, 2004.

Chapitre III :

Présentation de la zone d'étude

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.1. Introduction

Vue l'insuffisance des ressources en eau conventionnelles et la croissance démographique induisant des besoins en eau potable en constantes croissance, l'Algérie a retenue comme alternatives le recours au dessalement d'eau de mer, car il réduit de manière durable les pénuries d'eau causé par plus de la moitié de la population qui résident sur la longue bande littorale de 1200km, théâtre, d'un déficit chronique en eau potable.

En effet, L'Algérie possède des ressources considérables en eaux salines (eau de mer et eaux saumâtres), et aussi elle dispose des gisements solaires et éoliens importants, donc pour bénéficier de cette richesse inexploitable, l'Algérie a dû réaliser des investissements extrêmement lourds tels que les grande station de dessalement d'eau de mer en l'occurrence celle de Honaïne à Tlemcen avec sa capacité de 200.000 m³, afin de satisfaire des besoins en eau potables et industrielles des grandes agglomérations.

D'autre part, la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie vise l'installation de plus de 22000 MW de capacités renouvelables, dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande intérieure en électricité et 10000 MW seront destinés à l'exploitation. D'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité allouée à la consommation nationale devraient être d'origine renouvelable. Pour atteindre cet objectif, plusieurs projets sont à développer et à réaliser dans ce domaine.

Dans ce contexte, ce troisième chapitre, décrit et présent la grande station de dessalement de Honaïne, en faisant exposé tous ces besoins techniques et économique, afin de ressortir une optimale variante qui donne une estimative sur son alimentation énergétique en électricité d'origine renouvelable solaire photovoltaïque-éolien.

III.2. Choix de la zone d'étude

Notre choix s'est porté sur la station de dessalement de l'eau de mer à Honaïne, au nord-est de la ville de Tlemcen, cela pour les raisons suivantes :

- La réalisation de la station fait partie intégrante de la stratégie de développement des ressources d'eau en Algérie. Elle fournit 200.000 m³/j d'eau pour subvenir aux besoins de la région de Tlemcen et ces environs.
- Optimisation de la gestion de l'eau potable des barrages au profit de l'agriculture.
- Faible cout de production d'eau par rapport aux autres procédés.
- L'usine utilise la technique de l'osmose inverse, en raison de sa grande efficacité, de sa fiabilité et e la qualité de l'eau produit.

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

- La technologie utilisée est moins énergivore par rapport aux autres technologies de dessalement de l'eau de mer.
- La station de Honaïne se trouve dans une situation idéale pour les divers raccordements et accès : réseau électrique, assainissement, rejets, captage, réseau de distribution.
- L'usine est exploitée conformément aux normes actuelles en matière de pollution et de rejet. En effet il n'existe pas de rejets atmosphériques engendrés par l'usine.

III.3. Situation géographique

La zone d'étude est localisée sur la côte méditerranéenne d'Algérie, dans la partie nord-orientale de la wilaya de Tlemcen, à la daïra de Honaïne, au niveau de la cote de Teffassout. Les données géographiques de la région sont représentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Données géographiques de la station d'étude [1].

Station	Wilaya	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Honaïne	Tlemcen	35° 18' N	1° 65' W	39

III.4. Potentiel solaire

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde (Figures III.1 et III.2). La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national (Tableau III.2), soit près de $1700 KWh / m^2 / an$ au Nord et $2650 KWh / m^2 / an$ au sud du pays [2].

Tableau III.2 : Potentiel solaire en Algérie [2].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

Énergie moyenne reçue (KWh / m ² / an)	1700	1900	2650
--	------	------	------

Pour la zone d'étude, l'irradiation solaire globale de Honaïne est donnée par la valeur compris dans l'intervalle de [6000 6400] Wh/m², ce qui représente une durée d'insolation de [8-8,5] heure par jour.

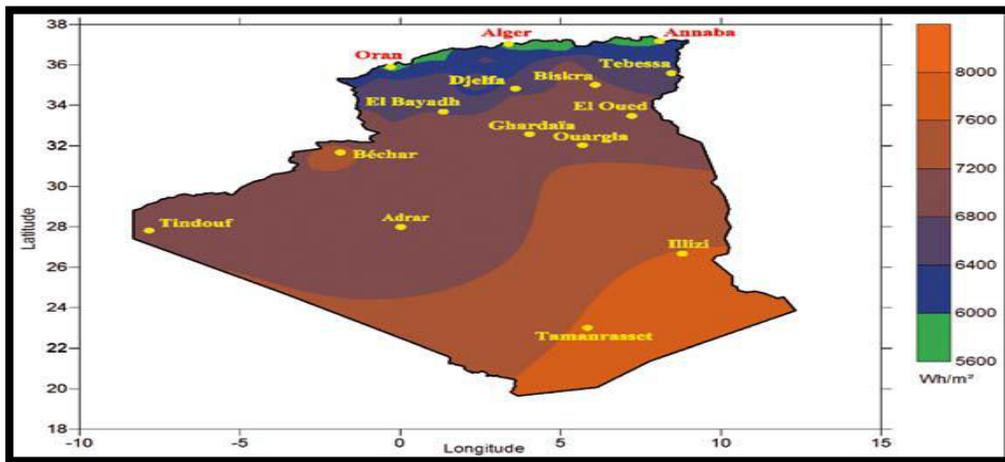


Figure III.1 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale inclinée à la latitude du lieu Période 1992-2002[3].

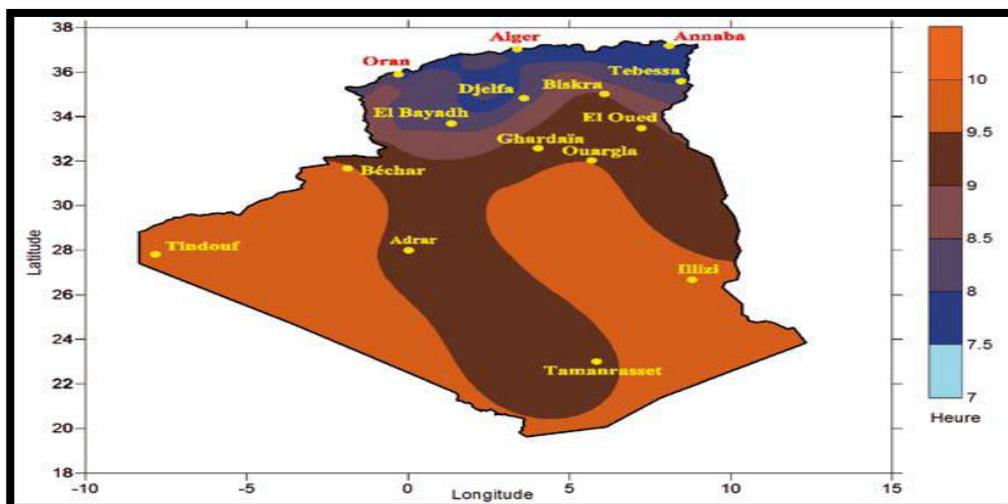


Figure III.2 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée (SS) Période 1992-2002[3].

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.5. Potentiel éolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre (Figure III.3). Ceci est principalement due à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes.

Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar[4].

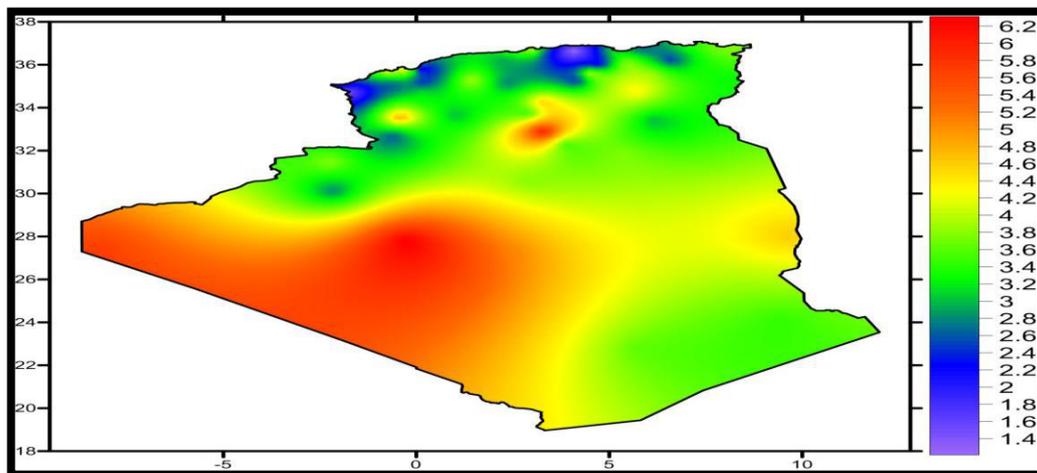


Figure III.3 :Carte annuelle des vents à 10m du sol (m/s)[4].

Concernant la zone d'étude, on remarque globalement que la vitesse moyenne du vent est peu élevée et représente un intervalle compris entre [2-2,2] m/s.

III.6. Données météorologiques

Les ressources locales (irradiation solaire et vitesse du vent) sur une année de référence, utilisés pour réaliser le dimensionnement du système hybride photovoltaïque-éolien sont disponibles dans la base de données fournie avec le logiciel Météonorme[Annexe 1].

L'inclinaison des panneaux photovoltaïques est fixée de telle sorte que l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le panneau doit être plus proche à la normale de

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

panneau, ceci peut être obtenu avec une inclinaison très proche à la latitude du lieu considéré pour une énergie totale maximale reçue pendant l'année qui est donnée comme suite [5]:

$$\beta = L + \delta/2 \quad (\text{III.1})$$

➤ Pour la région de Honaïne: $\beta = 35,18 + \frac{23,45}{2} = 46,90^\circ$.

On prend un angle d'inclinaison $\beta = 47^\circ$.

III.7. Description de la station de la ville de Honaïne (Tlemcen)

Située à mi-distance entre Ghazaouet et Béni-Saf, la commune de "Honaïne» se trouve à 69 kilomètres au nord de Tlemcen chef-lieu de wilaya. La station de dessalement d'eau de mer a été réalisée en 2011 à la plage de Tafsout (Honaïne), elle est opérationnelle depuis juillet 2012.

Cette usine (la 2ème en wilaya après celle de ("Souk Tleta"))s'étend sur une superficie de 78 ha, et d'une capacité de 200 000 m³/jour qui est produite par la filtration à sable/osmose inverse. Cette production assure l'eau potable pour 23 communes ainsi que les agglomérations urbaines du grand Tlemcen (Tlemcen, Mansourah et Chetouane), soit une population d'environ 555.000 habitants.

Cette importante station (Figure III.4) est gérée par des actionnaires qui sont Algerian Energy compagny (AEC) à hauteur de 49 %, et le groupement espagnol Geïda à hauteur de 51 %. Les eaux produites sont ensuite transférées à l'algérienne des eaux (ADE)[6].



Figure III.4 :Station de dessalement de Honaïne(vue de haut)[7].

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

La station de dessalement de Honaine comporte deux principaux systèmes dont l'un est réservé à la mobilisation et au pompage de l'eau de mer et l'autre pour le rejet de la saumure (Figure III.5).

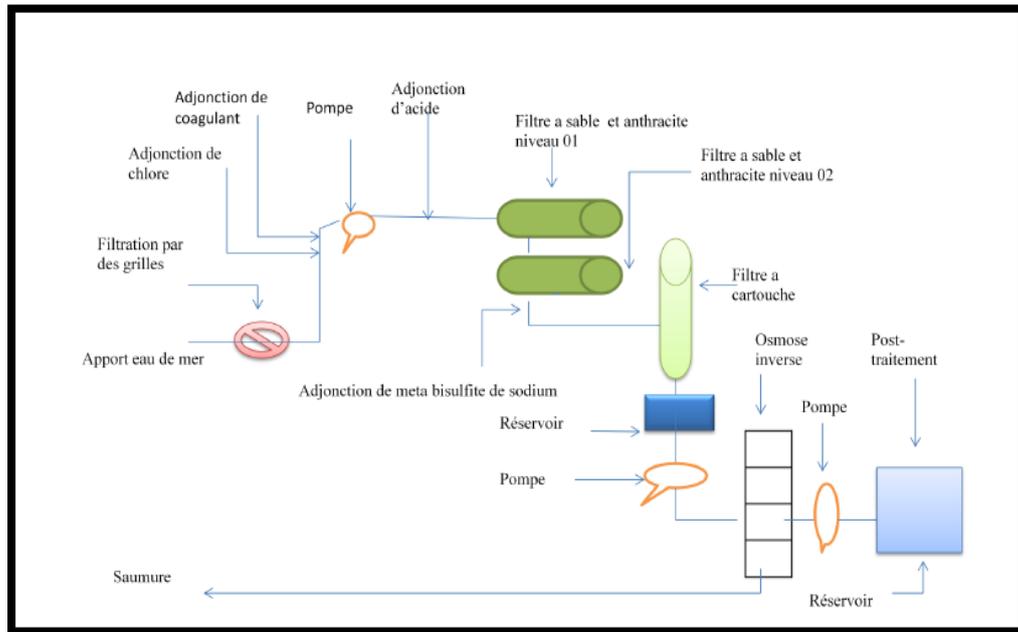


Figure III.5 : Diagramme de processus de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse au niveau de la station de dessalement de l'eau de mer – Honaine[8].

Le système de mobilisation de l'eau de mer, renforcé par une conduite sous-marine allant jusqu'à 1.500 m dans la mer et une station de pompage à proximité de la ligne de rivage, permet de pomper l'eau de la mer vers le site de la station de dessalement, qui se trouve environ 500 m de la côte. Le système de rejet de la saumure vers la mer est consolidé par un émissaire marin pénétrant jusqu'à 1000 m dans la mer, dans le but d'assurer une meilleure dilution et atténuer en conséquence les impacts environnementaux [6].

Le principe de l'opération de dessalement consiste à favoriser le passage d'une salinité de 40 g/l, celle de l'eau de la mer, à moins de 0,5 g/l, soit de l'eau complètement dessalée. Cette eau sera partiellement (reminéralisée) avec l'ajout d'une faible proportion d'eau saumâtre (riche en oligo-éléments), pour produire finalement une eau potable dont la salinité est située à environ 1,5 g/l conformément aux normes de l'organisation mondiale de la Santé (OMS) [9].

Les principales caractéristiques de fonctionnement de la station sont résumées dans le tableau suivant :

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

Tableau III.3 : Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaïne [10].

Désignation	Unités	Valeurs
Production Continue Prévues	m ³ /jour	203 .000
Nombre total d'unité installée	U	10
Température de travail minimum prévue	0 °C	18
Température de travail maximum prévue	0 °C	24
Type de membrane		A enroulement en spirale
Matériau de la couche active		Polyamide aromatique
Rejet minimum en sel	%	99.45
Nombre de membrane par cuve sous pression	U	07
Nombre d'étages	U	01
Débit spécifique maximum	l/m ² /h	13.96
Pression d'entrée dans les membranes	bars	62
Pression de sortie des membranes	bars	64.5
Pas N°1		
Nombre de membrane dans le premier étage /unité	U	1820
Nombre de Cuve sous pression dans le premier étage /unité	U	260
Modèle de membrane		SWC5
Châssis		
Nombre de tubes de pression /Colonne	U	12
Nombre de colonne	U	24
Nombre de vides pour tube de pression en réserve	U	28
Tuyaux de distribution dans le châssis		
Nombre de collecteurs verticaux de distribution	U	2

La Station est constituée de 10 lignes (ou Racks) ayant chacune une production nominale de 20.300 m³/jour. Le facteur de conversion de la station est de 47 % [6].

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.8. Description des étapes de traitement

Le processus de traitement au niveau de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine (Figure III.6) se décompose de quatre phases principales :

- 1- Phase de captation (prise d'eau de mer) et de pompage ;
- 2- Phase de filtration (prétraitement) ;
- 3- Phase d'osmose inverse (châssis OI) ;
- 4- Phase de reminéralisations (post traitement).

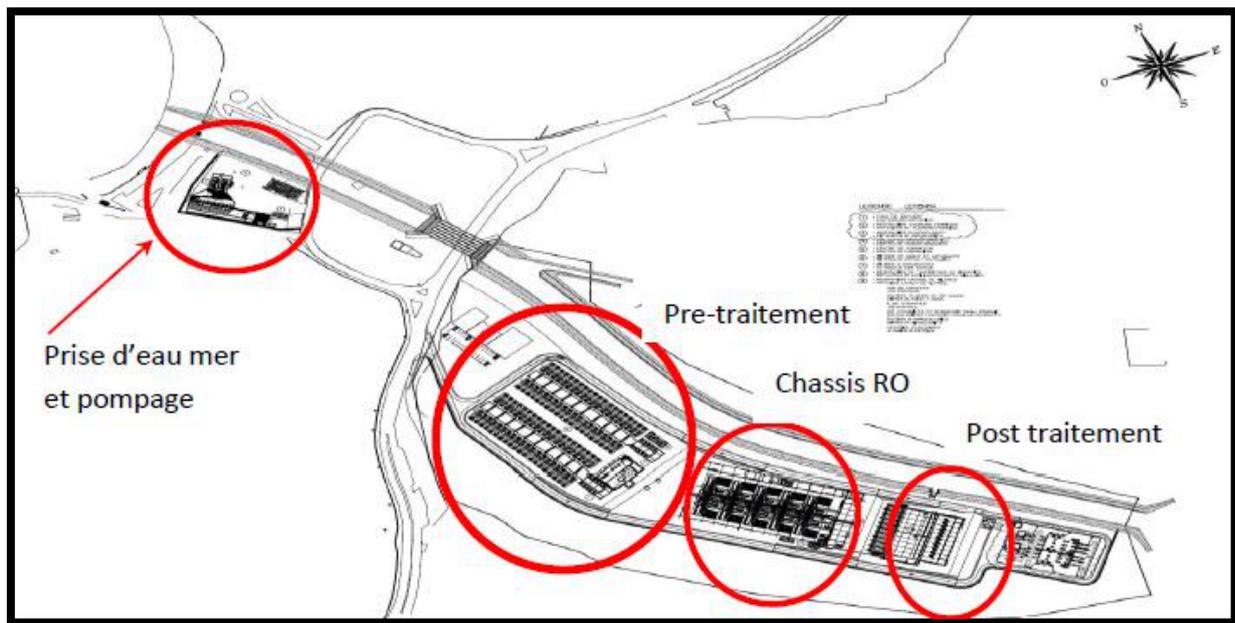


Figure III.6 : Schéma des étapes de traitement à la station de dessalement de Honaine[10].

III.8.1. Phase de Captation d'eau de mer et de pompage

Cette phase a pour objectif de capter l'eau et d'éliminer les particules grossières et de préparer l'eau pour la phase de filtration. Le captage d'eau de mer s'effectue par une prise directe d'eau de la méditerranée par une tour de captage émergée située à une distance de 1200 m à partir de la côte. Faite en béton armé de 9 mètres de hauteur par rapport au fond marin, cette tour de forme hexagonale, est dotée de six fenêtres pour l'entrée de l'eau de mer à une vitesse inférieure à 0,3 m/s. Ces fenêtres sont situées à 7 m au-dessus du fond. La tour de captage est dotée d'un système de pré filtration comprenant des grilles grossières et des tamis auto nettoyants.

La colonne de captage a été conçue afin de capter l'eau brute nécessaire pour une production de 200.000 m³/jour. L'eau de mer est envoyée à travers l'émissaire de captage au

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

réservoir d'eau de mer où elle est préfiltrée des éléments grossiers à travers des grilles grossières et des tamis autonettoyants. Le débit total du groupe de pompage de la tour de captage est de 18.934 m³/h. Il est légèrement supérieur au débit de l'usine car il doit assurer également l'eau nécessaire au lavage des tamis [11].

Le groupe de pompage d'eau de mer est composé de 11 pompes (10+1), chacune d'une capacité de pompage de 1.893 m³/h. Les onze pompes d'eau de mer sont installées en parallèle, l'une d'elles étant de réserve. Cette pompe de réserve peut être utilisée de façon intermittente lors de l'étape de lavage de la première et seconde étape de filtration, si c'est nécessaire. Les pompes refoulent l'eau de mer depuis le réservoir jusqu'aux pompes à haute pression. Les pompes d'eau de mer (Figure III.7) sont de type à aspiration à vide, il est donc installé un groupe de vide pour l'amorçage de ces pompes [6].



Figure III.7 : Le bloc des pompes de captation au niveau de la station de Honaine[10].

III.8.2. Phase de filtration (prétraitement de l'eau)

C'est la deuxième étape du processus de dessalement dont l'eau qui va se dessaler contient une série de composantes organiques qui doivent être contrôlés pour qu'elle puisse être appliquée directement à des éléments aussi sensibles que les membranes sans qu'elles en soient détériorées. Le prétraitement de l'eau de mer est une étape essentielle. Elle consiste le plus souvent à débarrasser de l'eau : des solides en suspension, des matières organiques, des bactéries, des algues, etc.....

Cette phase est aussi nécessaire pour éviter :

- L'incrustation
- L'encrassement
- Et l'attaque bactérienne des membranes d'osmose

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

L'eau doit donc être conditionnée en la soumettant à une série de traitement qui répond globalement à deux types :

- Physique, destinés à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et les matières organiques.
- Chimique, pour éviter des attaques à la membrane ou des précipités de sels sur cette dernières [11].

III.8.2.1. Prétraitement chimique

III.8.2.1.a. Dosage d'Hypochlorite de sodium

L'utilisation de différents dérivés chlorés, normalement l'hypochlorite sodique (NaOCl), comme produits désinfectants pour combattre le salissement biologique des membranes est une pratique habituelle dans les usines d'osmose inverse. La base du processus de désinfection est la formation d'acide hypochloreux (OHCL) qui possède une action biocide. Il ne contrôle pas seulement le processus de croissance des bactéries en pénétrant dans les cellules de paroi et en les tuant mais il évite aussi la production des enzymes qui nécessaires à la prolifération débits microorganisme [6].

Il a été prévu d'effectuer une injection d'hypochlorite de sodium au niveau de l'aspiration des pompes d'eau de mer afin de pouvoir travailler avec un traitement de choc ou en continu. Cette injection s'effectue à l'aide de cinq pompes doseuses (4+1) de débit nominal d'environ 200 l/h chacune. L'une des pompes servant de réserve. Deux réservoirs d'hypochlorite de sodium de 140 m³ de capacité chacun sont ainsi installés (Figure III.8). Pour le remplissage des réservoirs, une pompe de transfert de 33 m³/h de débit est installée. L'ajout du produit s'effectue au sein du refoulement de l'eau de mer[6].



Figure III.8 : Citerne de stockage d'hypochlorite de Sodium[10].

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.8.2.1.b. Dosage du chlorure ferrique

Un dosage de chlorure ferrique est effectué pour l'élimination de la matière en suspension et des colloïdes présents au sein de l'eau de mer et ceci pour atteindre un SDI < 4 à l'entrée des membranes [6].

L'ajout du produit se fait en continu après le refoulement des pompes d'eau de mer. L'injection du produit s'effectue à l'aide de 5 pompes de dosage (4+1) pompes, l'une d'elles étant de réserve). Le débit nominal de chacune d'elle est de 100 l/h. Une pompe centrifuge de 33 m³/h de débit est installée pour le transvasement du chlorure ferrique depuis le moyen de transport jusqu'aux réservoirs de stockage. Ce dernier est assuré par deux réservoirs d'accumulation (Figure III.9) de 70 m³ de capacité chacun qui sont ainsi disposés [6].



Figure III.9 : Citerne de stockage de chlorure ferrique [10].

III.8.2.1.c. Dosage du métabisulfite de sodium

Un équipement de dosage de métabisulfite de sodium est installé au niveau de la station dans le but de réduire le chlore résiduel au sein de l'eau de mer avant les membranes. Le métabisulfite de sodium est une substance qui réagit au chlore et au reste des oxydants contenus dans l'eau de mer tels que l'oxygène dissout, en évitant qu'ils ne parviennent aux membranes et qu'ils ne les détériorent. Ce dosage est utilisé en cas de dosage de l'hypochlorite en continu [6].

Cinq pompes de dosage sont ainsi prévues dont l'une d'elles étant de réserve. L'ajout du produit s'effectue avant la première étape de filtration et avant les filtres à cartouche afin de permettre une durée maximale de contact possible. Pour le stockage de ce produit, deux citernes d'accumulation de 13 m³ de capacité chacune sont ainsi installées [6].

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.8.2.1.d. Dosage du dispersant

Afin d'éviter la précipitation des sels de sulfate de calcium, sulfate de strontium, fluorure de calcium et autres sels, un dosage de dispersant est réalisé. L'équipement est composé de deux réservoirs d'accumulation dissolution de 10 m³ de capacité chacun. Cinq pompes de dosage sont installées dont l'une d'elles étant de réserve. L'ajout du produit se fait en ligne et avant les filtres à cartouche [6].

III.8.2.2. Prétraitement physique

Ce traitement est destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique. Cette opération comporte :

III.8.2.2.a. L'ébauchage

L'ébauchage a deux objectifs :

- Protéger la station de l'arrivée possible et intempestive de grands objets capables de provoquer des obstructions dans les différentes unités de l'installation.
- Séparer et évacuer facilement les matières volumineuses entraînées par l'eau brute qui pourrait diminuer l'efficacité des traitements suivants ou compliquer leur réalisation [11].

L'opération peut être plus ou moins efficace selon la séparation entre les barreaux des grilles.

On peut distinguer :

- Ebauchage fin, avec une séparation de 3 à 10 mm,
- Ebauchage moyen, avec une séparation de 50 à 25 mm,
- Pré-ébauchage, avec une séparation de 50 à 100 mm[11].

Les grilles mécaniques sont protégées par une pré-grille aux barreaux plus espacés (séparation de 50 à 100 mm), prévue, généralement, pour un nettoyage manuel mais qui devra être également automatique dans le cas des installations importantes ou si l'eau brute arrive chargée de grosses matières [11].

❖ Grilles manuelles

Elles sont constituées de barreaux droits, en acier, parfois verticaux et parfois inclinés à un angle de 60° à 80° sur le horizontale [11].

❖ Grilles mécaniques de nettoyage du côté de l'arrivée

Des grilles de nettoyage alternative : la zone grillagée est faite avec des barreaux de section rectangulaire ou trapézoïdal (qui réduit le risque d'obstruction des matières solides), et généralement inclinée environ 80 sur l'horizontal se détenant un peu au-dessus du niveau liquide maximal et se prolongeant par un panneau.

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

Des grilles de nettoyage continu : ce type de grille s'utilise dans un ébauchage fin et il doit être employé avec de l'eau peu chargée en grosses matières (ou bien qu'elle ait été soumise au préalable à un ébauchage moyen [11].

❖ Des grilles mécaniques et nettoyage du côté de la sortie

Ce type de grille s'utilise généralement avec des eaux résiduelles et elle est capable d'éliminer de grandes quantités de matières solides à l'aide de petits râteliers peignes qui bougent grâce à un mécanisme de chaînes interminables montant de l'eau en bas du champ de grille. Le champ de grille, vertical ou incliné (60° à 80° sur l'horizontal)[11].

III.8.2.2.b. La Filtration

La filtration consiste à faire passer l'eau de mer à travers des filtres. L'eau salée entre par la partie supérieure du filtre et descend à travers le lit filtrant (Figure III.10). Le filtrage de l'eau se réalise au fur et à mesure que les particules solides sont absorbées tout au long du lit filtrant. Quand l'eau arrive à la partie inférieure, elle est recueillie dans un collecteur de sortie. Les particules solides sont retenues dans le lit et la saleté retenue augmente la perte de charge du filtre [11].

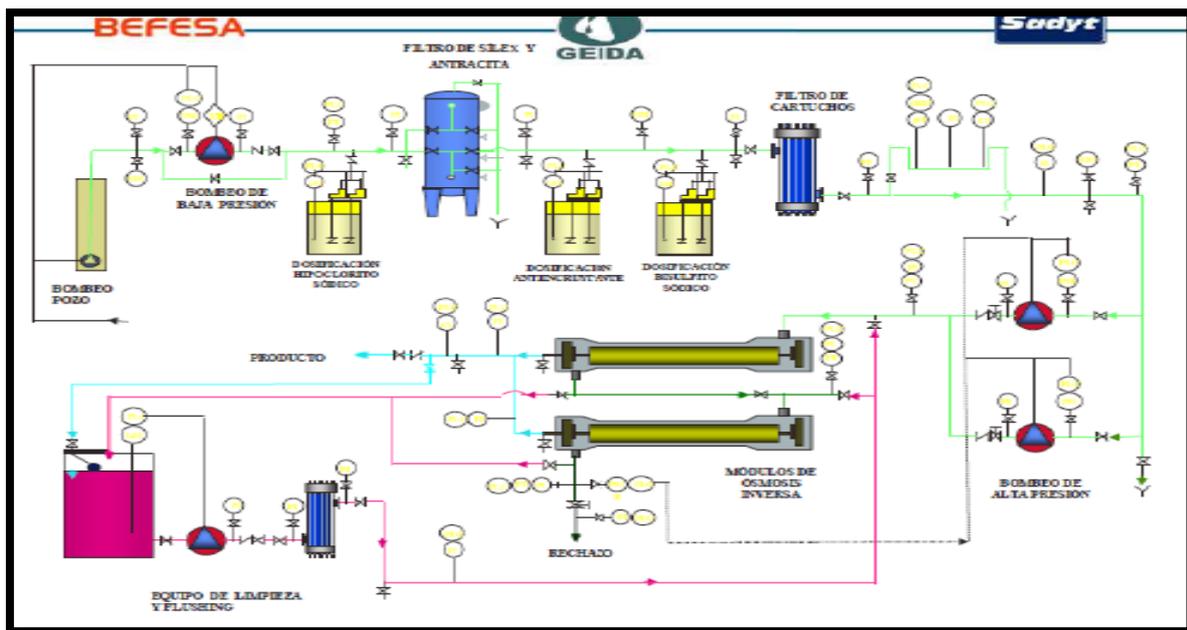


Figure III.10 :Schéma de l'étape de filtration[10].

La filtration de l'eau s'effectue sur différents types de filtres qui sont :

- Un système de filtre à sable, anthracite et gravier ;
- Un système de filtre à cartouches[6].

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

a) Système de filtration à sable et anthracite : Ce système est constitué de 80 filtres répartis en 48 pour la première phase et 32 pour la seconde phase. Chaque filtre à une surface active de filtration de 40,31 m², une hauteur de 11 m et un diamètre de 3.7 m. Chaque filtre héberge en son intérieur une plaque support équipée des buses correspondantes, plaque sur laquelle est situé le lit filtrant (Figure III.11).

La disposition des filtres est cylindrique horizontale avec des fonds de type Korboggen. Les filtres sont de 3,7 m. de diamètre et de 11 m de longueur cylindrique. La vitesse de filtration en fonctionnement normal lors de la première étape est de 8,8 m/h et lors de la seconde étape de 13,2 m/h. Les filtres sont équipés de regards de visite nécessaire en vue de leur inspection et de leur maintenance. Ils comportent également des drainages, ainsi que l'instrumentation correspondante, et le jeu de vannes automatiques nécessaires pour effectuer les opérations de lavage et de mise en service d'une façon totalement automatique [11].



Figure III.11 : Filtres à sables et anthracite (Station de Dessalement-Honaïne) [8].

Lors de la première phase de filtration, il est installé :

- Dans la couche supérieure : 600 mm de hauteur de lit d'anthracite d'une taille effective de 0,4-1,6 mm et avec 1,3 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche intermédiaire : 400 mm de hauteur de lit de sable d'une taille effective de 0,4-0,8 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante : 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 1,4- 2,5 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité et

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

- Dans la couche inférieure : 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 4,0-8,0 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité.

Lors de la seconde phase de filtration, il est installé :

- Dans la couche supérieure : 700 mm de hauteur de lit de sable d'une taille effective de 0,4 - 0,8 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante : 200 mm de hauteur de lit de grenat d'une taille effective de 0,3 - 0,6 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante : 100 mm de hauteur de lit de grenat d'une taille effective de 1,4 - 2,5 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante : 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 4 – 8 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité et
- Dans la couche inférieure : 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 8 -16 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité [11].

* **Lavage des filtres :** Quand la perte de charge dans le filtre augmente, on doit procéder à son lavage. Ce nettoyage se réalise par inversion du flux d'eau, en la faisant circuler de bas en haut (contre-lavage). Le lavage s'effectue avec 3 pompes et 2 soufflantes dont une en réserve avec de la saumure.

Avec le contre-lavage, l'eau entraîne la saleté accumulée dans le filtre. L'eau, chargée de crasse, sort à travers la vanne de drainage vers l'extérieur. Le processus de nettoyage peut s'automatiser par le biais des vannes de contre-lavage et celui programmé de lavage de filtres. On laisse le filtre complètement vide d'eau quand il ne va pas être utilisé pendant de longues périodes de temps [6].

b) Filtre à cartouche :

La filtration par cartouches est la technique de filtration la plus conseillée pour les applications dont les exigences en ce qui concerne la qualité et la sécurité sont les plus élevées. On les utilise dans les installations pour pouvoir garantir un niveau de filtration de microns minimal exigé par le fabricant de membranes. Les cartouches sont formées d'une âme et d'un essieu creux, avec des perforations latérales, sur lequel s'enroule un fil qui est celui qui garantit la taille de pore conforme aux caractéristiques de séparation du filtre (Figure III.12).

Les cartouches filtrants sont logés dans des porte-cartouches spéciaux, fabriqués en différentes matières selon l'application (acier inox. 316, acier au carbone, polyéthylène, etc.), avec différentes finitions de fabrication (poli, poncé, époxy, etc.) et de différentes tailles

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

(selon le débit à traiter). Au contraire des filtres à sable et anthracite, les filtres à cartouche ne se nettoient pas mais on remplace périodiquement les cartouches filtrant[11].



Figure III.12 : Filtres à cartouches (microfiltration) au niveau de la station (Station de Dessalement- Honaine) [10].

L'eau filtrée des filtres à pression est envoyée au processus de microfiltration par les filtres à cartouche. Il est installé à la station un point de dosage de métabisulfite de sodium et de dispersant avant l'entrée de l'eau filtrée aux filtres à cartouche. Les filtres à cartouche sont équipés de cartouches de polypropylène de filtration en profondeur avec un seuil de séparation de 15 microns absolus et une efficacité dans le brassage de particules de 99,6 %.

Avant et après les filtres à cartouche, des prélèvements d'échantillon sont installés pour la mesure du SDI de l'eau afin de déterminer l'efficacité de la filtration ainsi que la qualité de l'eau avant son entrée au sein des membranes. Le changement de cartouches des filtres se fait manuellement [11].

III.8.3. Phase d'osmose inverse

Bâtis de membranes, pompes à haute pression, pompe de recirculation et système d'échange de pression :

La phase d'osmose inverse est la partie principale de la station (Figure III.13), Elle est constituée par 10 lignes dénommées Rack. Chaque ligne est composée de :

- 1- Châssis à membranes.
- 2- Une pompe à haute pression.
- 3- Pompe de recirculation.

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

4- Système d'Echange de Pression.

La capacité de production nominale de chacune unité est de 20300 m³/jour. Chaque unité comprend 222 modules à 7 éléments du type SWC5 Max de Hydranautics [6].



Figure III.13 : Bloc d'osmose inverse (Station de Dessalement- Honaïne)[10].

Les lignes de traitement lors du déplacement sont effectuées au niveau de l'aspiration des pompes à haute pression et de l'entrée des systèmes d'échange de pression [6].

III.8.4. Phase de reminéralisation de l'eau (Post-traitement)

L'eau osmosée provenant des bâtis des membranes est traitée avec de l'anhydride carbonique (CO₂) et des tours de calcite. Le CO₂ est emmagasiné sous forme liquide dans des tanks isolés, à -20 °C. À partir d'un tank, le CO₂ est vaporisé par quatre évaporateurs électriques. Deux pompes de 100 m³/h effectuent une aspiration du collecteur d'eau du perméat, à la sortie des racks d'osmose inverse. Les pompes refoulent l'eau à travers des réservoirs de mélange, dans les réservoirs de mélange de CO₂ vaporisé. Après ajustement du pH de l'eau avec du CO₂, l'eau est amenée à les colonnes de calcites [6].

La composition de la calcite est du carbonate de calcite. Dans la station de dessalement de Honaïne, il est installé un total de dix (10) colonnes de calcites. À l'intérieur de chaque colonne, il y'a un faux fond avec des buses de distribution, sur lequel est disposé le lit de calcites d'une hauteur de 3 m. En passant par le lit de calcites, l'eau est automatiquement équilibrée et atteint un indice de Langelier $I_L = 0$. Les colonnes de calcites sont

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

atmosphériques. L'eau entre dans les colonnes par la partie inférieure de celles-ci et sorte par la partie supérieure [6].

Afin d'ajuster l'indice de Langelier à plus de 0, il faut effectuer un dosage d'hydroxyde de sodium (soude). La soude est dosée après le passage de l'eau osmosée à travers les colonnes de calcites. Pour assurer le mélange d'hydroxyde de sodium avec de l'eau, le dosage de l'hydroxyde de sodium est effectué dans l'aspiration des pompes d'eau produit.

Deux réservoirs de soude de 8 m³ de capacité chacun sont ainsi installés. L'injection de soude est effectuée au moyen de 5 pompes de dosage, l'une d'elles étant de réserve. Le remplissage des réservoirs se fait par une pompe de transfert de 33 m³/h de débit [6]. Pour le dosage de l'hypochlorite, deux réservoirs de 30 m³ de capacité chacun sont prévus. L'injection de l'hypochlorite est effectuée au moyen de (2+1) pompe de dosage, l'une d'elles étant de réserve. Pour le remplissage des réservoirs, une pompe de transfert de 33m³/h de débit est installée. L'ajout du produit s'effectue dans l'aspiration des pompes d'eau produite [6].

III.9. Pompage de l'eau dessalée

Il est utilisé 11 pompes pour refouler l'eau de mer dessalée à partir du réservoir d'un réservoir de stockage de 5000 m³ existant dans la station. Onze pompes de refoulement, dont une est en réserve, et d'une capacité de pompage de 833 m³/h chacune sont installées. Les pompes effectuent leur aspiration au sein du réservoir de stockage [6].

III.10. Conclusion

Nous avons présentés dans ce troisième chapitre, une fiche descriptive de la station de dessalement de Honaine. Afin de prendre une idée générale sur le mode opératoire de l'usine et sa capacité de production de l'eau potable, ainsi de ces besoins énergétiques (électricité) en particulier, tirés complètement de l'énergie fossile (gaz naturel), cela nous permettra d'estimer l'énergie nécessaire qu'il faudra fournir pour l'usine afin que cette dernière puisse travailler dans les conditions normales sans interruption dans son cycle de production.

Dans notre travail cette énergie sera d'origine renouvelable (solaire photovoltaïque et éolienne), ce qui nous conduit au dimensionnement de la taille du système d'énergie hybride, pour prévoir le nombre de panneaux photovoltaïques et le nombre des éoliennes, ainsi que le nombre de batteries de stockage. Ce dimensionnement sera traité dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

Références Bibliographiques

- [1]. www.ONM.dz (Office National de la Météorologie).
- [2]. Ministère de l'Energie et des Mines (Algérie), « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007, pp. 38-40.
- [3]. M. R. YAICHE, A. BOUHANIK, «Atlas Solaire Algérien», Centre de Développement des Energies Renouvelables, EISSN/ISSN 1112-3850, Dépôt légal 2062-2002,84pages, 2002.
- [4]. S. M. BOUDIA, «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie», Thèse doctorat en Physique Energies Renouvelables, Université Abou-Bakr Blekaïd de Tlemcen, 2013.
- [5]. B.DESSUS et F. PHARABOD, « L'Énergie solaire », P.U.F, Paris, 1996.
- [6]. I.ALLAM, «La mise en exploitation de la station de dessalement de Honaine, mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique», Université de Tlemcen, faculté de technologie, 2012.
- [7]. www.Google Earth.com
- [8]. A. ATALLAH, «Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine », Mémoire de Master en Biologie Option Alimentation et Nutrition, Université Abou-Bakr Blekaïd de Tlemcen, 2014.
- [9]. <http://www.advantecmfs.com/filtration/membranes/img/ccac.jpg>.
- [10]. M. A.BENALLOUDA, «Etude de l'influence de différents matériaux filtrants sur le prétraitement des eaux de mer : Application sur les eaux de la station de Honaine», Mémoire de Master en Hydraulique Option : Technologies de Traitement Des Eaux, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, 2013.
- [11]. GEIDA IDAM HONAINÉ, cours pour le personnel d'exploitation et de maintenance de la station dessalement de Honaine.

Chapitre IV :

Dimensionnement du système hybride

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

IV-1 Introduction

Plusieurs pays dans le monde notamment l'Algérie, se confrontent à deux problèmes majeurs nécessaires pour tous développements : l'accès à l'eau potable et l'approvisionnement en énergie.

L'utilisation rationnelle de ces deux ressources, représente un défi majeur pour tous les économies mondiales dans les prochaines décennies, car l'augmentation rapide des besoins en eau, due à l'accroissement démographique, l'amélioration du niveau de vie des populations et les nécessités de développement, obligent à réaliser de nouvelles installations de production d'eau potable, tels que les unités de dessalement de l'eau de mer (procédés énergivores)[1-3].

Donc devant cet état, le recours au dessalement de l'eau de mer à travers les énergies renouvelables [4,5], devient une solution alternative et prometteuse pour l'environnement ; l'utilisation des systèmes d'énergies hybrides (photovoltaïque-éolien) [6-8], permet de garantir le fonctionnant à long terme [11,12].

Les unités de dessalement par osmose inverse alimentées par un système hybride, ont été le sujet de recherche de plusieurs travaux [13-19] ; Essam Sh. Mohamed et al. (2004), ont présenté un outil pour la conception d'une unité de dessalement d'eau de mer travaillant par la technique d'osmose inverse, alimentée par des systèmes énergétiques hybrides (PV-éolien) pour produire de l'eau potable, à un village de 60 habitants à la Canée, en Grèce.

E. Koutroulis et al. (2010), proposent une méthodologie alternative basé sur des algorithmes génétiques pour le dimensionnement optimal des unités de dessalement alimentées par des sources d'énergie PV et éoliennes.

Mariam Smaoui et al. (2015), ont développé un nouvel algorithme de dimensionnement optimal utilisant la technique d'optimisation itérative. Cette approche d'optimisation détermine la configuration optimale d'un système PV / éolien / hydrogène. Une étude de cas a été réalisée pour analyser un projet hybride destiné à alimenter une unité de dessalement d'eau de mer installée sur les îles de Kerkennah situé dans le sud de la Tunisie.

Ioannis D. Spyrou et al. (2010), ont présenté la stratégie optimale de conception et d'exploitation d'un système de dessalement hybride autonome, capable de répondre à la demande en eau douce d'une île ou d'autres régions côtières éloignées. Le projet consiste en une unité de dessalement par osmose inverse alimentée par des systèmes de production d'électricité éolienne et solaire, ainsi que par une unité de stockage [20,21] ; un algorithme

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

informatique spécifique est mis au point pour simuler en détail l'ensemble de l'exploitation de l'installation et pour réaliser une évaluation économique de l'investissement.

Dans ce chapitre, la demande énergétique de la station de dessalement est assurée en utilisant le système hybride (PV-éolienne), pour cela on a besoin de deux scénarios :

Le premier est basé sur la moyenne des valeurs mensuelles annuelles, dans laquelle la taille des générateurs photovoltaïques et des éoliennes est déterminée à partir des valeurs moyennes mensuelles de chaque composant.

Dans le second scénario, la détermination des tailles de ces deux composants du système est basée sur le mois le plus défavorable (défini comme étant le mois qui nécessite la plus grande utilisation de la surface du générateur photovoltaïque et éolien).

Par le biais de ces calculs, on pourra déterminer la taille et l'optimisation du système, la configuration technico-économique [22-24] ainsi que le taux de bénéfice obtenu à partir du système hybride par rapport aux énergies fossiles.

IV-2 Présentation de la station de dessalement de "Honaine"

La station de dessalement de l'eau mer [25-27] de "Honaine" (Figure IV.1 [28]) (Située à 69 kilomètres au nord de la ville de Tlemcen, Nord-Ouest Algérien), entamée en 2006 par le groupement espagnol GEIDA (composé des sociétés COBRA, SADYT, BEFESA et CODESA), elle a été opérationnelle en Juillet 2012, avec un montant d'investissement de 250 million de dollars. Sa capacité de production est de 200.000.m³/jour, assurant l'approvisionnement en eau potable pour une population d'environ 555.000 habitants [29].L'énergie spécifique de dessalement de cette unité est de 43800 kWh/jour, avec une puissance journalière de 1825 kW.



Figure.IV.1 : Station de Dessalement-Honaine- Tlemcen [28].

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

IV-3 Présentation du système

Afin d'assurer le besoin énergétique de l'unité de dessalement (La station utilise la technique d'osmose inverse (OI) [30,31], le système sera composé de : panneaux photovoltaïques, éoliennes et batteries (Figure IV.2), ajouté à cela des onduleurs permettant de convertir le courant continu en courant alternatif.

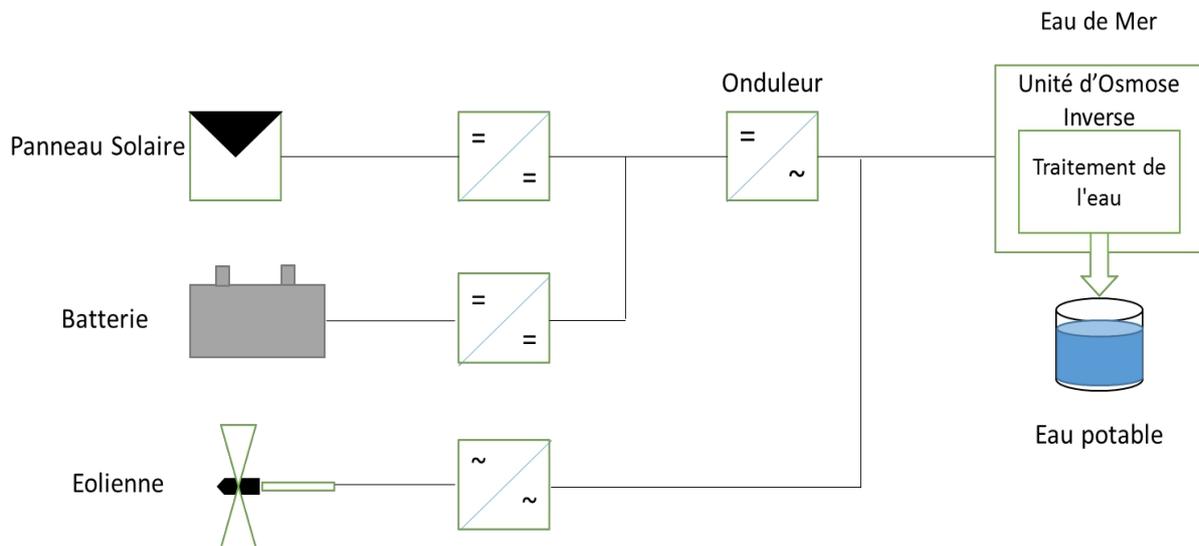


Figure IV.2 : Schéma du système hybride photovoltaïque-éolien-batterie.

Les tableaux ci-dessous représentent les caractéristiques de chaque composant du système (Module PV, éolienne, batterie et onduleur [32-37]).

Tableau IV.1 : Spécifications du module PV.

<i>Nom</i>	Sunforte PM096B00
<i>Puissance Nominale</i>	333 Watt
<i>Dimensions (L x W x H)</i>	1559 x 1046 x 46 mm
<i>V_{MP}</i>	54.7 V
<i>I_{MP}</i>	6.09 A
<i>Tension en circuit ouvert</i>	64.9 V
<i>Courant de court-circuit</i>	6.58 A
<i>Tension Maximale</i>	1000 V
<i>Rendement</i>	20.4%
<i>Garantie</i>	25 Années
<i>Coût</i>	444,857 \$

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

Tableau IV.2 : Spécifications de l'éolienne.

<i>Nom</i>	Aeolos-H 50kw
<i>Puissance Maximale</i>	50Kw
<i>Diamètre du rotor</i>	18 m
<i>Surface balayée</i>	254.34 m ²
<i>Rendement</i>	90%
<i>Durée de vie</i>	20 Années
<i>Coût</i>	75000 \$

Tableau IV.3 : Vitesse du vent et puissance de l'éolienne.

<i>Vitesse du vent (m/s)</i>	<i>Puissance de sortie (kW)</i>
3.0	0.54
3.5	0.90
4.0	1.92
4.5	3.75
5.0	5.99
5.5	8.71
6.0	11.96
6.5	16.03
7.0	20.53
7.5	25.88
8.0	32.18
8.5	38.59
9.0	45.81
9.5	50.03

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

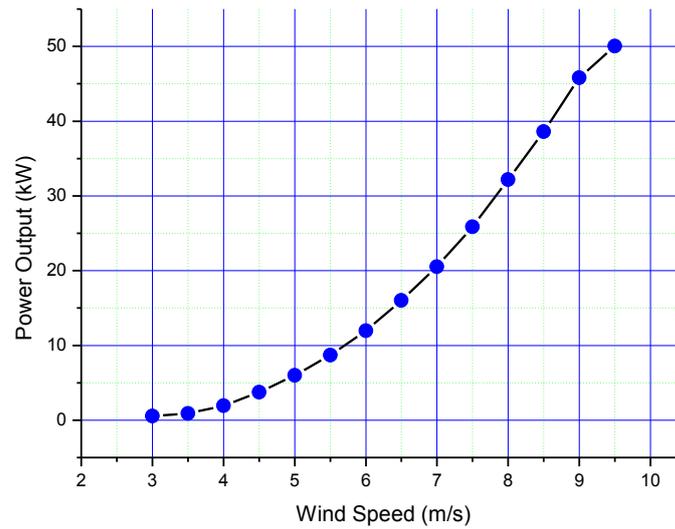


Figure IV.3 : Courbe de puissance de l'éolienne Aeolos-H 50KW.

Tableau IV.4 : Spécifications de la batterie.

<i>Nom</i>	Battery Pack ProPower
<i>Tension du pack</i>	48V
<i>Stockage</i>	9600 Wh
<i>Nombre de cycle</i>	3500
<i>Nombre de batteries dans le Pack</i>	8
<i>Nom de la batterie</i>	Battery ProPower GEL
<i>Capacité de la batterie</i>	100 Ah
<i>Durée de vie</i>	15 Années
<i>Coût</i>	2034.044 \$

Tableau IV.5 : Spécifications de l'onduleur.

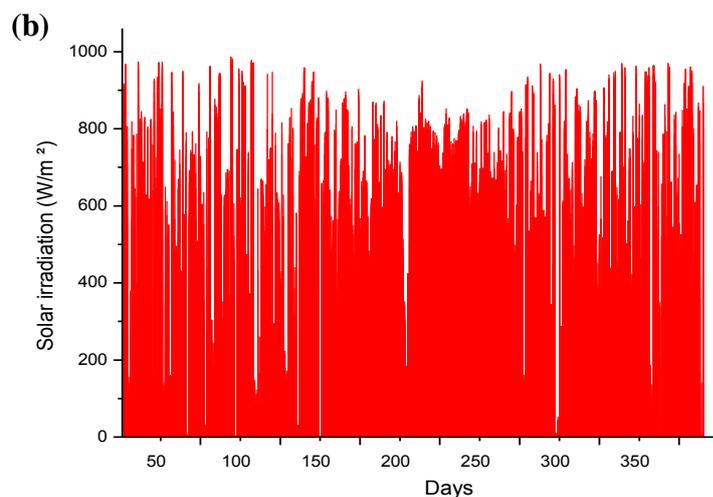
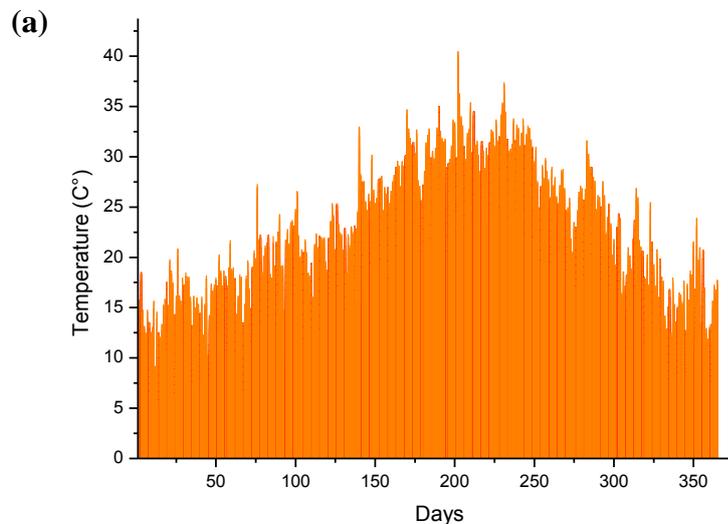
<i>Nom</i>	CP100-Inverter
<i>Type de sortie</i>	Triple
<i>Puissance Maximale</i>	115 kW
<i>Courant de sortie</i>	160 A
<i>Fréquence de sortie</i>	50Hz/60Hz
<i>Tension d'entrée</i>	500 V
<i>Tension de sortie</i>	450-1000V
<i>Rendement</i>	97.1%
<i>Coût</i>	9667.425 \$

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

IV-4 Dimensionnement du système hybride [38,39]

IV-4-1 Données climatiques et l'énergie reçue

Les figures ci-dessous représentent les données journalières climatiques [40,41] du site étudié pendant une année (Honaine- Tlemcen (Algérie)). La figure (4-a) illustre la température atmosphérique, cette dernière atteint son apogée durant la période allant du 200^{ème} jour jusqu'au 250^{ème} jour avec des températures maximales aux alentours de 40°C. La figure (4-b) montre l'irradiation solaire journalière du site étudié, cette région est caractérisée par un important gisement solaire, avec une moyenne annuelle de 850 w/m². La figure (4-c) représente la vitesse du vent journalière, elle atteint une valeur moyenne annuelle de 4.5 m/s.



Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

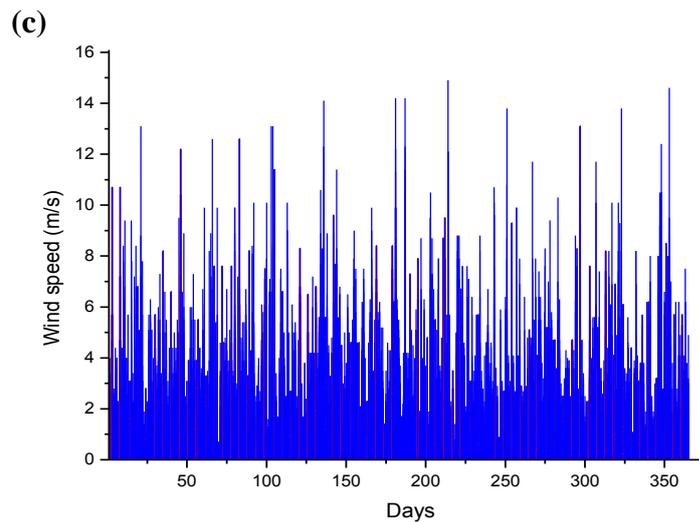


Figure IV.4 : Conditions météorologiques pour le site étudié : (a) Température journalière - (b) Rayonnement solaire quotidien - (c) Vitesse du vent journalière.

L'énergie hybride reçue par le système photovoltaïque-éolien est illustrée dans la figure IV.5. Le profil de cette énergie est presque constant durant la période allant du 20^{ème} jour jusqu'à la fin de l'année, ce qui implique que le système peut couvrir la charge sans avoir recours aux batteries. Par contre au début de l'année, on remarque la présence de cinq jours déficitaires (2, 10, 12, 16, et le 18^{ème} jour), ces jours représentent une insuffisance accrue en énergie, d'où la nécessité d'utiliser l'énergie stockée par les batteries.

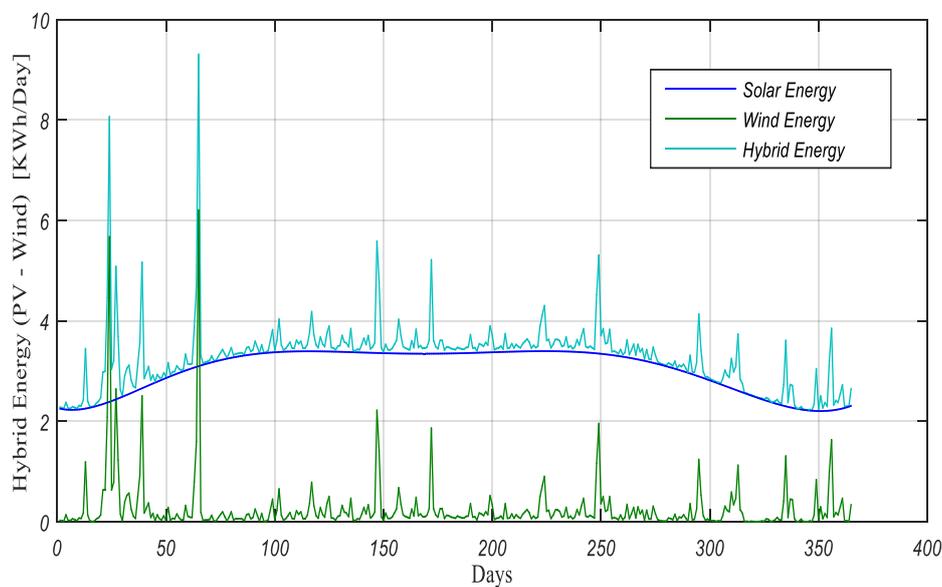


Figure IV.5 : Energie hybride reçue.

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

IV-4-2 Performance du système et détermination du mois le plus défavorable [38,39]

L'énergie mensuelle produite par le système est notée $E_{PV,m}$ (KWh / m^2) pour le photovoltaïque, et $E_{w,m}$ (KWh / m^2) pour l'éolien (où $m = 1, 2, 3, \dots, 12$, représente le mois de l'année) et E_d l'énergie demandée.

Les surfaces des panneaux et des éoliennes pour une couverture de 100 % de la charge durant le mois le plus défavorable sont données par :

$$S_{PV} = Max \left(\frac{E_d}{E_{PV}} \right) \quad (IV.1)$$

$$S_w = Max \left(\frac{E_d}{E_w} \right) \quad (IV.2)$$

IV-4-3 Taille des composants renouvelables

L'énergie totale produite par les deux générateurs photovoltaïque et éolien est exprimée par :

$$E_{PV} \cdot S_{PV} + E_w \cdot S_w = E_d \quad (IV.3)$$

En utilisant les deux sources renouvelables, la charge est divisée en deux parties. Si f est considérée comme la fraction de la charge donnée par le système photovoltaïque (perméabilité), alors le complémentaire de la demande ($1 - f$) doit être satisfait par le système éolien.

Les valeurs limites de f correspondent à des systèmes purs. En effet, $f = 1$ correspond à une utilisation de 100 % du photovoltaïque et $f = 0$ représente 100 % d'utilisation du système éolien. Notre étude est basée sur un système hybride (50 % Photovoltaïque ,50% Wind), ce qui correspond à une perméabilité $f = 0.5$.

Donc les équations (1) et (2) deviennent :

$$S_{PV} \cdot E_{PV} = f E_d \quad (IV.4)$$

$$S_w \cdot E_w = (1 - f) E_d \quad (IV.5)$$

Avec :

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot S_{PV} \cdot H \quad (IV.6)$$

$$E_w = 0,6125 \cdot C_p \cdot S_w \cdot V^3 \quad (IV.7)$$

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

Où :

f : Perméabilité.

R_{PV} : Le rendement du générateur photovoltaïque.

H : L'irradiation solaire sur un plan incliné (KWh/m²).

C_p : Le coefficient de performance de l'éolienne.

V : Vitesse du vent (m/s).

IV-4-4 Scénarios traités

Les deux scénarios considérés dans cette étude ($S=1$ et $S=2$), sont basés respectivement sur les moyennes annuelles pour chaque mois, et la moyenne du mois le plus défavorable de l'énergie totale.

➤ Scénario 1 ($S = 1$), les moyennes annuelles pour chaque mois

Dans ce scénario, nous avons déterminé les surfaces des panneaux photovoltaïques et des éoliennes, à partir des valeurs moyennes annuelles, qu'on note $\overline{E_{PV}}$ et $\overline{E_w}$.

La charge est notée $\overline{E_d}$ et les surfaces des composantes solaires et éoliennes sont données par les équations suivantes :

$$S_{PV}^{S=1} = f \frac{\overline{E_d}}{\overline{E_{PV}}} \quad (\text{IV.8})$$

$$S_w^{S=1} = (1 - f) \frac{\overline{E_d}}{\overline{E_w}} \quad (\text{IV.9})$$

➤ Scénario 2 ($S = 2$), la méthode du mois le plus défavorable

Pour ce scénario, on détermine les surfaces en respectant le mois le plus défavorable. La surface requise pour les composantes renouvelables est donnée par :

$$S_{PV}^{S=2} = f \text{Max} \left(\frac{\overline{E_d}}{\overline{E_{PV}}} \right) \quad (\text{IV.10})$$

$$S_w^{S=2} = (1 - f) \text{Max} \left(\frac{\overline{E_d}}{\overline{E_w}} \right) \quad (\text{IV.11})$$

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

IV-4-5 Coefficient d'autonomie du système R

Le coefficient d'autonomie, est calculé à partir du rapport du nombre total des jours où on a le déficit d'énergie, au nombre total des jours de fonctionnement. Dans le système de mesure et d'optimisation, le critère d'autonomie est : $R \geq R_{min}$ avec R_{min} représente la fraction minimale du temps alloué pour lequel le système doit couvrir la demande.

$$R = 1 - \frac{Njd}{Ntot} \quad (\text{IV.12})$$

Avec :

Njd : Nombre total des jours de l'année où on a le déficit en énergie.

$Ntot$: Nombre total des jours de fonctionnement (365 jours).

IV-4-6 Capacité du système de stockage

La taille de la batterie de stockage est déterminée à partir de la charge demandée maximale $E_{d,max}$ (charge mensuelle maximale). La capacité de la batterie (en Ah), pour une période Δt est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_{d,max} \cdot 1000}{V_{sys}} \cdot \frac{\Delta t}{N_m} \quad (\text{IV.13})$$

Avec :

V_{sys} : Tension nominale du système.

N_m : Nombre de jours dans mois le plus défavorable.

Δt : Durée relative en jours à l'autonomie demandée.

La capacité réelle de la batterie est déterminée à partir de la capacité d'une unité de batterie $C_{bat,u}$, comme pour le cas des surfaces des générateurs photovoltaïque et éolien. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat,u} = C^{te} C_{bat,u} \quad (\text{IV.14})$$

Où :

C^{te} : Constante donnée par la partie entière du rapport $\left(\frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \right)$.

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

IV-5 Méthode de résolution

IV-5-1 Procédure

La procédure de résolution que nous avons élaborée est divisée en deux parties :

Dans la première partie, nous avons déterminé la configuration économique optimale de la composante renouvelable, sans tenir compte de la capacité des batteries. Nous avons varié la fraction f d'un pas de 0.1 ($0 \leq f \leq 1$) et pour chaque valeur de f la surface des composantes renouvelables est calculée à partir des équations 8, 9, 10, et 11, en utilisant les deux scénarios 1 et 2. Ensuite en tenant compte des coûts des composantes renouvelables du système hybride étudié ($f=0.5$), nous avons déterminé le triplet optimal (f, S_{PV}, S_{eol}).

Dans la deuxième partie, nous avons calculé la capacité des batteries à partir des équations 13 et 14, pour une période déterminée Δt . La simulation que nous avons utilisée par la suite est basée sur une analyse jour par jour de l'énergie $S(j)$ contenue dans les batteries.

$S(j)$ dépend de l'état de charge de la veille ($S(j-1)$), de l'énergie des composantes renouvelables ($E_{PV} + E_{eol}$) et de la consommation assurée par le système de stockage ($\frac{E_d}{R_b}$), où R_b représente le rendement des batteries.

Si $S(j)$ est inférieure à 20 % de la capacité des batteries, cela signifie que la demande n'est pas entièrement satisfaite durant cette journée, le jour j est alors compté comme jour de déficit en énergie. À partir de ces journées déficitaires, nous avons calculé le coefficient d'autonomie du système R .

IV-5-2 Organigramme

La figure dans l'annexe B représente l'organigramme de l'algorithme utilisé pour notre étude.

IV-6 Résultats et discussions

IV-6-1 Scénario 1

Les figures obtenues à partir du premier scénario (Les conditions météorologiques sont ordinaires durant tous les mois d'année) montrent la variation du nombre de panneaux et d'éoliennes, leurs surfaces ainsi que le coût total en fonction de la perméabilité f . On constate

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

que la perméabilité f varie de 0 à 1 avec un pas de 0,1, tel que pour $f=0$, le système est éolien pur, d'autre part pour $f= 1$, le système est considéré comme photovoltaïque pur. Notre étude est basée sur un système hybride (50 % Photovoltaïque ,50% Wind), ce qui correspond à une perméabilité $f=0.5$.

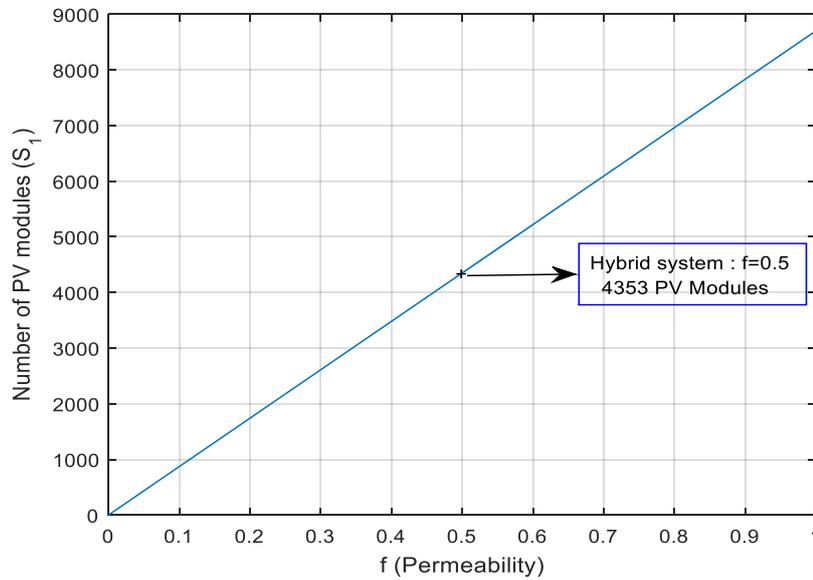


Figure IV.6 : Nombre de modules PV (Scénario 1).

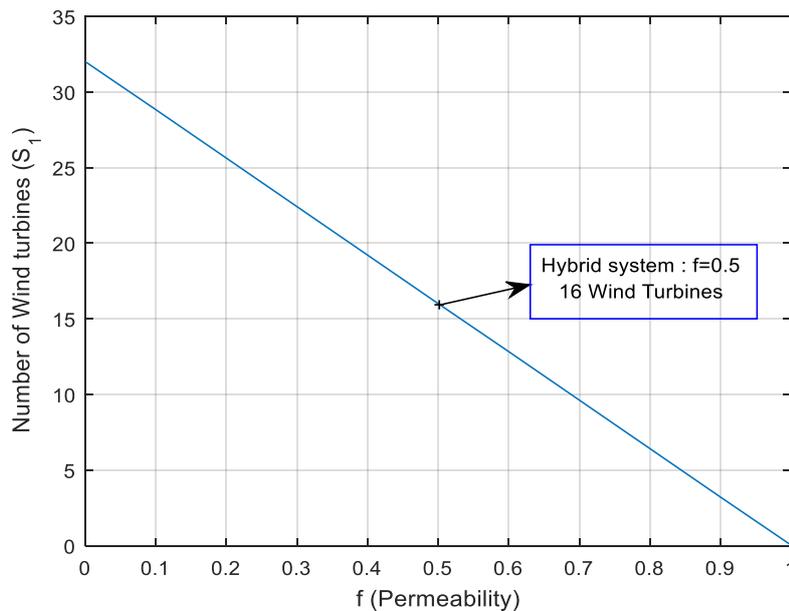


Figure IV.7 : Nombre d'éoliennes (Scénario 1).

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

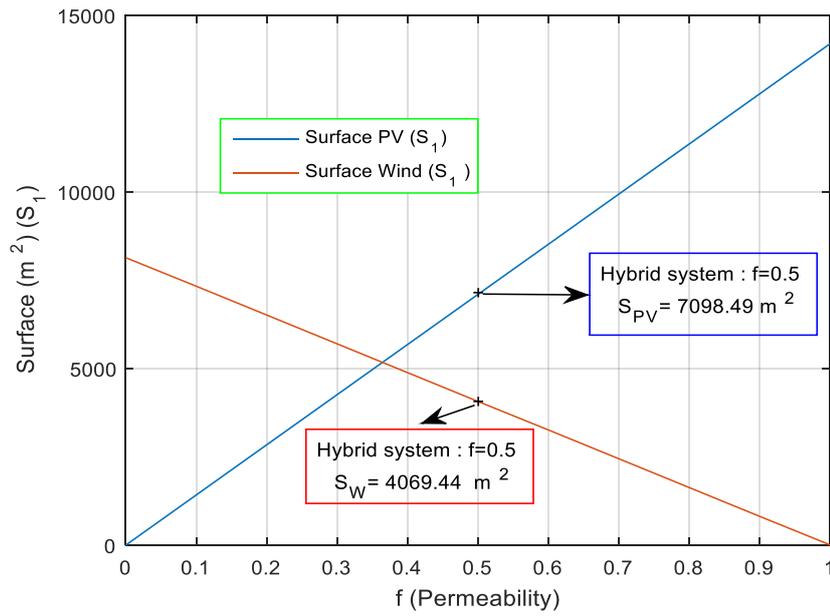


Figure IV.8 : Surface (Scénario 1).

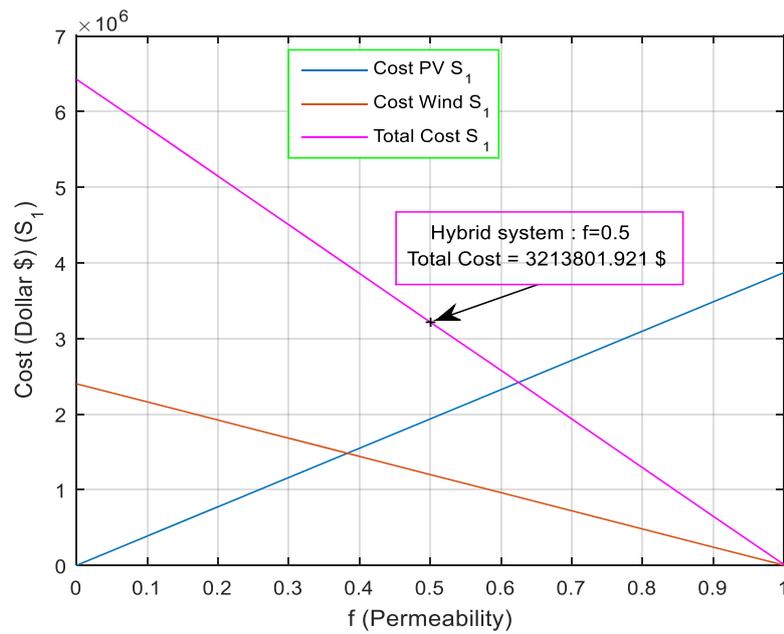


Figure IV.9: Coût Total (en Dollar \$) (Scénario 1).

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

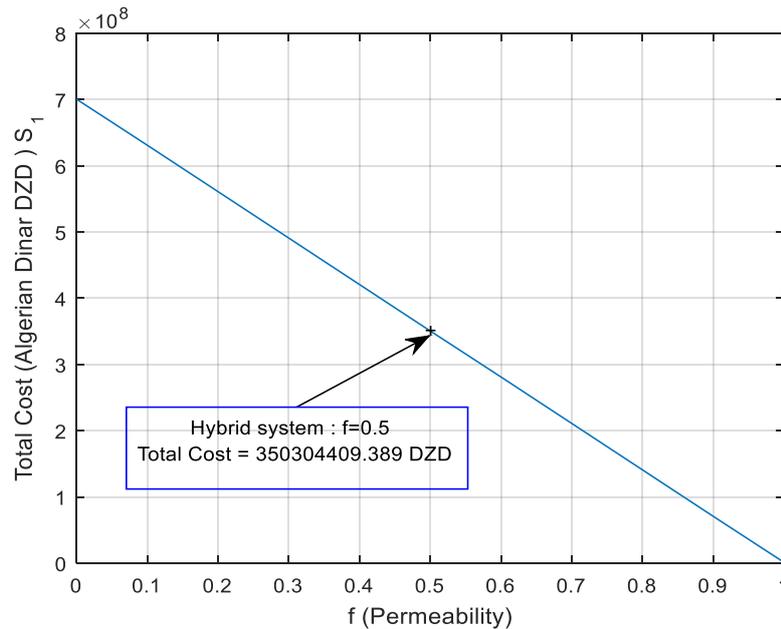


Figure IV.10 : Coût Total (en Dinar Algérien DZD) (Scénario 1).

D'après les figures (IV.7- IV.11) et à partir du scénario 1, pour assurer la charge demandée, on a besoin de :

- ✓ 4353 Panneaux avec une surface égale à $S_{PV} = 7098.5 \text{ m}^2$.
- ✓ 16 éoliennes avec une surface égale à $S_W = 4069.44 \text{ m}^2$.
- ✓ 8 Onduleurs (Afin de convertir le courant continu en alternatif).

Le coût totale obtenu à partir du scénario 1 est de :

- ✓ Coût total en dollar = 3213801.921 \$.
- ✓ Coût total en dinar = 350304409.389 **DZD** (1\$=109 DZD [42]).

IV-6-2 Scénario 2

Les figures obtenues à partir du deuxième scénario (Les conditions météorologiques sont défavorables par rapport au premier ce qui en résulte une augmentation de la taille du système) représentent la variation du nombre de panneaux et d'éoliennes, leurs surfaces ainsi que le coût total en fonction de la perméabilité f .

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

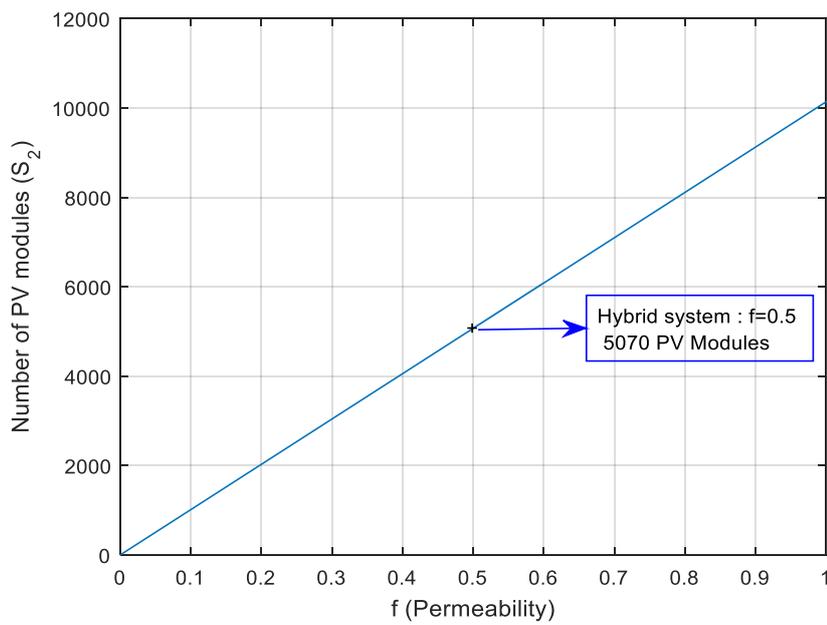


Figure IV.11 : Nombre de modules PV (Scénario 2).

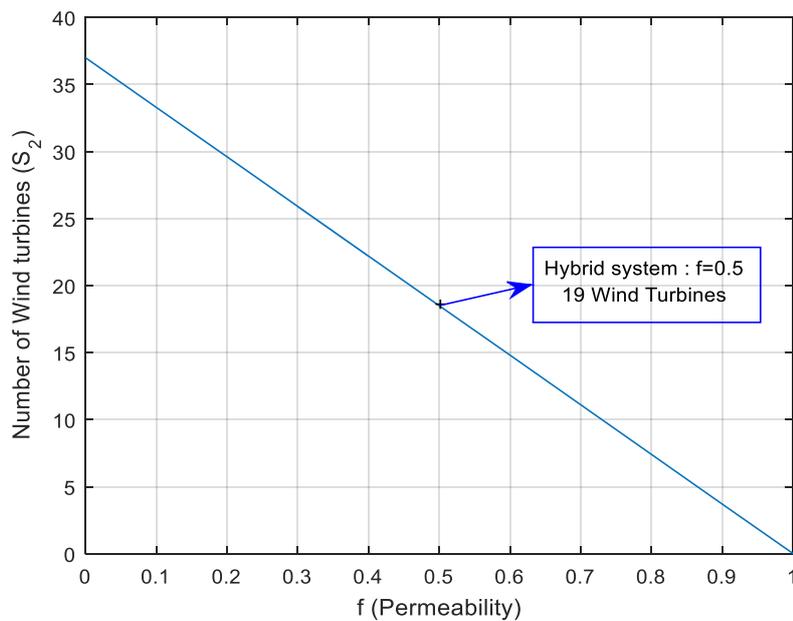


Figure IV.12 : Nombre d'éoliennes (Scénario 2).

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

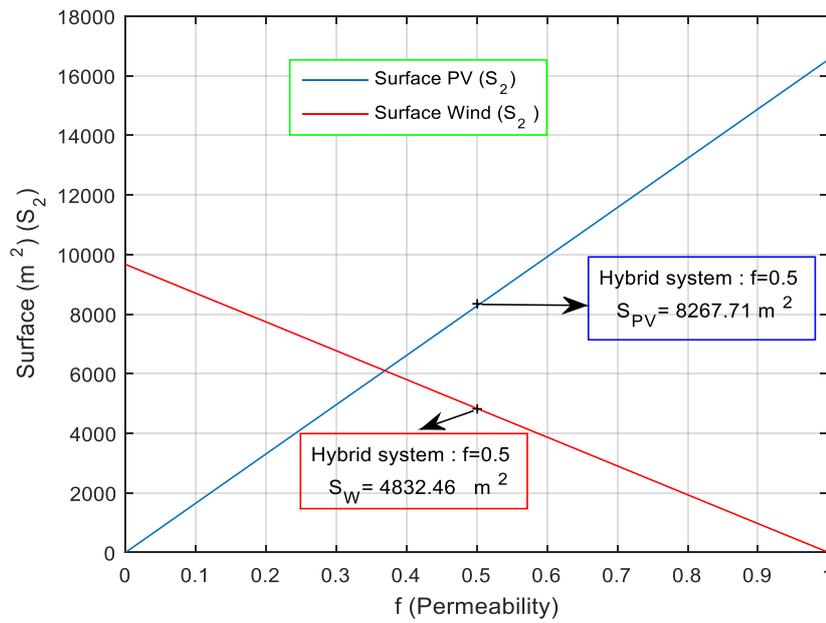


Figure IV.13: Surface (Scénario 2).

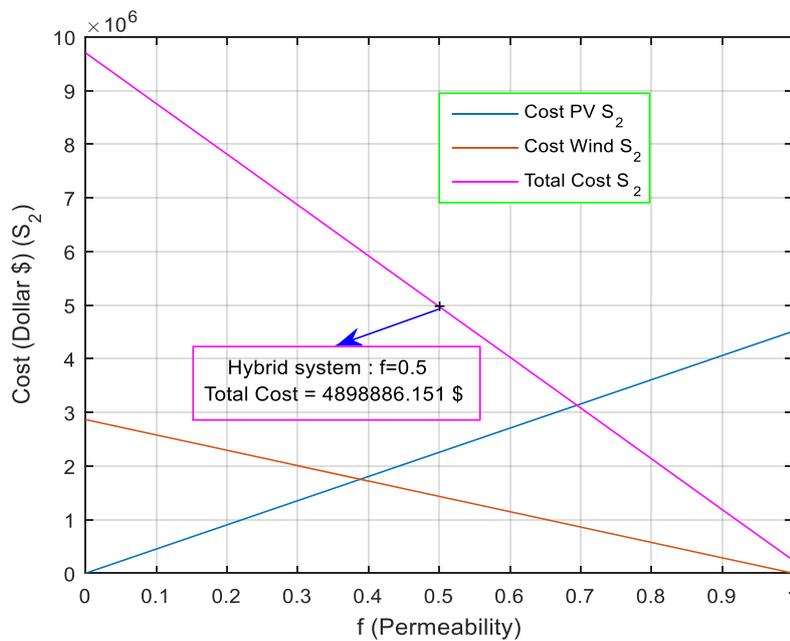


Figure IV.14 : Coût Total (en Dollar \$) (Scénario 2).

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

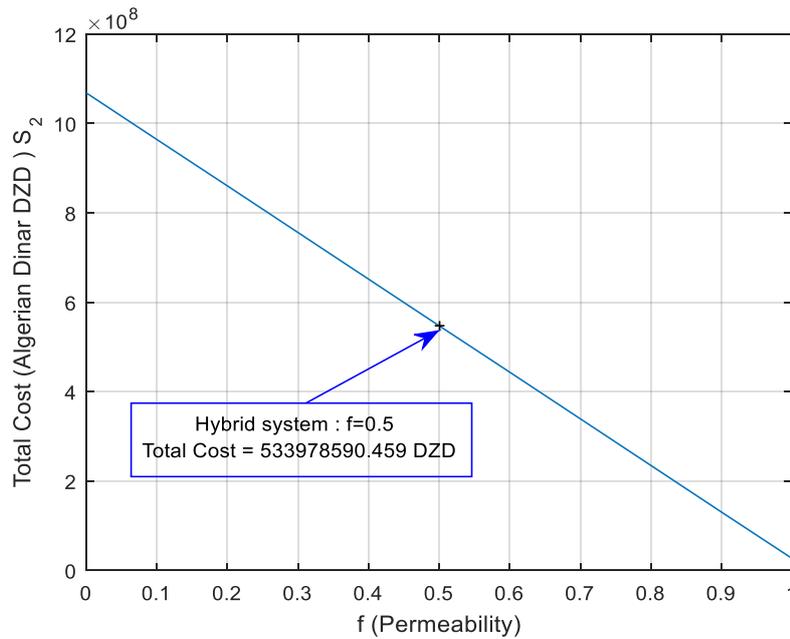


Figure IV.15 : Coût Total (en Dinar Algérien DZD) (Scénario 2).

Le deuxième scénario introduit la notion du mois le plus défavorable, tel qu'on remarque la présence de cinq jours déficitaires (2, 10, 12, 16, et le 18^{ème} jour), d'où la nécessité d'utiliser un système de stockage.

Donc pour résoudre ce déficit d'énergie, on a besoin de :

- ✓ 951 batteries [34,35].

On constate d'après les figures (IV.12- IV.16), pour assurer la demande énergétique totale pour un fonctionnement continu, on a besoin de :

- ✓ 5070 Panneaux avec une surface égale à $S_{PV} = 8267.72 \text{ m}^2$.
- ✓ 19 éoliennes avec une surface égale à $S_W = 4832.46 \text{ m}^2$.
- ✓ 101 onduleurs.

Le coût totale obtenu à partir du scénario 2 est de :

- ✓ Coût total en dollar = 4898886.151 \$.
- ✓ Coût total en dinar = 533978590.459 **DZD**.

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

On peut conclure que la complémentarité entre les deux scénarios permet d'assurer le fonctionnement continu à long terme de la station de dessalement.

IV-6-3 Comparaison entre le coût du système hybride et les énergies fossiles

L'électricité est fournie en Algérie par quatre filiales de la Sonelgaz : la SDA (Société de Distribution d'électricité et de gaz d'Alger), la SDC (Société de Distribution d'électricité et de gaz du Centre et Sud), la SDO (Société de Distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest) et la SDE (Société de Distribution d'électricité et de gaz de l'Est) [43]. Un kilowattheure est l'énergie nécessaire à faire tourner un appareil d'une puissance de 1000 pendant une heure. Les prix du kWh d'électricité dans toutes les zones de distribution sont identiques et sont fixés par décret étatique et plus particulièrement par la CREG, l'organisme en charge de la régulation du marché énergétique. Le dernier décret en date, est le décret n°05-182 du 18 Mai 2005 [44]. La tarification pour les professionnels se voit facturer 4,472 DZD/kWh [45].

Le coût de l'alimentation en électricité de la station de dessalement pendant une année de fonctionnement par les énergies fossiles est calculé à partir de l'équation suivante :

$$C_{ff} = C_{kWh} * E * 365 \quad \text{(IV.15)}$$

Avec :

C_{ff} : Coût total en utilisant les énergies fossiles ;

C_{kWh} : Prix d'un kWh d'électricité ;

E : L'énergie spécifique de la station dessalement (43800 kWh/jour).

- Le coût total pour 1 année de fonctionnement : $C_{ff} = 655907.0091$ \$.
- Le coût total pour 15 années de fonctionnement (Durée de vie du système hybride) :
 $C_{ff} = 9838605.137$ \$.

Les systèmes PV solaires nécessitent peu d'entretien, consistant en un contrôle régulier des câbles et des composants, le remplacement des modules et des onduleurs défectueux et, dans certains cas, le nettoyage du module [46]. Les pièces mobiles et les modules PV ont une durée de vie de plus de 25 ans. Les frais de maintenance moyens des panneaux solaires sur le marché avoisinent à l'heure actuelle les 4 200 \$/MW par an [47].

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

L'éolienne nécessite très peu d'entretien. Elle doit néanmoins rester accessible pour la maintenance de l'aérogénérateur. En effet, au moins une fois par an, l'aérogénérateur doit être descendu de son mât [48]. Cet entretien annuel permet d'optimiser la durée de vie de l'installation. L'éolienne choisit (Aeolos-H 50kw) dans notre étude à 5 ans de garantie (garantis contre : les defaults de fabrication, les dysfonctionnements et remplacement des éléments défectueux) [49,50] ; Les coûts annuels d'entretien des éoliennes de puissance (25 à 150 kW) s'élèvent à environ 4949.928 \$ [51,52].

- Le coût de l'entretien de notre système hybride pour une période de fonctionnement de 15 ans est égale à : $C_M = 164474.28$ \$
- Le coût totale de l'alimentation de la station de dessalement en utilisant le système hybride est égale à : $C_{RE} = 5063360.431$ \$
- Les résultats montrent que l'utilisation du système hybride nous a permis d'obtenir un bénéfice de 51.46 % soit 4775244.706 \$ à partir de la 7^{ème} année (7 Années, 262 Jours, 15 Heures, 58 Min et 33 Secondes) pour un total de 15 ans de fonctionnement.

IV-7 Conclusion

Dans cette étude nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimale, basée sur les résultats d'une simulation d'un système hybride (PV-éolienne) durant une année de l'irradiation solaire globale et de la vitesse du vent journalière du site de Honaine- Tlemcen (l'Ouest de l'Algérie), dans le but de fournir l'énergie électrique suffisante pour alimenter une station de dessalement de l'eau de mer (dessalement par la technique d'osmose inverse ; elle assure l'approvisionnement en eau potable pour une population d'environ 555 000 habitants).

A cet effet, une méthodologie d'analyse basée sur la prise en compte des perturbations saisonnières a été établie et ceci en utilisant deux scénarios afin d'assurer le fonctionnement de la station de manière continue. Le premier scénario utilise la moyenne des valeurs mensuelles par an, le deuxième introduit la notion du mois le plus défavorable (défini comme étant le mois qui nécessite la plus grande utilisation de la surface du générateur photovoltaïque et éolien).

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

Les résultats obtenus montrent que la complémentarité des deux scénarios, assure le bon fonctionnement de la station durant toute l'année, et ceci en introduisant un nombre de panneaux, éoliennes et batteries bien déterminés.

D'autre part l'utilisation du système hybride nous a permis de réduire le coût à 51.46 % par rapport aux combustibles fossiles, ce qui donne une fiabilité importante à l'étude proposée, vu qu'elle présente un bénéfice très avantageux de point de vue coût et rendement.

A partir de ces résultats, on constate qu'il y a une tendance économique favorable pour l'usage des énergies renouvelables comme énergies alternatives, ce qui est une solution prometteuse pour l'environnement dans les prochaines décennies.

Références bibliographiques

- [1]. E. TZEN, K. PERRAKIS, P. BALTAS, « Design of a stand-alone PV-desalination system for rural areas », *Desalination* 119 (1998) 327–334.
- [2]. Mohamed Zoubeik.; Mohamed Ismail.; Amgad Salama.; Amr Henni , « New Developments in Membrane Technologies Used in the Treatment of Produced Water », *A Review. Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1–26 (July 2017).
- [3]. A. A. Abuhabib.; Mostafa Ghasemi.; A. W. Mohammad.; Rakmi Abd Rahman.; A. H. El-Shafie, « Desalination of Brackish Water Using Nanofiltration: Performance Comparison of Different Membranes », *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 2929–2939 (November 2013).
- [4]. D. VOIVONTAS, K. MISIRLIS, E. MANOLI, G. ARAMPATZIS and D. ASSIMACOPOULOS , « A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies », *Desalination*, 133 (2001) 175-198.
- [5]. Soheila Khoshnevis Yazdi.; Bahram Shakouri , « Renewable energy, nonrenewable energy consumption, and economic growth », *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, (2017) DOI: 10.1080/15567249.2017.1316795.
- [6]. Rashid Al Badwawi.; Mohammad Abusara.; Tapas Mallick , « A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System », *Smart Science*, 3:3, 127-138. (2015). DOI: dx.doi.org/10.1080/23080477.2015.11665647.
- [7]. Shakti Singh; Mukesh Singh.; S. C. KAUSHIK , « A Review on Optimization Techniques for Sizing of Solar-Wind Hybrid Energy Systems », *International Journal of Green Energy*, (2016): DOI: 10.1080/15435075.2016.1207079.
- [8]. Gang Ma; Guchao Xu.; RongJu. ; Tiantian Wu , « Study on optimal configuration of the grid-connected wind–solar–battery hybrid power system », *International Journal of Sustainable Energy*, (2015) DOI: dx.doi.org/10.1080/14786451.2015.1081908.
- [9]. Y. LAKHAL, F. Z. BAGHLI, L. EL BAKKALI, « The efficiency of bond graph approach for a flexible wind turbine modeling », *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 12, No. 11 (2017) 2990 – 3010.
- [10]. Behzad Azizian Isaloo, Parviz Amiri, « Improved variable step size incremental conductance mppt method with high convergence Speed for PV systems », *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 11, No. 4 (2016) 516 – 528.

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

- [11]. Nasiraghdam, H., Jadid, S., « Optimal hybrid PV/WT/FC sizing and distribution system reconfiguration using multi-objective artificial bee colony (MOABC) algorithm », *Sol. Energy* 86, 3057–3071, 2012.
- [12]. Li, C.H., Zhu, X.J., Cao, G.Y., Sui, S., Hu, M.R., « Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology », *Renewable Energy* 34, 815–826, 2009.
- [13]. E.Sh. Mohamed, G. Papadakis, « Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaic », *Desalination* 164 (2004) 87–97.
- [14]. E. KOUTROULIS, D. KOLOKOTSA, « Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources », *Desalination* 258 (2010) 171–181.
- [15]. Mariem Smaoui, Achraf Abdelkafi, Lotfi Krichen, « Optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind/hydrogen hybrid system supplying a desalination unit », *Solar Energy* 120 (2015) 263–276.
- [16]. Ioannis D. Spyrou, John S. Anagnostopoulos, « Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit », *Desalination* 257 (2010) 137–149.
- [17]. Dursun, E., Acarkan, B., Kilic, O., « Modeling of hydrogen production with a stand-alone renewable hybrid power system », *Int. J. Hydrogen Energy* (2012.) 37, 3098–3107.
- [18]. P.A. KOKLAS, S.A. PAPATHANASSIOU, « Component sizing for an autonomous wind driven desalination plant », *Renewable Energy* 31 (2006) 2122–2139.
- [19]. Markvart , « Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems », *Solar Energy*, 57 (1997) 277-281.
- [20]. J.S. ANAGNOSTOPOULOS, D.E. PAPANTONIS, « Pumping station design for a pumped storage wind-hydro power plant », *Energy Conversion & Management* 48 (2007) 3009–3017.
- [21]. J.S. ANAGNOSTOPOULOS, D.E. PAPANTONIS, « Simulation and size optimization of pumped storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy », *Renewable Energy* 33 (2008) 1685–1694.
- [22]. Kaabeche. Ibtouen, « Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system », *Sol. Energy* 103, 171–182 (2014).

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

- [23]. Belmili, H.; Haddadi, M.; Bacha, S.; Almi, M.F.; Bendib, B., « Sizing stand-alone photovoltaic–wind hybrid system: techno economic analysis and optimization », *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30, 821–832 (2014).
- [24]. Ali M. Eltamaly.; Khaled E. Addoweesh.; Umar Bawa.; Mohamed A. Mohamed, « Economic Modeling of Hybrid Renewable Energy System: A Case Study in Saudi Arabia », *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 3827–3839 (May 2014).
- [25]. Werner Luft, « Five Solar-Energy Desalination Systems », *International Journal of Solar Energy*, 1:1, 21-32, (1982), DOI: 10.1080/01425918208909873.
- [26]. Robert G. Maliva.; Thomas M. Missimer, « Self-cleaning beach gallery design for seawater desalination plants », *Desalination and Water Treatment*, 13:1-3, 88-95, (2010), DOI:dx.doi.org/10.5004/dwt.2010.1053.
- [27]. Seung-Hyun Kim. ; Choong-Sik Min.; Jaeweon Cho, « Comparison of different pretreatments for seawater desalination », *Desalination and Water Treatment*, 32:1-3, 339-344, (2011) DOI:dx.doi.org/10.5004/dwt.2011.2719.
- [28]. Abderrazak Atallah, « Desalination process and physico-chemical quality of the water desalinated by the Honaine seawater desalination plant », Master's thesis, University Abou Bekr Belkaid –Tlemcen, (July 2014).
- [29]. H.ALLAM ; A.MELLAH, « Economic study and ecological impact of the desalination plant in Honaine. (W.Tlemcen) », *International Seminar on Hydrogeology and Environment*. (November 2013).
- [30]. Marwan M. Mahmoud, « Solar electric powered reverse osmosis water desalination system for the rural village, Al Maleh: design and simulation », *International Journal of Sustainable Energy*, 23:1-2, 51-62, (2003) DOI: 10.1080/01425910310001634451
- [31]. Spyrou. Anagnostopoulos, « Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit », *Desalination* 257, 137–1492 (2010).
- [32]. SunForte PM096B00: Mono-Crystalline Photovoltaic Module, BenQ Solar -AU Optronics Corporation. Website: www.ase-energy.com/panneau-solaire-24v-330w-monocristallin-benqsolar_sunforte.fr,4,PAN320.cfm
- [33]. AeolosWind Turbine- Aeolos H 50KW- Website: windturbinestar.com.
- [34]. Website: <https://www.alma-solarshop.fr/batterie-propower/652-pack-de-batteries-propower-a-48v-avec-9600wh.html>
- [35]. BatterX, LEAD CARBON BATTERY, LC1000, Website: batterx.io

Chapitre IV : Dimensionnement du système hybride

- [36]. Growatt CP100 User Manual -Growatt New Energy Co., Ltd. Bao'a District, Shenzhen, P.R. China. Website: www.ginverter.com
- [37]. Growatt CP100, Website:
<http://www.growatt.com/html/2014/01/04/2014010405385606440811.html>
- [38]. C. PROTOGEROPOUIOS.; B.J. BRINKWORTH.; R.H. MARSHALL,« Sizing and Techno-Economical Optimization for Hybrid Solar Photovoltaic/Wind Power Systems with Battery Storage », Int. J. Energy Res., Vol. 21, pp. 465-479, (1997).
- [39]. A. EL KHADIMI ; L. BACHIR. ; A. ZEROUAL,« Sizing and Technico-Economic Optimization of a Photovoltaic Hybrid Energy System - Wind Turbine with Storage System », Renewable Energy, Vol. 7, pp. 73-83, (2004).
- [40]. Website: <https://en.tutiempo.net/climate/01-2017/ws-605310.html>
- [41]. Website: National Statistical Office .<http://www.ons.dz/>
- [42]. Website: Date: 10-09-2017
<http://www.xe.com/fr/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=USD&To=DZD>
- [43]. Website: <https://www.dzbreaking.com/2017/06/19/new-company-charge-electricity-gas-distribution-created-algeria/>
- [44]. Executive Decree No. 05-182 of 9 Rabie Ethani 1426 corresponding to 18 May 2005 on tariff regulation and remuneration for electricity and gas transmission, distribution and marketing activities. Website: <http://www.energy.gov.dz>
- [45]. Website: <http://algerie-electricite.com/faq/prix-kwh>
- [46]. Hespul - Memo on preventive maintenance of photovoltaic systems: version n°1 – 21 mai 2012.
- [47]. Commercial photovoltaic solar power plants a guide for project promoters, International Finance Corporation, 2015.
- [48]. Website: <http://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/windpower-learning-centre/how-much-does-a-wind-turbine-cost-to-operate/>
- [49]. AEOLOS – 5 Years Standard Warranty. windturbinestar.com
- [50]. Website: <http://www.windturbinestar.com/warranty-support.html>
- [51]. Website: <http://www.windturbinestar.com/contact-us.html> .Aeolos Wind Turbine, Contact: sales@windturbinestar.com
- [52]. Website: <http://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/windpower-learning-centre/how-much-does-a-wind-turbine-cost-to-operate/>

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du développement durable, la modélisation et la simulation des systèmes de production d'électricité autonome, à partir des ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne), avec un système de stockage de batteries, désigné pour alimenter une station de dessalement de l'eau de mer de grande capacité de production d'eau potable ($200.000\text{m}^3/\text{jour}$), travaillant avec la technique de l'osmose inverse.

A cet effet, une méthodologie d'analyse basée sur la prise en compte des perturbations saisonnières a été entreprise et ce concernant ces deux sources d'énergies du site de Honaïne (Nord-Est de Tlemcen). La modélisation et la simulation numérique de la chaîne de conversion d'électricité ont été effectuées en utilisant le langage de programmation Matlab.

De ce fait, Afin d'exploiter au maximum l'énergie solaire et éolienne, l'adaptation des générateurs est nécessaire pour les faire fonctionner dans les conditions optimales. Le modèle de simulation développé peut être utilisé, non seulement pour analyser la performance d'un système hybride, mais aussi pour dimensionner le système le plus adaptable pour l'alimentation des différentes charges électriques pour n'importe quelle localité spécifiée, pourvu que les données météorologiques locales soient disponibles.

Dans ce contexte, notre objectif se focalise sur la minimisation du coût du système d'énergie hybride et excéder le stockage d'énergie disponible par l'optimisation du transfert d'énergie vers une charge industrielle, en l'occurrence l'usine de dessalement de l'eau de mer de Honaïne.

Donc pour parvenir à cet objectif, nous avons opté pour une méthode de dimensionnement optimale, basée sur les résultats d'une simulation d'un système hybride (PV-éolien) durant une année de l'irradiation solaire globale et de la vitesse du vent journalière du site de Honaïne- Tlemcen, dans le but de fournir l'énergie électrique suffisante pour alimenter la station de dessalement de l'eau de mer, qui utilise la technique d'osmose inverse. Cette méthode est basée sur deux scénarios, afin d'assurer le fonctionnement de la station de manière continue. Le premier scénario utilise la moyenne des valeurs mensuelles par an, le deuxième introduit la notion du mois le plus défavorable (défini comme étant le mois qui nécessite la plus grande utilisation de la surface du générateur photovoltaïque et éolien).

Ces deux méthodes illustrent l'autonomie relative à l'énergie photovoltaïque et à l'énergie éolienne pour le système hybride, en se basant sur les résultats de la simulation

Conclusion Générale

d'une année de référence de l'irradiation solaire et de la vitesse du vent globale journalière pour une charge fixe de L'énergie spécifique de dessalement de cette unité , qui est de 43800 kWh/jour, avec une puissance journalière de 1825 kW.

Les résultats obtenus montrent que la complémentarité des deux scénarios, assure le bon fonctionnement de la station durant toute l'année, et ceci en introduisant un nombre de panneaux, éoliennes et batteries bien déterminés.

D'autre part l'utilisation du système hybride nous a permis de réduire le coût à 51.46 % par rapport aux combustibles fossiles, ce qui donne une fiabilité importante à l'étude proposée, vu qu'elle présente un bénéfice très avantageux de point de vue coût et rendement.

A partir de ces résultats, on constate qu'il y a une tendance économique favorable pour l'usage des énergies renouvelables comme énergies alternatives inépuisable, pour répondre à la fois aux besoins énergétiques des populations et aux contraintes environnementales qui ne cessent de s'accroître. Ce qui est une solution prometteuse pour l'environnement dans les prochaines décennies.

Ce travail offre quelques perspectives que nous présentons ci-dessous :

- Réalisation pratique du système d'énergies hybrides proposées puis une implantation sur le site réel étudié dans cette thèse.
- Amélioration du rendement du système d'énergie hybride en introduisons d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et enfin réutilisé par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique verte, cela dans le but de lisser la courbe de production d'énergie et la rendre moins aléatoire.
- Utilisation des systèmes de stockage plus efficaces pour diminuer au maximum les niveaux de pertes d'énergie.

Annexes

Annexes

Annexe A

H_Gh/H_Dh/H_Bn... en [kWh/m² jour] Ta en [°C]

Mois	Jour	H_Gh	H_Dh	H_Gk	H_Dk	H_Bn	Ta
1	1	1.10	1.09	1.10	1.09	0.02	13.8
1	2	2.14	1.03	2.14	1.03	2.25	12.5
1	3	3.62	0.65	3.62	0.65	7.43	13.4
1	4	3.18	0.57	3.18	0.57	6.48	10.9
1	5	2.85	1.06	2.85	1.06	4.55	10.0
1	6	1.45	0.96	1.45	0.96	1.33	9.0
1	7	3.34	0.51	3.34	0.51	6.98	9.3
1	8	1.93	1.34	1.93	1.34	1.81	8.3
1	9	1.71	0.90	1.71	0.90	2.11	7.5
1	10	1.78	1.11	1.78	1.11	1.78	7.8
1	11	3.57	0.53	3.57	0.53	7.38	8.8
1	12	3.24	0.70	3.24	0.70	6.11	4.4
1	13	3.58	0.52	3.58	0.52	7.37	6.9
1	14	2.77	1.37	2.77	1.37	3.12	7.2
1	15	2.84	1.42	2.84	1.42	3.86	5.9
1	16	3.75	0.57	3.75	0.57	7.53	7.0
1	17	2.74	1.50	2.74	1.50	3.32	8.5
1	18	3.90	0.65	3.90	0.65	7.61	9.7
1	19	3.87	0.60	3.87	0.60	7.60	11.3
1	20	3.68	0.53	3.68	0.53	7.22	10.7
1	21	3.67	0.55	3.67	0.55	7.12	12.0

1	22	1.63	1.54	1.63	1.54	0.23	12.3
1	23	4.09	0.68	4.09	0.68	7.71	10.2
1	24	4.18	0.73	4.18	0.73	7.75	7.4
1	25	4.13	0.67	4.13	0.67	7.75	8.1
1	26	4.06	0.59	4.06	0.59	7.70	11.8
1	27	2.27	1.84	2.27	1.84	0.90	11.5
1	28	3.39	1.18	3.39	1.18	5.09	9.5
1	29	3.93	0.57	3.93	0.57	7.30	10.4
1	30	1.63	1.24	1.63	1.24	0.83	11.0
1	31	2.23	1.88	2.23	1.88	0.76	12.9
2	1	4.31	0.69	4.31	0.69	7.54	12.4
2	2	3.56	1.15	3.56	1.15	5.02	12.1
2	3	3.46	1.28	3.46	1.28	4.42	10.9
2	4	3.92	0.83	3.92	0.83	6.28	8.5
2	5	2.70	2.04	2.70	2.04	1.35	10.0
2	6	3.39	1.53	3.39	1.53	3.88	9.4
2	7	3.06	1.88	3.06	1.88	2.33	10.4
2	8	3.44	1.56	3.44	1.56	3.75	9.1
2	9	4.55	0.69	4.55	0.69	7.58	8.8
2	10	4.25	0.79	4.25	0.79	6.77	9.6
2	11	4.65	0.70	4.65	0.70	7.63	10.3
2	12	3.59	1.71	3.59	1.71	3.83	9.8
2	13	4.36	0.82	4.36	0.82	7.20	11.3
2	14	2.51	1.66	2.51	1.66	1.71	6.2
2	15	2.61	1.91	2.61	1.91	1.44	7.3
2	16	4.50	0.84	4.50	0.84	7.29	11.1
2	17	3.00	1.90	3.00	1.90	2.63	11.9

2	18	3.69	1.81	3.69	1.81	3.74	10.7
2	19	4.56	0.96	4.56	0.96	7.04	11.5
2	20	5.34	0.78	5.34	0.78	8.82	12.6
2	21	2.89	2.37	2.89	2.37	0.94	14.9
2	22	2.94	1.81	2.94	1.81	2.65	15.7
2	23	4.75	0.98	4.75	0.98	7.10	13.0
2	24	3.68	2.16	3.68	2.16	2.92	13.2
2	25	2.67	1.44	2.67	1.44	2.39	12.6
2	26	2.89	1.99	2.89	1.99	1.60	11.7
2	27	3.88	2.20	3.88	2.20	3.14	13.7
2	28	3.02	2.32	3.02	2.32	1.09	14.2
3	1	4.85	1.31	4.85	1.31	6.50	13.5
3	2	5.26	0.85	5.26	0.85	7.91	13.3
3	3	4.74	1.64	4.74	1.64	5.62	12.0
3	4	5.89	0.81	5.89	0.81	9.00	11.2
3	5	5.56	0.71	5.56	0.71	8.98	11.6
3	6	5.90	0.73	5.90	0.73	9.34	12.9
3	7	4.19	2.34	4.19	2.34	3.55	12.4
3	8	1.54	1.53	1.54	1.53	0.06	9.6
3	9	0.74	0.74	0.74	0.74	0.00	8.3
3	10	2.86	2.60	2.86	2.60	0.52	10.7
3	11	3.29	2.03	3.29	2.03	2.41	12.6
3	12	5.77	0.95	5.77	0.95	8.47	12.2
3	13	6.04	0.78	6.04	0.78	9.25	13.1
3	14	4.75	2.31	4.75	2.31	4.56	13.7
3	15	3.35	1.85	3.35	1.85	2.04	14.3
3	16	5.75	1.23	5.75	1.23	7.75	14.8

3	17	4.90	2.26	4.90	2.26	4.85	19.3
3	18	6.59	0.81	6.59	0.81	9.77	16.2
3	19	3.54	2.54	3.54	2.54	2.54	15.7
3	20	2.61	2.07	2.61	2.07	1.12	13.9
3	21	3.80	2.64	3.80	2.64	1.92	14.1
3	22	4.10	2.18	4.10	2.18	3.04	15.9
3	23	6.37	0.97	6.37	0.97	8.87	15.0
3	24	6.49	0.91	6.49	0.91	9.16	15.3
3	25	7.09	0.95	7.09	0.95	9.97	15.2
3	26	6.37	1.13	6.37	1.13	8.49	14.6
3	27	6.07	1.62	6.07	1.62	7.26	17.3
3	28	4.67	3.15	4.67	3.15	2.44	16.9
3	29	7.05	0.88	7.05	0.88	9.78	15.6
3	30	6.74	0.98	6.74	0.98	9.16	16.5
3	31	5.61	2.34	5.61	2.34	5.41	18.3
4	1	6.60	1.27	6.60	1.27	8.86	14.0
4	2	6.97	0.89	6.97	0.89	10.00	14.3
4	3	5.39	2.91	5.39	2.91	4.64	11.6
4	4	6.88	1.06	6.88	1.06	9.53	15.3
4	5	5.62	2.92	5.62	2.92	5.10	18.4
4	6	7.47	0.87	7.47	0.87	10.47	17.6
4	7	7.43	0.87	7.43	0.87	10.37	19.4
4	8	3.72	2.38	3.72	2.38	2.30	18.9
4	9	4.27	2.17	4.27	2.17	3.59	18.0
4	10	4.76	2.81	4.76	2.81	3.02	20.0
4	11	3.50	3.22	3.50	3.22	0.52	20.6
4	12	7.12	1.26	7.12	1.26	9.17	17.1

4	13	6.85	1.75	6.85	1.75	8.02	16.3
4	14	6.47	2.21	6.47	2.21	6.66	16.7
4	15	3.12	2.96	3.12	2.96	0.20	15.7
4	16	7.40	1.11	7.40	1.11	9.60	15.1
4	17	7.67	0.95	7.67	0.95	10.23	15.9
4	18	7.68	1.01	7.68	1.01	9.94	14.2
4	19	2.91	2.79	2.91	2.79	0.15	13.0
4	20	4.32	2.88	4.32	2.88	2.35	13.7
4	21	5.09	3.14	5.09	3.14	3.48	13.4
4	22	3.37	3.17	3.37	3.17	0.28	14.7
4	23	7.23	1.78	7.23	1.78	8.03	15.5
4	24	7.02	2.18	7.02	2.18	7.19	14.5
4	25	7.62	1.34	7.62	1.34	9.22	15.0
4	26	7.87	1.09	7.87	1.09	9.84	14.6
4	27	7.60	1.41	7.60	1.41	8.99	15.4
4	28	3.32	3.15	3.32	3.15	0.22	14.9
4	29	5.07	3.61	5.07	3.61	2.13	12.8
4	30	4.64	3.36	4.64	3.36	1.69	12.2
5	1	6.48	2.83	6.48	2.83	5.33	17.9
5	2	5.69	3.32	5.69	3.32	3.96	19.9
5	3	6.33	3.47	6.33	3.47	4.57	20.2
5	4	8.21	1.09	8.21	1.09	10.09	19.1
5	5	7.86	1.41	7.86	1.41	9.21	20.4
5	6	7.32	2.28	7.32	2.28	7.29	20.6
5	7	8.18	1.14	8.18	1.14	9.93	18.8
5	8	7.25	2.36	7.25	2.36	6.93	16.7
5	9	7.09	2.56	7.09	2.56	6.55	16.0

5	10	8.27	1.15	8.27	1.15	9.97	15.3
5	11	7.89	1.59	7.89	1.59	8.87	17.3
5	12	8.22	1.25	8.22	1.25	9.77	14.6
5	13	5.89	3.39	5.89	3.39	4.00	17.1
5	14	4.03	2.80	4.03	2.80	2.07	16.2
5	15	4.07	3.61	4.07	3.61	0.62	19.5
5	16	5.47	3.24	5.47	3.24	3.46	18.5
5	17	7.15	2.67	7.15	2.67	6.26	18.2
5	18	8.64	1.13	8.64	1.13	10.36	17.7
5	19	6.90	2.93	6.90	2.93	5.69	19.3
5	20	8.36	1.33	8.36	1.33	9.72	24.5
5	21	4.55	2.07	4.55	2.07	3.02	23.5
5	22	5.44	3.20	5.44	3.20	3.77	22.4
5	23	4.95	2.90	4.95	2.90	3.79	22.7
5	24	7.39	2.52	7.39	2.52	7.15	21.2
5	25	8.18	1.61	8.18	1.61	9.52	21.6
5	26	5.16	2.79	5.16	2.79	4.34	22.1
5	27	4.21	2.95	4.21	2.95	2.02	23.1
5	28	7.87	2.22	7.87	2.22	8.50	25.6
5	29	8.82	1.04	8.82	1.04	11.50	21.9
5	30	8.13	1.80	8.13	1.80	9.41	20.9
5	31	8.74	1.07	8.74	1.07	11.35	21.4
6	1	8.21	1.71	8.21	1.71	9.71	23.5
6	2	8.87	1.03	8.87	1.03	11.59	23.8
6	3	7.54	2.64	7.54	2.64	7.52	24.0
6	4	7.40	2.65	7.40	2.65	6.96	20.8
6	5	4.99	2.29	4.99	2.29	3.99	23.0

6	6	7.23	2.88	7.23	2.88	6.51	22.3
6	7	7.87	2.31	7.87	2.31	8.34	21.9
6	8	8.60	1.26	8.60	1.26	10.86	21.3
6	9	8.51	1.35	8.51	1.35	10.58	22.7
6	10	9.16	1.00	9.16	1.00	12.08	23.3
6	11	8.67	1.19	8.67	1.19	10.97	24.2
6	12	8.96	1.05	8.96	1.05	11.61	24.5
6	13	8.85	1.08	8.85	1.08	11.44	24.4
6	14	8.89	1.07	8.89	1.07	11.60	24.7
6	15	7.03	3.02	7.03	3.02	5.91	23.4
6	16	8.81	1.11	8.81	1.11	11.32	25.0
6	17	9.15	1.00	9.15	1.00	12.01	25.5
6	18	8.78	1.16	8.78	1.16	11.04	26.5
6	19	8.37	1.61	8.37	1.61	9.89	30.1
6	20	7.61	2.55	7.61	2.55	7.34	29.4
6	21	5.27	4.06	5.27	4.06	1.64	28.3
6	22	3.71	3.42	3.71	3.42	0.34	27.5
6	23	8.54	1.37	8.54	1.37	10.37	27.9
6	24	7.80	2.33	7.80	2.33	8.17	27.0
6	25	8.63	1.25	8.63	1.25	10.81	28.7
6	26	8.03	2.18	8.03	2.18	8.76	25.5
6	27	8.14	1.95	8.14	1.95	9.14	24.9
6	28	8.40	1.55	8.40	1.55	10.11	23.9
6	29	7.35	2.75	7.35	2.75	6.93	25.2
6	30	5.29	3.16	5.29	3.16	3.87	26.0
7	1	8.75	1.15	8.75	1.15	11.05	27.7
7	2	8.41	1.48	8.41	1.48	10.20	29.0

7	3	7.83	2.43	7.83	2.43	7.67	29.4
7	4	8.65	1.23	8.65	1.23	10.44	26.9
7	5	8.40	1.45	8.40	1.45	9.80	27.0
7	6	8.67	1.18	8.67	1.18	10.61	26.4
7	7	8.69	1.16	8.69	1.16	10.66	27.4
7	8	8.90	1.92	8.90	1.92	10.22	29.2
7	9	8.23	1.64	8.23	1.64	9.40	31.7
7	10	7.68	2.54	7.68	2.54	7.41	29.8
7	11	8.28	1.53	8.28	1.53	9.58	28.8
7	12	8.62	1.16	8.62	1.16	10.51	28.5
7	13	8.54	1.20	8.54	1.20	10.46	28.6
7	14	7.94	2.00	7.94	2.00	8.53	25.6
7	15	8.18	1.60	8.18	1.60	9.34	25.0
7	16	8.05	1.78	8.05	1.78	8.91	26.1
7	17	7.86	2.06	7.86	2.06	8.39	27.6
7	18	8.19	1.51	8.19	1.51	9.53	30.2
7	19	7.90	1.93	7.90	1.93	8.55	30.4
7	20	8.00	1.75	8.00	1.75	8.97	27.2
7	21	7.98	1.75	7.98	1.75	8.96	34.1
7	22	8.53	1.10	8.53	1.10	10.67	32.9
7	23	7.95	1.74	7.95	1.74	9.00	31.0
7	24	8.42	1.13	8.42	1.13	10.47	30.0
7	25	7.84	1.86	7.84	1.86	8.65	28.1
7	26	7.69	2.04	7.69	2.04	8.09	26.6
7	27	7.89	1.69	7.89	1.69	8.90	28.3
7	28	7.91	1.65	7.91	1.65	9.08	29.6
7	29	8.06	1.38	8.06	1.38	9.66	31.4

7	30	8.18	1.24	8.18	1.24	10.00	28.0
7	31	8.01	1.37	8.01	1.37	9.58	30.6
8	1	8.40	1.06	8.40	1.06	10.64	27.5
8	2	7.65	1.84	7.65	1.84	8.45	26.9
8	3	7.88	1.45	7.88	1.45	9.39	25.9
8	4	8.34	1.05	8.34	1.05	10.57	24.7
8	5	8.12	1.13	8.12	1.13	10.14	26.6
8	6	7.83	1.39	7.83	1.39	9.00	26.4
8	7	7.55	1.78	7.55	1.78	8.12	25.3
8	8	7.85	1.31	7.85	1.31	9.20	26.7
8	9	8.05	1.16	8.05	1.16	9.66	26.1
8	10	7.59	1.58	7.59	1.58	8.52	27.4
8	11	8.17	1.13	8.17	1.13	9.91	28.3
8	12	7.02	2.31	7.02	2.31	6.72	28.9
8	13	7.96	1.09	7.96	1.09	9.76	27.7
8	14	7.27	1.86	7.27	1.86	7.72	29.1
8	15	5.89	2.97	5.89	2.97	3.87	27.7
8	16	6.51	2.65	6.51	2.65	5.62	28.0
8	17	7.44	1.47	7.44	1.47	8.63	30.1
8	18	7.94	1.00	7.94	1.00	10.05	31.7
8	19	7.23	1.69	7.23	1.69	8.12	32.5
8	20	7.55	1.18	7.55	1.18	9.27	30.5
8	21	7.25	1.53	7.25	1.53	8.35	28.6
8	22	5.93	2.88	5.93	2.88	4.61	27.0
8	23	7.38	1.20	7.38	1.20	9.18	27.2
8	24	7.61	0.98	7.61	0.98	9.88	28.1
8	25	7.17	1.42	7.17	1.42	8.70	29.7

8	26	7.39	1.09	7.39	1.09	9.46	28.8
8	27	7.53	0.95	7.53	0.95	9.90	29.6
8	28	7.25	1.15	7.25	1.15	9.30	29.4
8	29	6.92	1.53	6.92	1.53	8.22	28.4
8	30	7.26	1.03	7.26	1.03	9.50	29.3
8	31	5.96	2.59	5.96	2.59	5.24	30.9
9	1	5.37	3.04	5.37	3.04	4.30	25.9
9	2	4.74	2.98	4.74	2.98	2.96	26.2
9	3	7.16	0.96	7.16	0.96	9.60	26.7
9	4	6.76	1.38	6.76	1.38	8.39	28.2
9	5	6.54	1.66	6.54	1.66	7.77	27.4
9	6	6.32	1.92	6.32	1.92	7.15	25.6
9	7	6.82	1.08	6.82	1.08	9.23	24.1
9	8	7.00	0.88	7.00	0.88	9.82	25.1
9	9	6.01	2.09	6.01	2.09	6.32	22.7
9	10	4.75	2.82	4.75	2.82	3.83	21.7
9	11	6.12	1.83	6.12	1.83	7.07	22.8
9	12	5.70	2.21	5.70	2.21	5.74	23.2
9	13	6.73	0.90	6.73	0.90	9.65	23.4
9	14	6.19	1.56	6.19	1.56	7.83	24.6
9	15	6.62	0.90	6.62	0.90	9.51	23.6
9	16	3.05	2.13	3.05	2.13	1.69	22.1
9	17	2.21	2.13	2.21	2.13	0.15	21.5
9	18	5.24	2.35	5.24	2.35	4.75	23.6
9	19	6.42	0.90	6.42	0.90	9.31	22.4
9	20	5.50	1.97	5.50	1.97	6.22	22.0
9	21	6.73	0.78	6.73	0.78	10.16	22.2

9	22	6.66	0.84	6.66	0.84	9.58	21.8
9	23	5.99	1.21	5.99	1.21	7.91	22.6
9	24	6.08	1.01	6.08	1.01	8.41	23.1
9	25	5.45	1.78	5.45	1.78	6.26	23.0
9	26	6.37	0.80	6.37	0.80	9.35	21.3
9	27	4.74	2.41	4.74	2.41	4.05	21.0
9	28	3.72	2.78	3.72	2.78	1.48	19.8
9	29	5.62	1.24	5.62	1.24	7.12	20.7
9	30	4.76	2.23	4.76	2.23	4.40	20.2
10	1	4.98	1.90	4.98	1.90	5.19	17.8
10	2	5.49	1.21	5.49	1.21	7.12	16.9
10	3	5.44	1.19	5.44	1.19	7.08	18.4
10	4	5.34	1.24	5.34	1.24	6.88	19.3
10	5	5.00	1.65	5.00	1.65	5.63	20.3
10	6	4.54	2.02	4.54	2.02	4.29	20.5
10	7	4.75	1.77	4.75	1.77	5.15	21.0
10	8	5.59	0.81	5.59	0.81	8.18	20.1
10	9	4.93	1.49	4.93	1.49	6.00	21.4
10	10	4.55	1.83	4.55	1.83	4.73	24.1
10	11	4.88	1.33	4.88	1.33	6.21	25.1
10	12	5.24	0.85	5.24	0.85	7.69	23.2
10	13	4.00	2.12	4.00	2.12	3.42	22.7
10	14	4.08	2.19	4.08	2.19	3.69	22.3
10	15	2.64	2.36	2.64	2.36	0.47	21.6
10	16	5.00	0.87	5.00	0.87	7.44	19.9
10	17	4.71	1.13	4.71	1.13	6.66	20.8
10	18	5.20	0.65	5.20	0.65	8.48	20.7

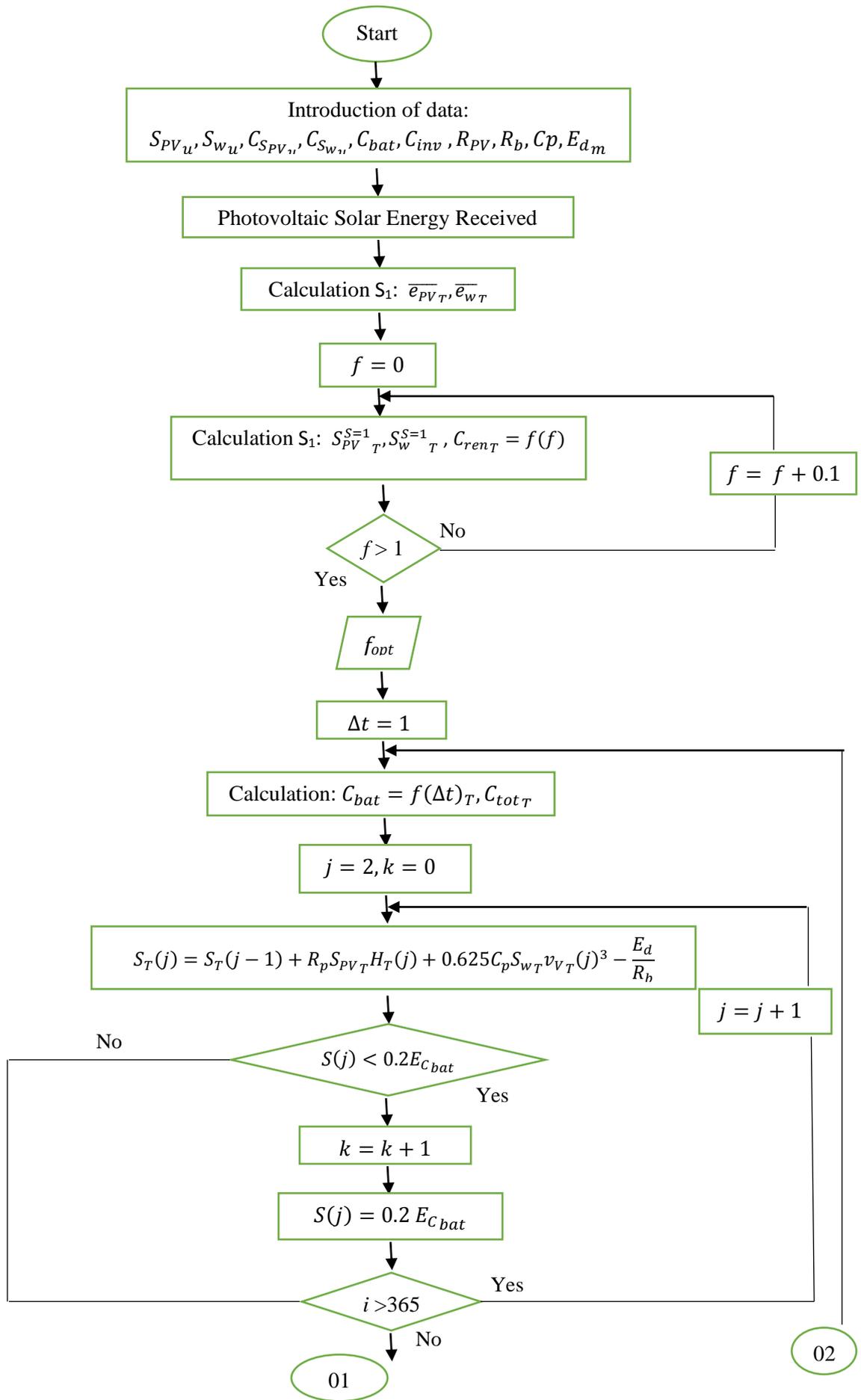
10	19	4.93	0.75	4.93	0.75	7.86	19.5
10	20	4.76	0.86	4.76	0.86	7.40	21.6
10	21	4.07	1.60	4.07	1.60	4.68	21.2
10	22	3.56	2.12	3.56	2.12	2.75	19.6
10	23	3.74	1.89	3.74	1.89	3.56	18.6
10	24	3.10	2.36	3.10	2.36	1.48	18.9
10	25	4.19	1.33	4.19	1.33	5.56	17.3
10	26	3.96	1.52	3.96	1.52	4.87	15.6
10	27	4.81	0.61	4.81	0.61	8.36	16.4
10	28	4.54	0.69	4.54	0.69	7.70	14.9
10	29	3.69	1.61	3.69	1.61	3.66	18.2
10	30	4.41	0.70	4.41	0.70	7.49	18.8
10	31	4.51	0.61	4.51	0.61	8.02	18.0
11	1	3.53	1.60	3.53	1.60	3.79	10.7
11	2	3.92	1.13	3.92	1.13	5.84	11.0
11	3	3.89	1.14	3.89	1.14	5.79	12.1
11	4	4.64	0.65	4.64	0.65	8.46	11.9
11	5	4.17	0.66	4.17	0.66	7.42	13.7
11	6	3.98	0.79	3.98	0.79	6.88	13.4
11	7	2.54	1.93	2.54	1.93	1.82	13.9
11	8	3.24	1.54	3.24	1.54	3.70	17.0
11	9	2.07	1.89	2.07	1.89	0.45	17.5
11	10	3.37	1.30	3.37	1.30	4.68	19.0
11	11	2.76	1.59	2.76	1.59	2.96	19.9
11	12	4.36	0.73	4.36	0.73	7.78	16.6
11	13	4.27	0.68	4.27	0.68	7.75	15.7
11	14	3.91	0.59	3.91	0.59	7.23	15.2

11	15	3.95	0.56	3.95	0.56	7.42	12.7
11	16	2.55	1.85	2.55	1.85	1.62	13.4
11	17	2.20	1.79	2.20	1.79	0.87	14.7
11	18	2.83	1.41	2.83	1.41	2.90	12.9
11	19	1.50	1.32	1.50	1.32	0.33	17.8
11	20	3.56	0.64	3.56	0.64	6.59	16.2
11	21	3.65	0.56	3.65	0.56	6.98	13.9
11	22	3.81	0.56	3.81	0.56	7.40	13.0
11	23	2.91	1.36	2.91	1.36	3.80	14.3
11	24	2.29	1.29	2.29	1.29	2.40	11.3
11	25	3.89	0.66	3.89	0.66	7.57	13.1
11	26	3.94	0.73	3.94	0.73	7.57	12.4
11	27	3.69	0.56	3.69	0.56	7.40	11.6
11	28	3.85	0.70	3.85	0.70	7.42	10.3
11	29	3.10	0.87	3.10	0.87	5.26	9.0
11	30	3.76	0.64	3.76	0.64	7.48	9.7
12	1	3.69	0.60	3.69	0.60	7.44	10.5
12	2	3.60	0.57	3.60	0.57	7.35	8.6
12	3	3.57	0.66	3.57	0.66	6.57	12.1
12	4	3.56	0.67	3.56	0.67	6.57	12.4
12	5	3.64	0.90	3.64	0.90	6.26	9.8
12	6	2.57	1.37	2.57	1.37	3.09	9.6
12	7	2.38	1.32	2.38	1.32	2.49	10.0
12	8	3.24	0.59	3.24	0.59	6.11	11.0
12	9	2.66	1.24	2.66	1.24	3.40	9.3
12	10	3.10	0.65	3.10	0.65	5.68	10.7
12	11	1.98	1.40	1.98	1.40	1.36	8.3

12	12	2.37	1.30	2.37	1.30	2.51	11.4
12	13	3.36	0.59	3.36	0.59	6.45	10.3
12	14	2.80	0.97	2.80	0.97	4.36	12.6
12	15	3.06	0.64	3.06	0.64	5.70	13.7
12	16	3.28	0.57	3.28	0.57	6.37	15.5
12	17	2.57	1.10	2.57	1.10	3.50	13.1
12	18	3.07	0.60	3.07	0.60	5.83	16.5
12	19	2.12	1.47	2.12	1.47	1.70	14.5
12	20	1.94	1.36	1.94	1.36	1.28	14.0
12	21	2.52	1.04	2.52	1.04	3.34	9.1
12	22	1.98	1.33	1.98	1.33	1.59	12.8
12	23	2.15	1.13	2.15	1.13	2.52	11.2
12	24	2.74	0.96	2.74	0.96	4.25	7.0
12	25	2.49	1.29	2.49	1.29	2.92	6.3
12	26	2.10	1.26	2.10	1.26	2.18	7.6
12	27	3.08	0.63	3.08	0.63	5.79	8.0
12	28	2.27	1.40	2.27	1.40	2.14	8.8
12	29	1.96	1.48	1.96	1.48	1.05	11.9
12	30	1.47	1.25	1.47	1.25	0.55	13.2
12	31	3.47	0.67	3.47	0.67	6.54	11.7

Annexe B

La figure ci-dessous représente l'organigramme de l'algorithme utilisé pour notre étude.



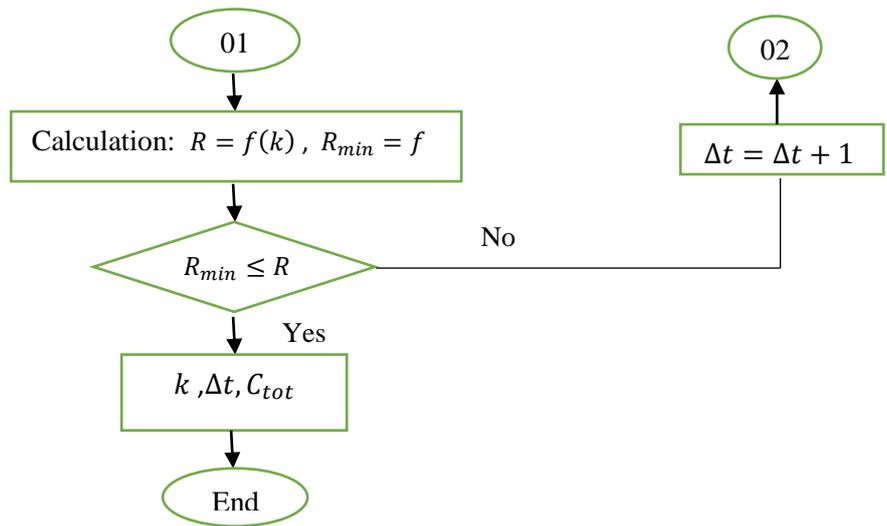


Figure B.1 : Organigramme de l'algorithme proposé.

Publications

OPTIMAL SIZING OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC/WIND SYSTEM SUPPLYING A DESALINATION UNIT

B. FELLAH*, B. BENYOUCEF, A. CHERMITI, M. BELARBI, S. AMARA

Research Unit Materials and Renewable Energy, Department of Physics,
University of Tlemcen, BP: 119 Tlemcen 13000, Algeria
*Corresponding author: boumediene.fellah@gmail.com

Abstract

This work presents the dimensioning of a wind-photovoltaic hybrid system for the supply of a seawater desalination plant (reverse osmosis desalination) located in Honaïne in the Tlemcen coastal region of Algeria. The plant has a production capacity of 200,000 m³/day and supplies potable water for a population of about 555,000 people (the plant's energy demand is 1,825 MW). The main idea is to present a method for sizing and optimizing a hybrid system by introducing two scenarios: the first scenario treats the operation of the plant under good weather conditions. The second one introduces the notion of the worst month (poor weather conditions). For it, we developed a calculation code (Programming under the MATLAB environment) that allowed us to determine the size and optimization of the system, as well as the optimal technical and economic configuration (numbers of photovoltaic panels, wind turbines and batteries), as well as the total cost. The results obtained show on the one hand: the complementarity of the two scenarios, which allows a better reliability of the system, and this by using a number well defined of panels, wind turbines and batteries to ensure the long-term operation of the plant. On the other hand, the use of the hybrid system has allowed us to obtain a 51.46% benefit compared to fossil fuels, which gives the proposed study an important reliability, since it offers a very advantageous benefit in terms of cost and efficiency.

Keywords: Batteries, Cost, Desalination, Hybrid photovoltaic-wind system, Optimization technique.

1. Introduction

Algeria and other countries in the world are confronted with two major problems necessary for all developments: access to potable water and energy supply. The rational use of these two resources represents a major challenge, because the rapid

Nomenclatures

C_{bat}	Battery Capacity, Ah
C_{ff}	Total cost using fossil fuels, \$
C_{kWh}	Price of 1 kWh of electricity, \$
C_M	Maintenance cost, \$
C_p	Wind turbine coefficient of performance
C_{RE}	Total cost using renewable energy, \$
E_d	The desalination plant energy, MW
E_{PV}	Photovoltaic energy, kWh
E_w	Wind energy, kWh
f	Permeability
H	Solar irradiation, W/m ²
I_{MP}	Current at Maximum Power, A
N_d	The deficit days
N_m	Number of days of the worst month
N_{Tot}	Total number of operating days (365 days).
R_{PV}	Photovoltaic generator efficiency
S_{PV}	Surface of photovoltaic panels, m ²
S_w	Wind turbine rotor swept surface, m ²
V	Wind speed, m/s
V_{MP}	Voltage at Maximum Power, V
V_{sys}	Nominal system voltage, V

Abbreviations

AC	Alternating Current
CREG	Organism in Charge Of Regulating the Energy Market
DC	Direct Current
DZD	Algerian Dinar
PV	Photovoltaic
RO	Reverse Osmosis
SDA	Algiers Electricity and Gas Distribution Company
SDC	Central and Southern Electricity and Gas Distribution Company
SDE	Eastern Electricity and Gas Distribution Company
SDO	Western Electricity and Gas Distribution Company

increase in water needs, due to population growth, the improvement of the standard of living of the populations and the development needs, make it necessary to build new installations for the production of potable water, such as seawater desalination units (energy-intensive processes)[1-3].

Therefore, in this state, the use of seawater desalination through renewable energies [4, 5], becomes an alternative and promising solution for the environment; the use of hybrid energy systems (photovoltaic-wind) [6-9], guarantees the long-term functioning [10-12].

Reverse osmosis desalination units supplied by a hybrid system have been the subject of several studies [13-19]. Mohamed and Papakadis [13], presented a tool for the design of a desalination unit using reverse osmosis technology, powered by hybrid system (PV-wind) to produce potable water, to a village of 60 inhabitants in Chania, Greece.

Koutroulis and Kolokotsa [14], propose an alternative methodology based on genetic algorithms for the optimal sizing of desalination units powered by PV and wind energy sources. Smaoui et al. [15] have developed a new algorithm for optimal sizing using the iterative optimization technique. This optimization approach determines the optimal configuration of a PV/wind/ hydrogen system. A case study was carried out to analyse a hybrid project to supply a seawater desalination unit installed on the Kerkennah islands in southern Tunisia. Spyrou and Anagnostopoulos [16] presented the optimal strategy for designing and operating an autonomous hybrid desalination system, capable of meeting the freshwater demand of an island or other remote coastal regions. The project consists of a reverse osmosis desalination unit powered by wind and solar systems, as well as a storage unit [20, 21]; a specific computer algorithm is developed to simulate in detail the entire plant operation and to carry out an economic evaluation of the investment.

The main objective of the proposed study is to ensure the desalination plant's energy demand, using the hybrid system (PV-wind turbine), for which two scenarios are needed. The first is based on the average of annual monthly values, in which the size of photovoltaic generators and wind turbines is determined from the average monthly values of each component. In the second scenario, the determination of the sizes of these two system components is based on the most unfavourable month (defined as the month that requires the greatest use of the photovoltaic and wind generator surface). Through these calculations, it will be possible to determine the size and optimization of the system, the technical-economic configuration [22-24] as well as the rate of benefit obtained from the hybrid system compared to fossil fuels.

2. Presentation of the "Honaïne" Desalination Plant

The "Honaïne" seawater desalination plant [25-27] (Fig. 1 [28]) (69 kilometres north of the town of Tlemcen, north-western Algeria), started in 2006 by the Spanish Geida group (Composed of companies: Cobra, Sadyt, Befesa and Codesa), it was operational in July 2012, with an investment amount of \$250 million. Its production capacity is 200.000 m³/day, ensuring the supply of potable water for a population of 555,000 inhabitants [29]. The specific desalination energy of this unit is 43,800 kWh / day, with a daily power of 1825 kW.



Fig. 1. Desalination Station-Honaïne – Tlemcen [28].

3. System Overview

In order to ensure the energy requirements of the desalination unit (The station uses reverse osmosis (RO) technology) [30, 31], the system (Fig. 2) will consist of photovoltaic panels, wind turbines, batteries and inverters (to convert DC to AC).

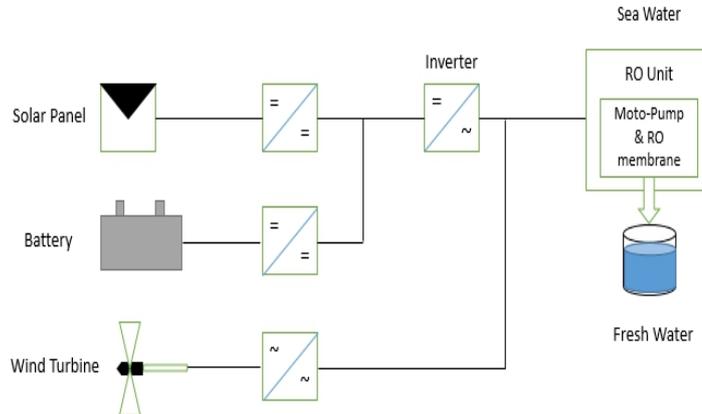


Fig. 2. Block diagram of the hybrid photovoltaic-wind-battery system.

Tables 1 to 5 represent the characteristics of each system component (PV module; wind turbine; battery; inverter [32-37]).

Table 1. Specifications of the PV module.

Name	Sunforte PM096B00
Nominal Power	333 Watt
Dimensions (L x W x H)	1559 x 1046 x 46 mm
V _{MP}	54.7 V
I _{MP}	6.09 A
Open Circuit Voltage	64.9 V
Short Circuit Current	6.58 A
Maximum System Voltage	1000 V
Module Efficiency	20.4%
Performance Guarantee	25 Years
Cost	\$444,857

Table 2. Specifications of the wind turbine.

Name	Aeolos-H 50kw
Maximal Power	50Kw
Rotor Diameter	18 m
Swept Area	254.34 m ²
Efficiency	90%
Design Lifetime	20 Years
Cost	\$75000

Table 3. Wind speed and power output of the wind turbine.

Wind Speed (m/s)	Power Output (kW)
3.0	0.54
3.5	0.90
4.0	1.92
4.5	3.75
5.0	5.99
5.5	8.71
6.0	11.96
6.5	16.03
7.0	20.53
7.5	25.88
8.0	32.18
8.5	38.59
9.0	45.81
9.5	50.03

Table 4. Specifications of the battery.

Name	Battery Pack ProPower
Operating voltage Pack	48 V
Storage	9600 W
Life-cycle	3500
Number of batteries in the Pack	8
Battery capacity	100 Ah
Design Lifetime	15 Years
Cost	\$2034.044

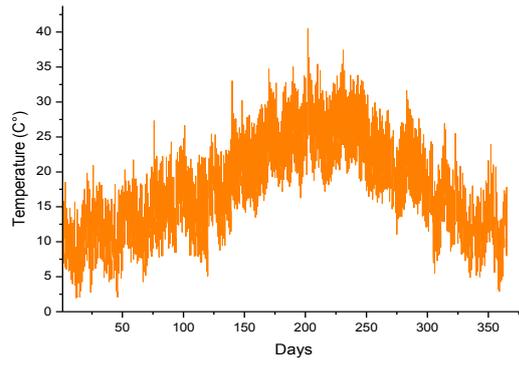
Table 5. Specifications of the inverter.

Name	CP100-Inverter
Output Type	Triple
Max power	115 kW
Output Current	160 A
Output Frequency	50Hz/60 Hz
Start voltage	500 V
Input Voltage	450-1000V
Efficiency	97.1%
Cost	\$9667.425

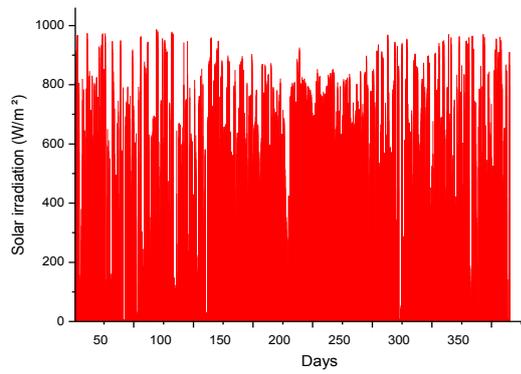
4. Sizing of Hybrid System [38, 39]

4.1. Climate data and energy received

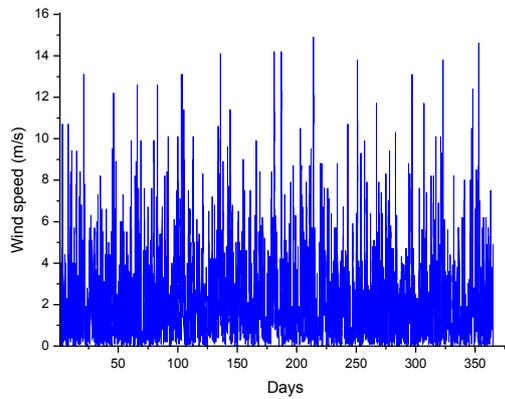
Figures 3 represent the daily climatic data [40, 41] of the studied site for one year (Honaïne-Tlemcen, Algeria). Figure 3(a) illustrates the atmospheric temperature, the latter reaches its apogee during the period from the 200th day to the 250th day with maximum temperatures at around 40°C. Figure 3(b) shows the daily solar irradiation of the studied site, this region is characterized by a large solar potential, with an annual average of 850 w/m². Figure 3(c) shows the daily wind speed, reaching an annual average value of 4.5 m/s.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Meteorological conditions for the studied site: (a) Daily temperature (b) Daily solar irradiation- (c) Daily wind speed [40-41].

The hybrid energy received by the photovoltaic-wind system is illustrated in Fig. 4. The profile of this energy is almost constant during the period from the 20th day to the end of the year, which means that the system can cover the charge without using the batteries. On the other hand, at the beginning of the year, we notice the presence of five deficit days (2, 10, 12, 16, and the 18th day), these days represent an increased energy deficiency, hence the need to use the energy stored by the batteries.

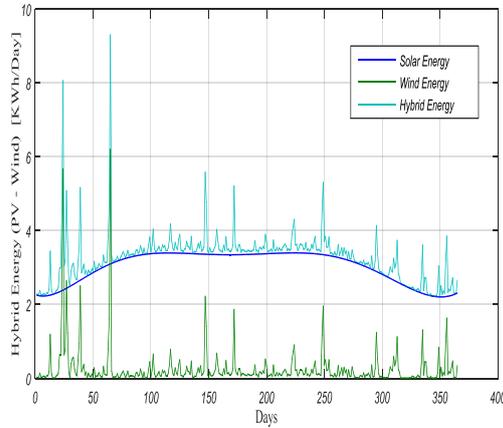


Fig. 4. Hybrid energy received (PV-wind).

4.2. System performance and determination of the worst month [38, 39]

The monthly energy produced by the system is noted $E_{PV,m}$ (kWh / m^2) for photovoltaic, and $E_{w,m}$ (kWh / m^2) for wind turbine (Where $m = 1, 2, 3, \dots, 12$, represents the month of the year) and E_d the required energy. Surfaces of panels and wind turbines for 100% load coverage, during the worst month are given by:

$$S_{PV} = \text{Max} \left(\frac{E_d}{E_{PV}} \right) \quad (1)$$

$$S_w = \text{Max} \left(\frac{E_d}{E_w} \right) \quad (2)$$

4.3. Size of renewable components [38, 39]

The total energy produced by the two photovoltaic and wind generators is expressed by:

$$E_{PV} \cdot S_{PV} + E_w \cdot S_w = E_d \quad (3)$$

Using both renewable sources, the load is divided into two parts. If f is considered as the fraction of the charge given by the photovoltaic system (permeability), then the additional demand $(1 - f)$ must be satisfied by the wind system. The limit values of f correspond to pure systems. Indeed, $f = 1$ corresponds to 100% use of photovoltaic energy and $f = 0$ represents 100% use of the wind system. The presented study is based on a hybrid system (50% photovoltaic, 50% wind), which corresponds to a permeability of $f = 0.5$.

So equations (1) and (2) become:

$$S_{PV} \cdot E_{PV} = f \cdot E_d \tag{4}$$

$$S_w \cdot E_w = (1 - f) \cdot E_d \tag{5}$$

with

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot S_{PV} \cdot H \tag{6}$$

$$E_w = 0,6125 \cdot C_p \cdot S_w \cdot V^3 \tag{7}$$

4.4. Processed scenarios [38, 39]

The two scenarios considered in this study ($S = 1$ and $S = 2$), are based respectively on the annual averages for each month, and the mean for the worst month of the total energy.

4.4.1. Scenario 1 ($S = 1$), annual averages for each month

In this scenario, we have determined the surfaces of the photovoltaic panels and wind turbines, based on the annual average values, which are noted $\overline{E_{PV}}$ and $\overline{E_w}$.

The load is noted $\overline{E_d}$ and the surfaces of the solar and wind components are given by the following equations:

$$S_{PV}^{S=1} = f \frac{\overline{E_d}}{\overline{E_{PV}}} \tag{8}$$

$$S_w^{S=1} = (1 - f) \frac{\overline{E_d}}{\overline{E_w}} \tag{9}$$

4.4.2. Scenario 2 ($S = 2$), the worst month method

For this scenario, the surfaces are determined to take into account the worst month. The area required for renewable components is given by:

$$S_{PV}^{S=2} = f \text{Max} \left(\frac{\overline{E_d}}{\overline{E_{PV}}} \right) \tag{10}$$

$$S_w^{S=2} = (1 - f) \text{Max} \left(\frac{\overline{E_d}}{\overline{E_w}} \right) \tag{11}$$

4.5. The autonomy coefficient R [38, 39]

The autonomy coefficient is calculated from the ratio between the total number of days of energy deficiency and the total number of operating days. In the measurement and optimization system, the autonomy criterion is $R \geq R_{min}$; R_{min} represents the minimum fraction of the allocated time for which the system must cover the request.

$$R = 1 - \frac{Nd}{N_{tot}} \tag{12}$$

4.6. Storage system capacity [38, 39]

The size of the storage battery is determined from the maximum requested load $E_{d,max}$ (Maximum monthly charge). The capacity of the battery (in Ah), for a period Δt is given by the following equation:

$$C_{bat} = \frac{E_{d,max} \cdot 1000}{V_{sys}} \cdot \frac{\Delta t}{N_m} \quad (13)$$

The actual battery capacity is determined from the capacity of a battery unit $C_{bat,u}$, as in the case of photovoltaic and wind generator surfaces. It is given by the following equation:

$$C_{bat,u} = C^{te} C_{bat,u} \quad (14)$$

where: C^{te} : Constant given by the entire part of the report $\left(\frac{C_{bat}}{C_{bat,u}}\right)$.

5. Method of Resolution

The resolution procedure we have developed is divided into two parts. In the first part, we determined the optimal economic configuration of the renewable component, regardless of battery capacity. We have varied the fraction f from a step of 0.1 ($0 \leq f \leq 1$) and for each value of f the surface area of the renewable components is calculated from equations 8, 9, 10, and 11, using both scenarios 1 and 2. Then, taking into account the costs of the renewable components of the studied hybrid system ($f = 0.5$), we determined the optimal triplet (f, S_{PV}, S_w).

In the second part, we calculated the capacity of the batteries from equations 13 and 14 for a given period Δt . The simulation that we then used is based on a daily analysis of the $S(d)$ energy contained in the batteries. $S(d)$ depends on the standby charge state ($S(d-1)$), renewable component energy ($E_{PV} + E_w$) and the consumption provided by the storage system ($\frac{E_d}{R_b}$), where R_b represents the efficiency of the batteries. If $S(d)$ is less than 20% of the capacity of the batteries, this means that the demand is not entirely satisfied during this day. The day d is then counted as an energy deficit day. From these deficit days, we calculated the autonomy coefficient R .

6. Results and Discussions

6.1. Scenario 1

Figures 5 to 9 obtained from the first scenario (meteorological conditions are normal throughout the year) show the variation in the number of panels and wind turbines, their surfaces and the total cost as a function of permeability f . It can be seen that the permeability f varies from 0 to 1 with a step of 0.1, such that for $f = 0$, the system is pure wind energy, on the other hand for $f = 1$, the system is considered as pure photovoltaic. The presented study is based on a hybrid system (50% Photovoltaic, 50% Wind), which corresponds to a permeability of $f = 0.5$.

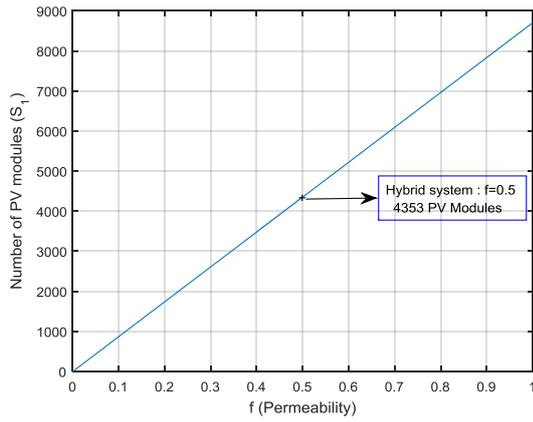


Fig. 5. Number of PV modules (scenario 1).

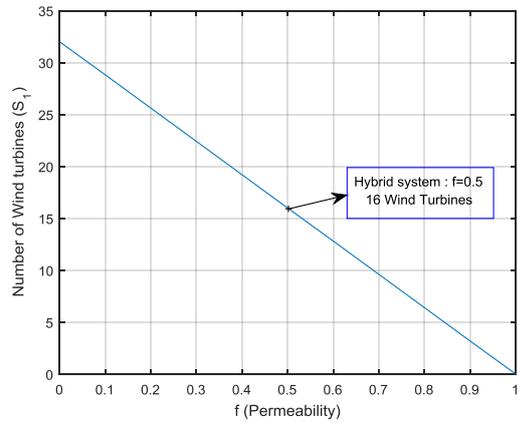


Fig. 6. Number of wind turbines (scenario 1).

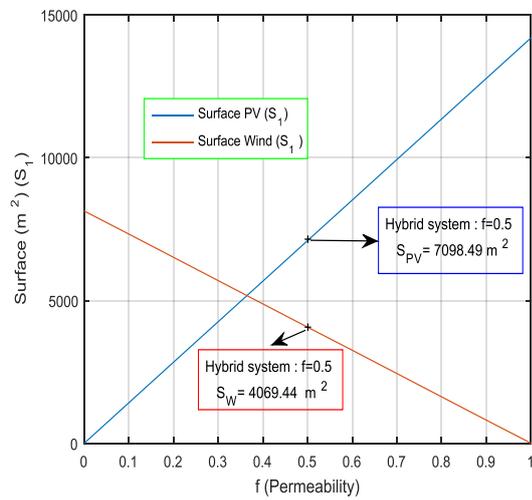


Fig. 7. Surface (scenario 1).

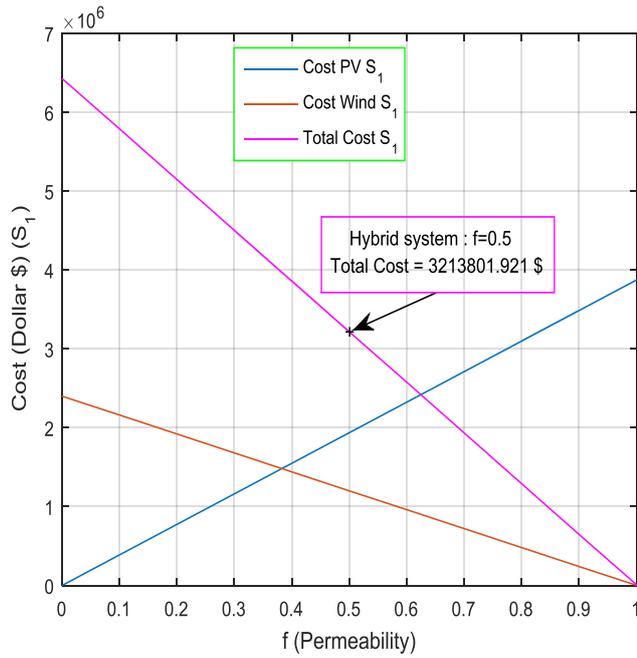


Fig. 8. Total cost (dollar (\$)) (scenario 1).

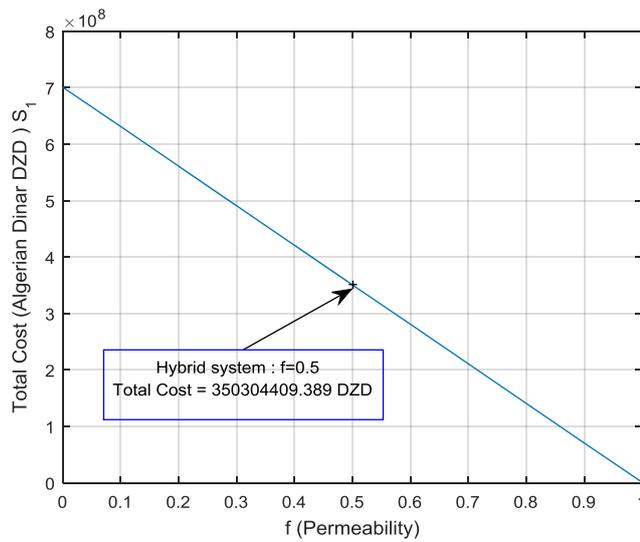


Fig. 9. Total cost (Algerian dinar DZD) (scenario 1).

According to Figs. 5 to 9 and from scenario 1, to ensure the required load, one needs:

- 4353 Panels with an area equal to $S_{PV}= 7098.5 \text{ m}^2$;
- 16 Wind turbines with an area equal to $S_W= 4069.44 \text{ m}^2$;

- 8 Inverters (In order to convert the direct current (DC) into alternating current (AC).

The total cost obtained from scenario 1 is:

- Total cost in dollars = \$3213801.921;
- Total cost in dinars = \$350304409.389 DZD (\$1=109 DZD [42]).

6.2. Scenario 2

Figures obtained from the second scenario (weather conditions are unfavourable compared to the first one, resulting in an increase in system size) represent the variation in the number of panels and wind turbines, their surfaces and the total cost as a function of the permeability f .

The second scenario introduces the notion of the worst month, such as the presence of five loss-making days (2, 10, 12, 16, and the 18^{me} day), hence the need to use a storage system.

So to solve this energy deficit, we need:

- 951 battery. (Type of battery used : Lead-carbon battery LC1000-100Ah /C10 [34, 35])

Figures 10 to 14 show that to ensure the total energy demand for continuous operation, one needs:

- 5070 Panels with an area equal to $S_{PV}= 8267.72 \text{ m}^2$;
- 19 Wind turbines with an area equal to $S_W= 4832.46 \text{ m}^2$;
- 101 inverters.

The total cost obtained from Scenario 2 is:

- Total cost in dollars= \$4898886.151;
- Total cost in dinars= \$533978590.459 DZD.

It can be concluded that the complementarity between the two scenarios makes it possible to ensure the long-term continuous operation of the desalination plant.

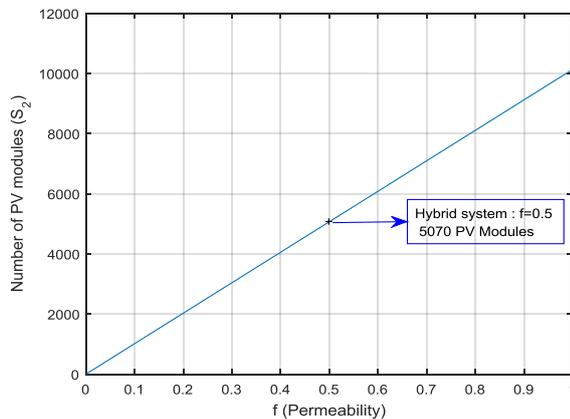


Fig. 10. Number of PV modules (scenario 2).

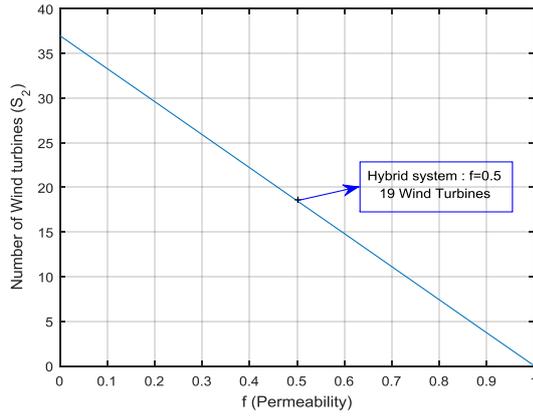


Fig. 11. Number of wind turbines (scenario 2).

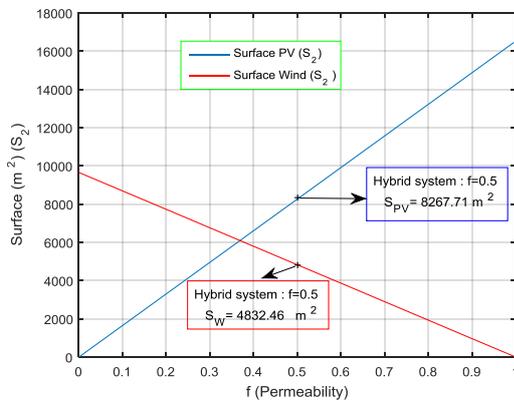


Fig. 12. Surface (scenario 2).

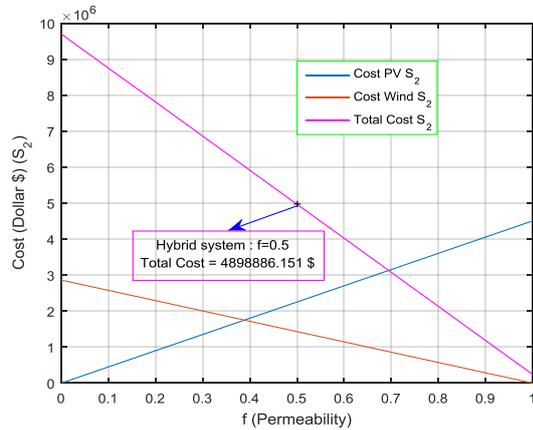


Fig. 13. Total cost (dollar (\$)) (scenario 2).

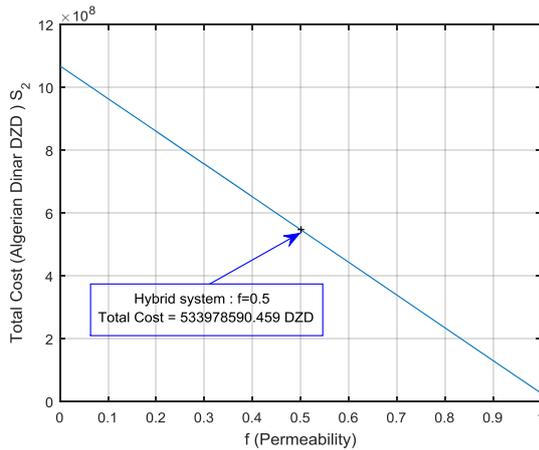


Fig. 14. Total cost (Algerian dinar DZD) (scenario 2).

6.3. Hybrid system cost compared to fossil fuels

Electricity is supplied in Algeria by four Sonelgaz subsidiaries: SDA (Algiers Electricity and Gas Distribution Company), SDC (Central and Southern Electricity and Gas Distribution Company), SDO (Western Electricity and Gas Distribution Company) and SDE (Eastern Electricity and Gas Distribution Company) [43]. A kilowatt-hour is an energy required to run a 1000-power unit for one hour. The prices per kWh of electricity in all distribution areas are the same and are set by government decree and more particularly by the CREG, the organism in charge of regulating the energy market. The latest decree is decree No. 05-182 of 18 May 2005 [44]. Pricing for professionals is charged \$472 DZD/kWh [45].

The cost of supplying electricity to the desalination plant during one year of operation by fossil fuels is calculated from the following equation:

$$C_{ff} = C_{kWh} \times E \times 365 \tag{15}$$

where

C_{ff} : Total cost using fossil fuels;

C_{kWh} : Price of 1 kWh of electricity (\$);

E : Specific energy of the desalination plant (43800 kWh/Day).

- Total cost for 1 year of functioning (by fossil fuels): $C_{ff} = \$655,907.0091$.
- Total cost for 15 years (relative to hybrid system lifetime) of functioning: $C_{ff} = \$9,838,605.137$.

Solar PV systems require little maintenance, consisting of regular testing of cables and components, replacement of faulty modules and inverters and, in some cases, cleaning of the module [46]. Mobile parts and PV modules have a service life of 25 years. The average maintenance cost of solar panels on the market is around \$4,200/MW per year [47].

The wind turbine requires very little maintenance. Indeed, at least once a year, the wind turbine must be lowered from its mast [48]. This annual maintenance optimizes the service life of the installation. The wind turbine chooses (Aeolos-H

50kw) in our study, at 5 years warranty (guaranteed against manufacturing defects, malfunctions and replacement of defective elements) [49]; the annual maintenance costs for wind turbines (25 to 150 kW) are around \$4949928 [50].

- The cost of maintaining the hybrid system for a 15-year operating period is:
 $C_M = \$164474.28$.
- The total cost of supplying the desalination plant using the hybrid system is:
 $C_{RE} = \$5063360.431$.
- The results show that using the hybrid system allowed us to obtain a profit of 51.46% = \$4775244.706 from the 7th year (7 years, 262 days, 15 hours, 58 min and 33 seconds) for a total of 15 years of functioning.

7. Conclusion

In this study, we presented an optimal sizing method, based on the results of a simulation of a hybrid system (PV-wind turbine) during a year of global solar irradiation and daily wind speed at the site of Honaine-Tlemcen (Western Algeria), with the aim of providing sufficient electrical energy to supply a desalination station for seawater (Desalination by reverse osmosis technology, it supplies potable water for a population of about 555,000 inhabitants).

To this effect, an analysis methodology based on taking into account seasonal disturbances was established using two scenarios to ensure the continuous operation of the station. The first scenario uses the average of the monthly values per year, the second one introduces the notion of the worst month (defined as the month that requires the greatest use of the photovoltaic and wind generator surface area). The results obtained show that the complementarity of the two scenarios ensures the good functioning of the station during all the year, and this by using a number well-defined of panels, wind turbines and batteries.

On the other hand, the use of the hybrid system has enabled us to reduce the cost to 51.46% compared to fossil fuels, which gives the proposed study an important reliability, since it offers a very advantageous benefit in terms of cost and efficiency.

Based on these results, it can be seen that there is a favourable economic trend for the use of renewable energies as alternative energies, which is a promising solution for the environment in the coming decades.

References

1. Tzen, E.; Perrakis, K.; and Baltas, P. (1998). Design of a stand-alone PV-desalination system for rural areas. *Desalination*, 119(1-3), 327-333.
2. Zoubeik, M.; Ismail, M.; Salama, A., and Henni, A. (2018). New developments in membrane technologies used in the treatment of produced water: A review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(5), 2093-2118.
3. Abuhabib, A.A.; Ghasemi, M.; Mohammad, A.W.; Abd Rahman, R.; and El-Shafie, A.H. (2013). Desalination of brackish water using nanofiltration: performance comparison of different membranes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(11), 2929-2939.

4. Voivontas, D.; Misirlis, K.; Manoli, E.; Arampatzis, G.; and Assimacopoulos, D.; and Zervos, A. (2001). A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies. *Desalination*, 133(2), 175-198.
5. Yazdi, S.K.; and Shakouri, B. (2017). Renewable energy, nonrenewable energy consumption, and economic growth. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(12), 1038-1045.
6. Al Badwawi, R.; Abusara, M.; and Mallick, T. (2015). A review of hybrid solar pv and wind energy system. *Smart Science*, 3(3), 127-138.
7. Singh, S.; Singh, M.; and Kaushik, S.C. (2016). A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems. *International Journal of Green Energy*, 13(15), 1564-1578.
8. Ma, G.; Xu, G.; Ju, R.; and Wu, T. (2015). Study on optimal configuration of the grid-connected wind-solar-battery hybrid powersystem. *International Journal of Sustainable Energy*, 36(7), 668-681.
9. Lakhali, Y.; Baghli, F.Z.; and El Bakkali, L. (2017). The efficiency of bond graph approach for a flexible wind turbine modeling. *Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)*, 12(11), 2990-3010.
10. Isaloo, B.A.; and Amiri, P. (2016). Improved variable step size incremental conductance mppt method with high convergence speed for PV systems. *Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)*, 11(4), 516-528.
11. Nasiraghdam, H.; and Jadid, S. (2012). Optimal hybrid PV/WT/FC sizing and distribution system reconfiguration using multi-objective artificial bee colony (MOABC) algorithm. *Solar Energy*, 86(10), 3057-3071.
12. Li, C.-H.; Zhu, X.-J.; Cao, G.-Y.; and Sui, S.; and Hu, M. (2009). Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology. *Renewable Energy*, 34(3), 815-826.
13. Mohamed, E.S.; and Papadakis, G. (2004). Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaic. *Desalination*, 164(1), 87-97.
14. Koutroulis, E.; and Kolokotsa, D. (2010). Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources. *Desalination*, 258(1-3), 171-181.
15. Smaoui, M.; Abdelkafi, A.; and Krichen, L. (2015). Optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind/hydrogen hybrid system supplying a desalination unit. *Solar Energy*, 120, 263-276.
16. Spyrou, I.D.; and Anagnostopoulos, J.S. (2010). Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. *Desalination*, 257(1-3), 137-149.
17. Dursun, E.; Acarkan, B.; and Kilic, O. (2012). Modeling of hydrogen production with a stand-alone renewable hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(4), 3098-3107.
18. Koklas, P.A.; and Papathanassiou, S.A. (2006). Component sizing for an autonomous wind driven desalination plant. *Renewable Energy*, 31(13), 2122-2139.
19. Markvar, T. (1997). Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems. *Solar Energy*, 57(4), 277-281.

20. Anagnostopoulos, J.S.; and Papantonis, D.E. (2007). Pumping station design for a pumped storage wind-hydro power plant. *Energy Conversion and Management*, 48(11), 3009-3017.
21. Anagnostopoulos, J.S.; and Papantonis, D.E. (2008). Simulation and size optimization of pumped storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy. *Renewable Energy*, 33(7), 1685-1694.
22. Kaabeche, A.; and Ibtouen, R. (2014) Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy*, 103, 171-182.
23. Belmili, H.; Haddadi, M.; Bacha, S.; Almi, M.F.; and Bendib, B. (2014). Sizing stand-alone photovoltaic–wind hybrid system: techno economic analysis and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 821-832.
24. Eltamaly, A.M.; Addoweesh, K.E.; Bawa, U.; and Mohamed, M.A. (2014). Economic modeling of hybrid renewable energy system: A case study in Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(5), 3827-3839.
25. Luft, W. (1982). Five solar-energy desalination systems. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 21-32.
26. Maliva, R.G.; and Missimer, T.M. (2010). Self-cleaning beach gallery design for seawater desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 13(1-3), 88-95.
27. Kim, S.H.; Min, C.-S.; and Cho, J. (2011). Comparison of different pretreatments for seawater desalination. *Desalination and Water Treatment*, 32(1-3), 339-344.
28. Atallah, A. (2014). *Desalination process and physico-chemical quality of the water desalinated by the Honaïne seawater desalination plant*. Master. Thesis. Faculty of Sciences, University Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algeria.
29. Hadil, A.; and Abdelkarim, M. (2013). Etude économique et impact écologique de la station de dessalement de Honaïne (W. Tlemcen). *Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement*. Ouargla, Algeria, 67-70.
30. Mahmoud, M.M. (2003). Solar electric powered reverse osmosis water desalination system for the rural village, Al Maleh: design and simulation. *International Journal of Sustainable Energy*, 23(1-2), 51-62.
31. Spyrou, I.D.; and Anagnostopoulos, J.S. (2010). Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. *Desalination*, 257(1-3), 137-149.
32. SunForte PM096B00 (2009). Mono-crystalline photovoltaic module, BenQ Solar -AU Optronics Corporation. Retrieved August 21, 2017, from <https://www.ase-energy.com/panneau-solaire-24v-335w-monocristallinbenqsolar-sunforte,fr,4,PAN335W.cfm>
33. Aeolos Wind Turbine (2010). Aeolos H 50KW. Retrieved September 3, 2017, from <https://windturbinestar.com>.
34. Alma Solar (2013). Battery pack propower. Retrieved September 5, 2017, from <https://www.alma-solarshop.fr/batteries-solaires/1049-pack-de-batteries-batterx-a-48v-avec-9600wh.html>.
35. BatterX (2016). Lead carbon battery, LC1000. Retrieved September 5, 2017, from <https://batterx.io>.

36. Growatt CP100 (2011). User manual-Growatt New Energy Co., Ltd. Bao'a District, Shenzhen, P.R. China. Retrieved September 8, 2017, from <https://www.ginverter.com>.
37. Growatt CP100 (2011). Review Growatt-CP 100. Retrieved September 8, 2017, from <https://www.enfsolar.com/pv/inverter-datasheet/268>.
38. Protopogeropoulos, C.; Brinkworth, B.J.; and Marshall, R.H. (1997). Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage. *International Journal of Energy Research*, 21(6), 465-479.
39. El Khadimi; A.; Bchir; L.; and Zeroual, A. (2004). Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'Energie hybride photovoltaïque - Eolien avec système de stockage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(2), 73-83.
40. Tutiempo (2002). Climate Tlemcen. Retrieved September 2, 2017, from <https://en.tutiempo.net/climate/ws-605310.html>.
41. National Statistical Office (1964). Retrieved September 2, 2017, from <https://www.ons.dz/>.
42. Currency Converter (1996). USD to DZD. Retrieved September 10, 2017, from <https://www.xe.com/en/currencyconverter/>.
43. DZ Breaking (2017). A new company, in charge of electricity and gas distribution, created in Algeria. Retrieved February 25, 2018, from <https://www.dzbreaking.com/2017/06/19/new-company-charge-electricity-gas-distribution-created-algeria>.
44. Law no. 05-182, of 9 Rabie Ethani 1426 corresponding to 18 May 2005. Tariff regulation and remuneration for electricity and gas transmission, distribution and marketing activities. Retrieved February 25, 2018, from <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=electricite-et-distribution-de-gaz>.
45. Algeria electricity (2017). The prices per kWh of electricity. Retrieved February 25, 2018, from <https://algerie-electricite.com/faq/prix-kwh>.
46. HESPUL (2012). Memo on preventive maintenance of photovoltaic systems. Retrieved February 25, 2018, from https://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/memo_maintenance_pre_ventive_hespul_mai2012.pdf.
47. International Finance Corporation (2015). Commercial photovoltaic solar power plants. Retrieved February 26, 2018, from https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f05d3e00498e0841bb6fbb54d141794/IFC+Solar+Report_Web+_08+05.pdf.
48. Renewables First (2015). What is the cost to operate wind turbines. Retrieved February 27, 2018, from <https://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/windpower-learning-centre/how-much-does-a-wind-turbine-cost-to-operate/>.
49. AEOLOS (2010). Five years standard warranty. Retrieved February 27, 2018, from <https://www.windturbinestar.com/warranty-support.html>.
50. AEOLOS (2010). Maintenance costs, Aeolos wind turbine. Retrieved February 27, 2018, from <https://www.windturbinestar.com/contact-us.html>.

Résumé

Ce travail présente le dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-éolien destiné à l'alimentation d'une station de dessalement de l'eau de mer (dessalement par osmose inverse) située à Honaïne dans la région du littoral de Tlemcen en Algérie. La capacité de production de la station est de 200 000 m³ / jour, elle assure l'approvisionnement en eau potable pour une population d'environ 555 000 habitants (la demande énergétique de l'usine, est de 1.825 MW). L'idée principale, constitue à présenter une méthode qui permet de dimensionner et optimiser un système hybride, en introduisant deux scénarios : le premier scenario traite le fonctionnement de l'usine sous de bonnes conditions météorologiques. Le second introduit la notion du mois le plus défavorable (mauvaises conditions météorologiques). Pour cela, nous avons élaboré un code de calcul qui nous a permis de déterminer la taille et l'optimisation du système, ainsi que la configuration technico-économique optimale ((Nombres de panneaux photovoltaïques, éoliennes et batteries), ainsi que le coût total). Les résultats obtenus montrent d'une part : la complémentarité des deux scenarios ce qui permet une meilleure fiabilité du système, et ceci en utilisant un nombre de panneaux-éoliennes-batteries bien déterminés afin d'assurer le fonctionnement de l'usine à long terme, d'autre part l'utilisation du système hybride nous a permis d'obtenir un bénéfice de 51,46% par rapport aux combustibles fossiles, ce qui confère à l'étude proposée une fiabilité importante, vu qu'elle présente un bénéfice très avantageux de point de vue coût et rendement.

Mots Clés : Dessalement, Système hybride PV- éolien, Dimensionnement, Batteries, Coût.

Abstract

This work presents the dimensioning of a wind-photovoltaic hybrid system for the supply of a seawater desalination plant (reverse osmosis desalination) located in Honaïne in the Tlemcen coastal region of Algeria. The plant has a production capacity of 200,000 m³ /day and supplies potable water for a population of about 555,000 people (the plant's energy demand is 1,825 MW). The main idea is to present a method for sizing and optimizing a hybrid system by introducing two scenarios: the first scenario treats the operation of the plant under good weather conditions. The second one introduces the notion of the worst month (poor weather conditions). For it, we developed a calculation code (Programming under the MATLAB environment) that allowed us to determine the size and optimization of the system, as well as the optimal technical and economic configuration (numbers of photovoltaic panels, wind turbines and batteries), as well as the total cost. The results obtained show on the one hand: the complementarity of the two scenarios which allows a better reliability of the system, and this by using a number well-defined of panels, wind turbines and batteries to ensure the long-term operation of the plant, on the other hand, the use of the hybrid system has allowed us to obtain a 51.46% benefit compared to fossil fuels, which gives the proposed study an important reliability, since it offers a very advantageous benefit in terms of cost and efficiency.

Keywords: Desalination, Hybrid photovoltaic-wind system, Optimization technique, Batteries, Cost.

ملخص

يعرض هذا العمل تصميم نظام هجين كهروضوئي-رياح لتزويد محطة تحلية مياه البحر (تحلية التناضح العكسي) الواقعة في هنين في منطقة تلمسان الساحلية في الجزائر. وتبلغ الطاقة الإنتاجية للمحطة 200000 م³ / يوم، وتضمن توفير مياه الشرب لسكان يبلغ عددهم حوالي 555000 نسمة (يقدر الطلب على الطاقة في المصنع ب 1.825 ميغاواط). الفكرة الأساسية هي تقديم طريقة تسمح بالحجم وتحسين نظام هجين، من خلال تقديم سيناريوهين: السيناريو الأول يتعامل مع تشغيل المصنع في ظل الظروف الجوية الجيدة. السيناريو الثاني يقدم مفهوم أسوأ شهر (سوء الأحوال الجوية). ولهذا ، قمنا بتطوير رمز حسابي سمح لنا بتحديد حجم النظام وتحسينه ، فضلاً عن التكوين الاقتصادي التقني الأمثل ((عدد الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح والبطاريات) ، بالإضافة إلى التكلفة الإجمالية). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من ناحية: تكامل السيناريوهين مما يسمح بمصداقية أفضل للنظام ، وذلك باستخدام عدد من لوحات التوربينات الريحية - البطاريات التي تم تحديدها بشكل جيد لضمان تشغيل المصنع على المدى الطويل ، و من ناحية أخرى ، سمح لنا استخدام النظام الهجين بالحصول على ربح بنسبة 51.46% مقارنة بالوقود الأحفوري ، الأمر الذي يمنح الدراسة المقترحة درجة عالية من الموثوقية ، لأنه يوفر ربكاً مفيداً للغاية. من وجهة نظر التكلفة والأداء.

الكلمات الأساسية: تحلية مياه البحر، النظام الهجين الكهروضوئية-الرياح، التحجيم، البطاريات، التكلفة.