

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Constantine 1
Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Climatique

N° d'ordre :



THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : Génie Climatique

Présentée par :

TRIKI Zakaria

THÈME

**Études, Analyses et Optimisation de la Consommation
Énergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés**

Soutenue publiquement le : 16/10/2014

Devant le jury composé de :

Président :	Pr. KAABI A.	Université Constantine 1, Algérie
Directeur de thèse :	Pr. BOUAZIZ M.N.	Université de Médéa, Algérie
Examineur :	Pr. BOUCHOUCHA A.	Université Constantine 1, Algérie
Examineur :	Pr. KADJA M.	Université Constantine 1, Algérie
Examineur :	Pr. HANINI S.	Université de Médéa, Algérie
Examineur :	Pr. MOULAI MOSTEFA N.	Université de Médéa, Algérie
Invité :	Pr. BOUMAZA M.	Université Roi-Saoud, Arabie Saoudite

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

Benjamin Franklin.

À mon cher père qui m'a appris l'esprit de la recherche et la rigueur scientifique.

À ma tendre mère qui m'a toujours aidée par sa présence, ses conseils et ses prières.

À ma très chère épouse pour sa générosité, son sacrifice au quotidien et son soutien et encouragements.

À mes petits anges ANIS, ABIR et YASMINE qui sont devenus ma raison d'exister.

À mes chers beaux-parents pour leur gentillesse et leur infinie disponibilité toutes les fois que j'ai eu besoin d'eux.

À mes chers frères et sœurs ABDELKRIM, MONCEF, IMENE et NEDJWA.

À mes beaux-frères et belles-sœurs SEDDIK, FAROUK, BATOUL et HADIL.

À tous mes amis et mes collègues...

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu Tout Puissant pour toutes les merveilles qu'il fait dans ma vie et pour m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

J'adresse mes sincères remerciements et toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Professeur Bouaziz Mohamed Nadjib, pour avoir accepté de diriger le présent travail et pour la confiance qu'il m'a témoignée en me laissant une grande liberté dans ma recherche. En plus de sa rigueur scientifique et de son intérêt pour le sujet, il m'a apporté un soutien moral considérable.

J'adresse également mes plus grands remerciements au Professeur Boumaza Mourad, Co-directeur de thèse précédent, avec qui j'ai travaillé de près en Magister, de m'avoir proposé un sujet aussi intéressant et pour son aide permanente tout au long de cette étude. Je lui dois également pour la rédaction de cette thèse et pour la rigueur d'esprit qu'il m'a communiquée.

Je remercie le Professeur Kaâbi Abdenacer de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et de présider le jury de ma thèse.

Je remercie également le Professeur Bouchoucha Ali, le Professeur Kadja Mahfoud, le Professeur Hanini Salah et le Professeur Moulai Mostefa Nadji pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de faire partie du jury de la thèse.

Enfin, je terminerai par remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail de recherche.

SOMMAIRE

PRÉAMBULE

RÉSUMÉ

LISTE DES FIGURES

LITSE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

Chapitre I : INTRODUCTION	1
I.1. Problématique de l'eau potable	1
I.1.1. Ressources en eau	1
I.1.2. Indicateurs de ressources	2
I.2. Solution apportée par le dessalement	4
I.3. Problématique de l'environnement	7
I.4. Problématique des sites isolés	8
I.5. Solution apportée par les énergies renouvelables, dont principalement l'énergie éolienne	9
I.6. Dessalement par énergie éolienne	10
I.7. Choix et description des sites étudiés	11
I.8. Contexte et objectifs de la recherche	14
I.9. Plan de la thèse	16
Chapitre II : Systèmes de conversion de l'énergie éolienne	17
II.1. Introduction	17
II.2. Principes et éléments constitutifs de l'éolien	17
II.2.1. Principe de fonctionnement	17
II.2.2. Éléments constitutifs d'une éolienne	18
II.2.3. Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne	20
II.3. Systèmes de Stockage pour la production d'électricité	21
II.3.1. Nécessité du stockage d'énergie	21
II.3.2. Types de Stockage d'énergie	21
II.4. Systèmes éoliens autonomes	23
II.4.1. Classification des systèmes éoliens	23
II.4.2. Types de systèmes éoliens autonomes	24
II.4.3. Taux de pénétration de vent	24

II.5. Tendances et récentes améliorations	25
II.5.1. Système mécanique	26
II.5.2. Système électrique	26
II.5.3. Intégration de l'énergie éolienne et nouvelles applications	26
II.6. Évaluation des ressources éolienne	27
II.6.1. Puissance éolienne disponible	27
II.6.2. Puissance éolienne récupérable (Théorème de Betz)	28
II.6.3. Caractérisation horizontale de la vitesse de vent	31
II.6.4. Extrapolation verticale des paramètres de vent	33
Chapitre III : Technique de dessalement par osmose inverse	37
III.1. Introduction	37
III.2. Principe de l'osmose inverse	37
III.3. Pression osmotique	38
III.4. Éléments d'un système d'osmose inverse	39
III.4.1. Les membranes	40
III.4.2. Modules d'osmose inverse	40
III.4.3. Pompes de mise en pression	42
III.4.4. Récupération de l'énergie du concentrât	44
III.4.5. Système de prétraitement	45
III.4.6. Système de post-traitement (adoucissement)	48
III.5. Salinité des eaux	48
III.5.1. Les eaux salines	48
III.5.2. Les eaux potables	50
III.6. Développement industriel de l'osmose inverse	51
III.7. Mécanismes de transfert	52
III.7.1. Modèle diffusionnel	52
III.7.2. Modèle capillaire	53
III.8. Paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse	54
III.8.1. Flux de solvant et de soluté	55
III.8.2. Taux de conversion	55
III.8.3. Taux de rejet	56
III.8.4. Conductivité du perméat	57
III.8.5. Pression de fonctionnement (pression motrice)	57

III.8.6. La température	58
III.8.7. Le pH	60
III.9. Polarisation de la concentration	61
III.9.1. Phénomène de polarisation	61
III.9.2. Modélisation de la polarisation : Théorie du film	62
III.9. Consommation d'énergie	64
Chapitre IV : État de l'art sur les systèmes de dessalement à osmose inverse par énergie éolienne	65
IV.1. Introduction	65
IV.2. Couplage osmose inverse/énergies renouvelables	65
IV.3. Description des technologies éolien/osmose inverse	67
IV.4. Applications des systèmes éolien/osmose inverse	68
IV.5. Évolution du marché et faisabilité économique des systèmes éolien/osmose inverse	74
IV.6. Conclusion	80
Chapitre V : Modélisation du système et étude des performances	81
V.1. Introduction	81
V.2. Description du système proposé	81
V.3. Modélisation mathématique	84
V.3.1. Puissance fournie par la turbine éolienne	84
V.3.2. Production de l'unité d'osmose inverse	88
V.3.3. Analyse exergétique du système	93
V.4. Résultats et discussion	96
V.4.1. Distribution de la vitesse du vent	96
V.4.2. Production du système	96
V.4.3. Analyse de sensibilité	98
V.4.4. Analyse exergétique	104
Chapitre VI : Analyse économique et environnementale	108
VI.1. Introduction	108
VI.2. Présentation de HOMER	108
VI.2.1. Introduction	108
VI.2.2. Principales caractéristiques	108
VI.3. Présentation de la configuration choisie	110

VI.4. Méthodologie spécifique à la simulation	111
VI.4.1. Évaluation de la demande énergétique	112
VI.4.2. Identification des équipements	112
VI.4.3. Introduction des données	127
VI.4.4. Simulation et choix de la configuration optimale	117
VI.4.5. Analyse de sensibilité	122
VI.5. Étude économique du dessalement	134
VI.5.1. Introduction	134
VI.5.2. Coût moyen actualisé de l'eau produite	135
VI.5.3. Profitabilité	135
VI.5.4. Résultats et discussions	136
VI.6. Analyse environnementale	138
VI.6.1. Origine et types des émissions et rejets	138
VI.6.2. Évaluation de l'impact environnemental	138
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	141
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	144
ANNEXES	

PREAMBULE

Les secteurs de l'eau et de l'énergie sont fortement liés. En effet, si la première est source de génération du tiers de la production mondiale d'électricité, la seconde est essentielle pour le pompage d'eaux souterraines, la potabilisation d'eaux de surface ou encore le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres dont la part de l'énergie dans le coût global peut atteindre 70 %.

De manière générale, l'énergie constitue un facteur structurant de développement social et économique et d'intégration des pays en développement dans le contexte de la mondialisation des échanges pour deux raisons majeures :

- Le coût de l'énergie et la sécurité de l'approvisionnement, par leurs impacts significatifs sur la préservation et le renforcement de la compétitivité des secteurs productifs (agriculture, industrie, services), conditionnent la croissance économique, le développement de l'investissement privé ou encore l'élargissement de la base de l'emploi,
- L'accès généralisé à l'énergie est fondamental pour l'amélioration de la qualité de vie des populations, indicateur clé du niveau de développement de toute société. Les services de base tels que la santé, l'éducation, l'habitat, les transports,... et surtout l'eau ne peuvent être déployés sans un service énergétique approprié et durable.

Le thème de l'énergie est en outre mobilisateur de ressources humaines et financières. A ce titre, il constitue souvent une porte d'entrée aux acteurs intéressés, facilitant la mise en œuvre de dynamiques locales mais intégrées de développement.

En raison de cette importance le premier choc pétrolier de 1973 a été un moteur de recherche déterminant pour la mobilisation de ressources énergétiques alternatives en générale et des énergies renouvelables en particulier afin de réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles.

Les préoccupations environnementales mondiales prennent ainsi en considération les énergies renouvelables, de manière réelle et durable car les énergies d'origine fossile sont responsables à près 60 % des émissions de gaz à effet de serre.

RÉSUMÉ

Le dessalement des eaux est un des facteurs importants qui peut contribuer au développement des zones isolées et le désert. Un paramètre technique critique des applications de dessalement est la manière dont le système est alimenté. Cette décision est prise tenant compte de la méthode choisie pour le dessalement et les caractéristiques du site considéré. Aujourd'hui, la technique d'osmose inverse domine le marché mondial du dessalement ; elle nécessite uniquement de l'énergie électrique, présente une faible consommation énergétique spécifique, et peut être associée avec des sources d'énergie renouvelables telles que l'éolien et le photovoltaïque. Par conséquent, les systèmes de dessalement à osmose inverse alimentés par énergies renouvelables sont des technologies prometteuses pour le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres dans les régions éloignées comme ils présentent une faible consommation d'énergie et peuvent être conçus en fonction des besoins en eau potable et des ressources énergétiques disponibles.

Ce travail de recherche analyse la faisabilité des concepts de dessalement par énergie éolienne dans le sud algérien, et évalue leur viabilité économique et environnementale. Dans ce contexte, un système de dessalement par osmose inverse couplé à une turbine éolienne autonome d'une puissance nominale de 1MW et muni d'un dispositif de récupération d'énergie est proposé pour fournir l'eau potable, à partir des eaux saumâtres, aux populations rurales de trois sites fortement ventés dans le Sud-ouest de l'Algérie à savoir : Adrar, Timimoun et Tindouf. L'effet des différents paramètres de fonctionnement et de conception sur la performance du système a été ainsi étudié. Ce travail est accompli par une analyse économique et environnementale des systèmes de dessalement par énergie éolienne pour le cas présenté.

Mots clés : Régions isolées, Énergies renouvelables, Énergie éolienne, Dessalement des eaux, Osmose inverse, Récupération d'énergie .

ABSTRACT

Water desalination is one of the most important factors that can help in developing remote areas and the desert. A critical technical parameter of desalination applications is the way the system is powered. This decision is taken according to the selected method of desalination and the characteristics of the candidate area. Nowadays, the method of reverse osmosis dominates globally; it requires only electricity, has a quite low specific energy demand, and can cooperate with technologies of renewable energy sources such as wind turbine and photovoltaics. Hence, renewable energy-powered reverse osmosis systems are promising technologies for brackish and seawater desalination in remote regions as they exhibit low energy consumption and can be designed according to water demand and energy resource.

This study explores the feasibility of wind-desalination concepts in southern Algeria, and evaluates their economic and environmental viability. A reverse osmosis desalination system powered by a stand-alone wind turbine of 1 MW rated power and equipped with an energy recovery device is proposed to supply fresh water, from brackish water, to the rural world of three potentially high-wind sites in the southwest of Algeria, namely Adrar, Timimoun, and Tindouf. The effect of different operating and design conditions on the system performance is investigated. The paper is concluded with the economic and environmental feasibility of wind powered desalination systems for the presented case.

Keywords: Remote areas, Renewable energies, Wind power, Water desalination, Reverse osmosis, Energy recovery.

ملخص

تعتبر تحلية المياه من أهم العوامل التي تساهم في تنمية المناطق النائية والصحراوية. أحد العوامل التقنية الحاسمة في تطبيقات التحلية هي الكيفية التي يتم بها تغذية النظام ويتخذ هذا القرار تبعا لطريقة التحلية المختارة وخصائص الموقع. حاليا، تكتسح تقنية التناضح العكسي السوق العالمي لتحلية المياه نظرا لأنها تتطلب فقط طاقة كهربائية، تستهلك القليل من الطاقة، ويمكن أن تترابط بمصادر الطاقة المتجددة كطاقة الرياح والخلايا الكهروضوئية. وعليه فإن أنظمة التناضح العكسي التي تشتغل بالطاقة المتجددة تمثل تكنولوجيا واعدة لتحلية مياه البحر والمياه المالحة لما تتميز به من نقص استهلاك الطاقة كما يمكن تصميمها وفقا لاحتياجات الماء الشروب والموارد الطاقوية.

هذا البحث يحلل جدوى مفاهيم تحلية المياه باستخدام طاقة الرياح في الجنوب الجزائري وقيم استدامتها الاقتصادية والبيئية. في هذا السياق، تم اقتراح نظام تناضح عكسي لتحلية المياه المالحة باستعمال توربين رياح مستقل ذو قدرة اسمية تقدر بواحد ميغاواط ومزود بجهاز استرجاع الطاقة، لتوفير مياه الشرب لسكان القرى النائية في ثلاثة مناطق شديدة الرياح جنوب غرب الجزائر وهي أدرار، تيميمون و تندوف. كما تمت دراسة تأثير مختلف عوامل التشغيل والتصميم على أداء النظام. يخلص هذا العمل من خلال تحليل اقتصادي وبيئي لأنظمة تحلية المياه بطاقة الرياح للحالة المعروضة.

كلمات البحث: المناطق المعزولة، الطاقات المتجددة، طاقة الرياح، تحلية المياه، التناضح العكسي، استرجاع الطاقة.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Répartition de l'eau sur Terre	2
Figure I.2 : Disponibilité en eau douce dans le monde	3
Figure I.3 : Prévisions de croissance de la capacité de dessalement dans le monde	4
Figure I.4 : Croissance de la capacité cumulative des technologies thermiques et membranaires (1990-2016)	5
Figure I.5 : Réduction de la consommation spécifique avec l'osmose inverse	6
Figure I.6 : Structure moyenne des coûts d'exploitation d'une usine de dessalement par osmose inverse	7
Figure I.7 : Pourcentage de la population non raccordée au réseau de distribution d'électricité	9
Figure I.8 : Évolution de la capacité de l'énergie éolienne installée dans le monde	10
Figure I.9 : Carte de vent de l'Algérie	12
Figure I.10 : Bassin hydrographique du Sahara	12
Figure I.11 : Évolution de la vitesse moyenne horaire du vent pour les trois sites (à 10 m du sol)	13
Figure I.12 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent des sites étudiés	14
Figure I.13 : Unité de dessalement solaire d'Hassi-Khebi	15
Figure II.1 : Schéma d'ensemble d'une éolienne	18
Figure II.2 : Structure d'un système normal de conversion de l'énergie éolienne	20
Figure II.3 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine	20
Figure II.4 : Veine d'air traversant la zone balayée par les pales d'une éolienne	28
Figure II.5 : Évolution de F_c en fonction de a	30
Figure II.6 : Facteur de capacité pour différents types d'éoliennes	31
Figure III.1 : Principe de l'osmose inverse	37
Figure III.2 : Écoulement à travers la membrane	38
Figure III.3 : Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse	39
Figure III.4 : Membrane sélective	40
Figure III.5 : Module spirale	41
Figure III.6 : Module tubulaire	41
Figure III.7 : Module plan	42

Figure III.8 : Structures des modules en spirale et fibres creuses	43
Figure III.9 : Récupération d'énergie par système à piston (échangeurs de pression)	45
Figure III.17 : Choix de la pression de fonctionnement	58
Figure III.18 : Mécanisme de formation de la couche de polarisation	61
Figure III.19 : Évolution des différents paramètres à l'interface membrane-solution	63
Figure IV.1 : Combinaisons osmose inverse/énergies renouvelables	66
Figure IV.2 : Schéma typique d'un système d'osmose inverse hybride	68
Figure IV.3 : Unité d'osmose inverse de Pozo Izquierdo	70
Figure IV.4 : Turbine éolienne de Pozo Izquierdo	70
Figure IV.5 : Turbine éolienne de 900 W	70
Figure IV.6 : Panneaux PV de 4 kW crête	71
Figure IV.7 : Unité d'osmose inverse autonome	71
Figure IV.8 : Chaîne de batteries	71
Figure IV.9 : Éolienne de 500 kW à Syros	72
Figure IV.10 : Vue de l'unité d'osmose inverse à l'île de Syros	72
Figure IV.11 : Vue de la station de dessalement hybride flottante à l'île d'Iraklia	73
Figure IV.12 : Structure d'une unité off-shore	74
Figure V.1 : Schéma du système de dessalement éolien/osmose inverse proposé	82
Figure V.2 : Courbe caractéristique d'une éolienne	85
Figure V.3 : Courbe de puissance de la turbine éolienne	87
Figure V.4 : Vitesses moyennes mensuelles des différents sites (à 10 m a.d.s)	96
Figure V.5 : Distribution de Weibull des différents sites	97
Figure V.6 : Effet de la vitesse du vent sur la performance du système	99
Figure V.7 : Effet du taux de conversion sur la performance du système	102
Figure V.8 : Effet du débit d'alimentation sur la performance du système	103
Figure V.9 : Effet de la pression transmembranaire sur la performance du système	105
Figure V.10 : Destruction de l'exergie pour la turbine éolienne en fonction des mois	106
Figure V.11 : Destruction de l'exergie pour l'unité de dessalement en fonction des mois	107
Figure VI.1 : Modèle conceptuel de HOMER	109
Figure VI.2 : Architecture du système hybride	111
Figure VI.3 : Évolution de la vitesse moyenne horaire du vent pour le site d'Adrar (à 10 m du sol)	113

Figure VI.4 : Répartition journalière de la charge	113
Figure VI.5 : Schéma de la turbine éolienne	114
Figure VI.6 : Configuration d'un groupe électrogène	114
Figure VI.7 : Batterie Surrette 4KS25P	115
Figure VI.8 : Convertisseur bidirectionnel	116
Figure VI.9 : Production moyenne mensuelle de l'énergie électrique	119
Figure VI.10 : État de charge mensuelle des batteries	121
Figure VI.11 : Répartition des coûts du système	122
Figure VI.12 : Configurations possibles en fonction du prix de fuel	125
Figure VI.13 : Production de la turbine éolienne en fonction du prix du fuel	126
Figure VI.14 : Production du groupe électrogène en fonction du prix du fuel	127
Figure VI.15 : Influence de la variation de la vitesse du vent	129
Figure VI.16 : Influence de la variation de la charge	130
Figure VI.17 : Influence de la variation du prix du combustible	132
Figure VI.18 : Influence de la réduction du coût d'investissement de l'éolienne	133
Figure VI.19 : Effet conjugué des paramètres de sensibilité sur le coût de l'énergie	134
Figure VI.20 : Coûts moyens actualisés de l'eau dessalée pour les trois sites	136
Figure VI.21 : Évaluation du coût net actualisé pour les trois sites	137
Figure VI.22 : Variation de l'indice de profitabilité en fonction du prix de vente de l'eau	137
Figure VI.23 : Emissions de CO ₂ pour différents régimes	140
Figure VI.24 : Emissions de CO pour différents régimes	140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Chute des ressources en eau potable par habitant dans l'Algérie	3
Tableau I.2 : Récapitulatif des impacts environnementaux	8
Tableau I.3 : Données géographiques et météorologiques des sites étudiés	13
Tableau II.1 : Classification des systèmes éoliens	23
Tableau II.2 : Niveau de pénétration des systèmes éolien/diesel autonomes	25
Tableau III.1 : Comparaison entre modules spirale et en fibres creuses	43
Tableau III.2 : Avantages et inconvénients des pompes utilisées en osmose inverse	44
Tableau III.3 : Procédés de prétraitement	48
Tableau III.4 : Composition de l'eau de mer standard	49
Tableau III.5 : Salinité de différentes mers	49
Tableau III.6 : Caractéristiques physico-chimiques normalisées pour les eaux potables	50
Tableau III.7 : Influence de la température sur la perméabilité d'une membrane	60
Tableau III.8 : Consommation énergétique du dessalement	64
Tableau IV.1 : Unités de dessalement éolien/osmose inverse	75
Tableau V.1 : Paramètres de distribution de Weibull	87
Tableau V.2 : Données techniques de la turbine éolienne	87
Tableau V.3 : Spécifications géométriques du module membranaire	91
Tableau V.4 : Propriétés physico-chimiques de l'eau saumâtre du sud algérien	92
Tableau V.5 : Productions d'énergie et d'eau potable dans les trois sites	98
Tableau V.6 : Bilan exergétique sur l'éolienne	106
Tableau V.7 : Bilan exergétique sur l'unité de dessalement	107
Tableau VI.1 : Comparaison des résultats sur l'intégration de l'énergie éolienne dans un site isolé	111
Tableau VI.2 : Caractéristiques du combustible	117
Tableau VI.3 : Détails des résultats d'optimisation	118
Tableau VI.4 : Énergie annuelle produite	119
Tableau VI.5 : Paramètres de fonctionnement de l'éolienne	119
Tableau VI.6 : Paramètres de fonctionnement du groupe électrogène	120
Tableau VI.7 : Paramètres de fonctionnement des batteries	120
Tableau VI.8 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur	122

Tableau VI.9 : Coûts du système	142
Tableau VI.10 : Variables de sensibilité utilisées dans la simulation	123
Tableau VI.11 : Coûts d'investissement, d'opération et de maintenance de l'unité de dessalement	135
Tableau VI.12 : Indicateurs de rentabilité économique	137
Tableau VI.13 : Emission des polluants atmosphériques	139

NOMENCLATURE

Symboles:

A : Surface balayée par les pâles de l'éolienne	(m^2)
Perméabilité de la membrane à l'eau	(m/s.Pa)
$A(n)$: Facteur de recouvrement du capital	(—)
B : Perméabilité de la membrane au sel	(m/s)
b_π : Coefficient osmostique	(m^3 .Pa/kg)
c, c_1, c_2 : Facteur d'échelle de Weibull	(m/s)
C : Concentration en sel	(kg/ m^3)
C_0 : Concentration moyenne de soluté dans la solution	(kg/ m^3)
C_e : Concentration moyenne du solvant dans la membrane	(kg/ m^3)
C_s : Coefficient de diffusion du soluté dans la membrane	(kg/ m^3)
\bar{C}_{sm} : Concentration du soluté dans la membrane	(kg/ m^3)
C_{ss} : Concentration du soluté dans la solution	(kg/ m^3)
\bar{C}_i : Concentration du constituant i dans la membrane	(kg/ m^3)
C_{aec} : Consommation électrique annuelle de l'unité de dessalement	(kWh/an)
C_{aom} : Coût annuel d'opération et de maintenance	(\$)
C_{eau} : Coût moyen actualisé de l'eau dessalée	(\$/ m^3)
C_{inv} : Coût total d'investissement	(\$)
C_{kWh} : Prix de l'énergie électrique	(\$/kWh)
C_m : Concentration de soluté arrêtée dans la membrane	(kg/ m^3)
c_p : Chaleur spécifique de la solution	(kJ/kg.K)
d_h : Diamètre hydraulique	(m)
D : Débit volumique de l'air balayé par le rotor de l'éolienne	(m^3 /s)
D_e : Coefficient de diffusion du solvant dans la membrane	(m^2 /s)
D_s : Coefficient de diffusion du soluté dans la membrane	(m^2 /s)
\bar{D}_i : Coefficient de diffusion du constituant i dans la membrane	(m^2 /s)
E : Consommation énergétique spécifique	(kWh/ m^3)
E_0 : Énergie d'activation du liquide à la température de référence	(J/mol)
E_c : Énergie cinétique du vent	(Joule)
E_x : Exergie	(kW)

F_c : Facteur de capacité	(—)
FC : Facteur de conversion	(—)
FCC : Facteur de correction de colmatage	(—)
ff_0 : Fréquences de vents calmes	(—)
$f(V)$: Fonction de densité de probabilité de weibull	(—)
h : Enthalpie spécifique	(kJ/kg)
i : Taux annuel d'intérêt	(%)
IP : Indice de profitabilité	(—)
J_e : Flux de solvant à travers la membrane	(m/s)
J_s : Flux de soluté à travers la membrane	(kg/m ² .s)
k, k_1, k_2 : Facteur de forme de Weibull	(—)
K_s : Coefficient de transfert de matière du soluté	(m/s)
MW_s : Poids moléculaire du solvant	(g/mol)
MW_i : Poids moléculaire du $i^{\text{ème}}$ composant chimique	(g/mol)
n : Durée de vie du projet	(Année)
N : Nombre de pores par unité de surface	(m ⁻²)
N_{ja} : Nombre de jours d'autonomie des batteries	(jours)
N_s : Concentration du solvant par unité de masse de la solution	(—)
P : Pression	(Pa, bar)
Puissance	(W, kW)
\bar{P} : Puissance moyenne annuelle fournie par l'éolienne	(W)
P_{elec} : Production annuelle d'électricité de la turbine éolienne	(kWh/an)
PRE : Prix de vente de l'eau dessalée	(\$/m ³)
PSE : Production spécifique de l'entropie	(kWh/m ³)
Q : Débit volumique	(m ³ /s)
r : Rayon du port	(m)
R : Taux de rejet de sel	(%)
Constante des gaz parfaits	(J/mol.K)
s : Entropie spécifique	(kJ/kg.K)
t : Temps de fonctionnement	(heure)
Re : Nombre de Reynolds	(—)
S : Surface de la membrane	m ²
Sc : Nombre de Schmidt	(—)

Sh : Nombre de Sherwood	(—)
T : Température de la solution	(°C, K)
T_0, R_s : Exergie totale détruite et transformée en production d'entropie	(kW)
u : Vitesse moyenne de la solution	(m/s)
V : Vitesse du vent	(m/s)
Volume	(m ³)
V_e : Volume molaire partiel du solvant	(m ³ /mol)
V_i : Volume molaire partiel	(m ³ /mol)
w : Largeur de la membrane	(m)
\dot{W}_u : Exergie électrique	(kW)
x_1 : Fraction molaire du solvant	(—)
y : Taux de conversion	(%)
z_0 : Rugosité du sol	(m)
z_g : Hauteur géométrique	(m)
z_r : Hauteur de référence (à 10 m a.d.s)	(m)
Lettres grecques:	
Δ : Différence	(—)
α : Constante utilisée dans l'équation (IV.26)	(—)
β_i : Nombre de particules générées par la dissociation de l'élément i	(—)
γ : Facteur de polarisation	(—)
ε : Porosité de la membrane	(—)
η : Rendement	(%)
λ : Coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne	(—)
μ : Viscosité dynamique de la solution	(kg/m.s)
μ_i : Potentiel chimique	(—)
ν : Viscosité cinématique de la solution	(m ² /s)
π : Pression osmotique	(Pa)
ρ : Masse volumique	(kg/m ³)
σ_s : Constante utilisée dans l'équation (II.15)	(—)
τ : Facteur de tortuosité	(—)
Indices :	
A : Alimentation	
a : Air	

c : Concentrât, coupure

ch : Chimique

d : Désiré, démarrage

DRE : Dispositif de récupération d'énergie

e : Eau, entrée

ex : Exergétique

k : Cinétique

n : Nominal

p : Perméat, pompe

ph : Physique

R : Rejet

s : Saumure, sortie

u : Utile

0 : État de référence

Abréviations :

AC : Courant Alternatif

ACV : Analyse de Cycle de Vie

a.d.s : Au-dessus du sol

DC : Courant Continu

HOMER : Modèle d'Optimisation Hybride pour les Energies Renouvelables Electriques

HP : Haute Pression

MF : Microfiltration

NF : Nano-filtration

NPSH : Hauteur de Charge Nette Absolue

NTU : Unité de Turbidité Néphélométrique

OI : Osmose Inverse

O&M : Opération et Maintenance

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

ppb : Parties par billion (équivalent au $\mu\text{g/L}$)

ppm : Parties par million (équivalent au mg/L)

SDI : Indice de Colmatage

TDS : Teneurs en Sels Dissous

UF: Ultrafiltration

CHAPITRE I
INTRODUCTION

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1 Problématique de l'eau potable

I.1.1 Ressources en eau

Si depuis plus d'un demi-siècle, le pétrole occupe une place prépondérante dans les rapports de force qui rythment l'économie et la politique mondiale ; la problématique de la ressource en eau potable apparaît sur le devant de la scène depuis seulement quelques années. L'eau potable est en effet un bien indispensable à la survie, pourtant sa disponibilité n'est pas assurée partout, et la situation ne s'améliore dans la mesure où la population augmente en même temps que la pollution et le réchauffement climatique.

La quantité d'eau est abondante sur notre planète, elle représente 1380 millions de km³. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2%) et de glace (2,15%) inutilisables directement (Fig. I.1). Sur les 0,65% d'eau douce restants, 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. Mais, la répartition de cette eau est très inégale d'un point de vue géographique. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce dont le Brésil qui a 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 [1]. Du coup, le problème de la pénurie d'eau se pose 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.

En Algérie, les ressources en eau ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature (eaux de surface ou souterraines). 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 y sont estimées à 12 milliards de m³/an [2]. Le Sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraine considérables provenant de la nappe albiennaise. Les réserves d'eau y sont très importantes et sont de l'ordre de 60000 milliards de m³ dont 40000 milliards sont situées en Algérie. La particularité de cette ressource est qu'elle n'est pas renouvelable.

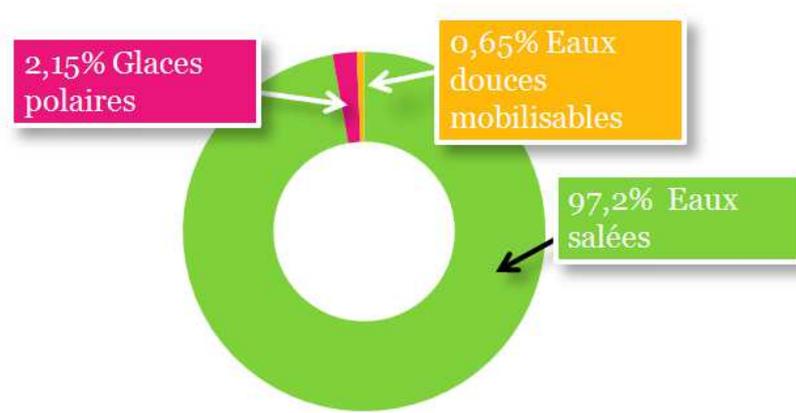


Figure I.1 : Répartition de l'eau sur Terre

I.1.2 Indicateurs de ressources

Rapportées aux populations, les ressources en eau par habitant sont révélatrices des niveaux de richesse ou de pauvreté d'un pays. L'Organisation Mondiale de Santé (OMS) a défini un minimum vital de 1000 m^3 par habitant et par an soit $2,7 \text{ m}^3/\text{jour}$, 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 m^3 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 [3].

Des seuils ont été fixés par convention pour qualifier les degrés d'adéquation ou d'inadéquation de la quantité d'eau et du nombre d'habitants. En deçà d'un seuil de 2500 m^3 d'eau par habitant et par an, un pays est considéré en situation de vulnérabilité. Le seuil de pénurie en eau ou « stress » est fixé à 1700 m^3 d'eau par habitant et par an. La pénurie est considérée comme chronique en dessous du seuil de 1000 m^3 d'eau par habitant et par an et la situation est qualifiée de critique en dessous de 500 m^3 [4]. Environ un tiers de la population mondiale vivrait en dessous du seuil de stress hydrique. Vingt pays dans le monde seraient en état de pénurie : douze sur le continent africain (Afrique du Sud, Algérie, Burundi, Égypte, Éthiopie, Kenya, Libye, Malawi, Maroc, Rwanda, Somalie et Tunisie) et sept au Moyen-Orient (Arabie Saoudite, Iran, Israël, Jordanie, Koweït, Yémen et Territoires palestiniens).

En réalité, des millions de personnes vivent avec moins de 500 m^3 d'eau par an, situation obérant toute perspective de développement et de croissance. Le manque d'eau est structurel dans le vaste triangle qui s'étend de la Tunisie au Soudan et au Pakistan, c'est dire dans plus de vingt pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient, qui présentent une situation de pénurie chronique (moins de 1000 m^3 d'eau douce par an), comme le révèle la figure I.2 [5].

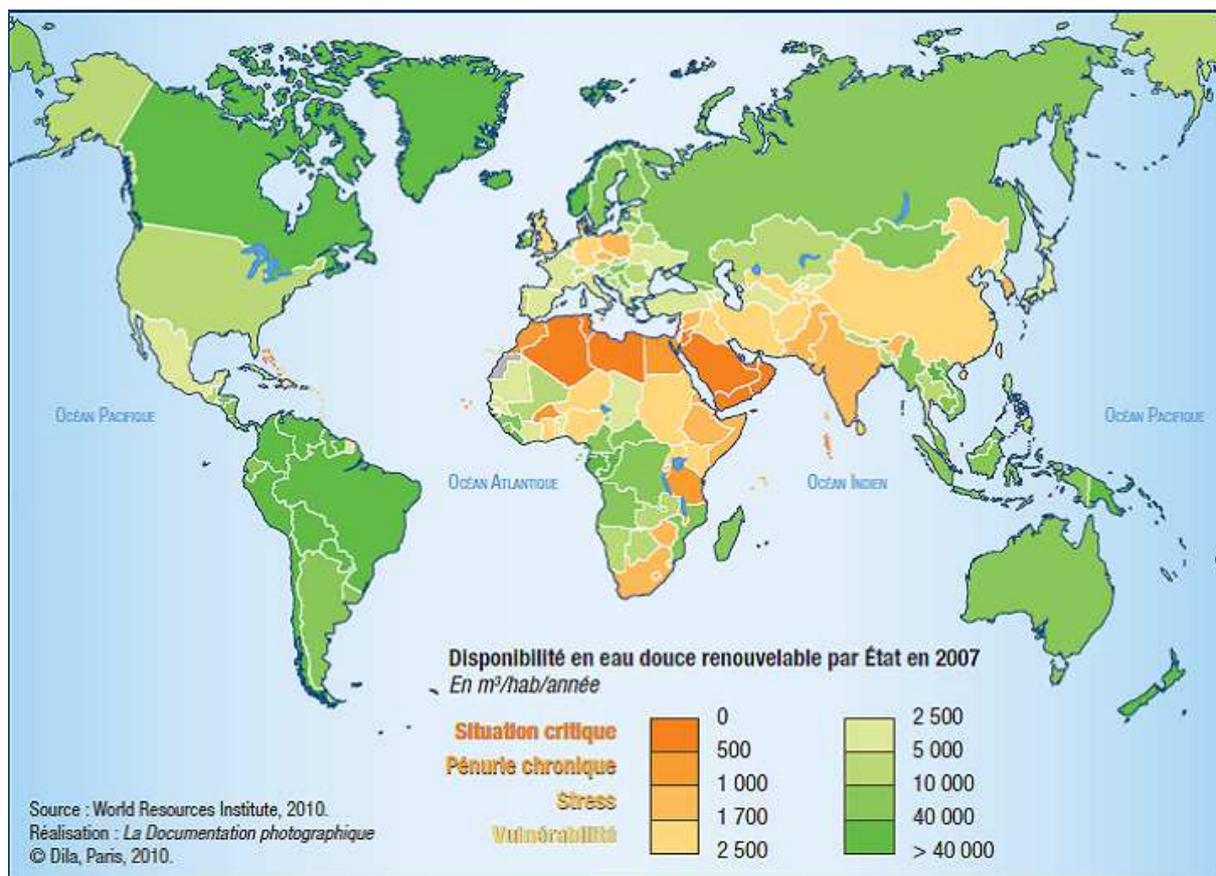


Figure I.2 : Disponibilité en eau douce dans le monde [5]

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 [6].

Par ailleurs, la demande en eau douce, croit 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. Le tableau I.1 donne une prévision de diminution des potentialités en eau potable par habitant dans l'Algérie [7].

Tableau I.1 : Chute des ressources en eau potable par habitant dans l'Algérie [7]

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

I.2 Solution apportée par le dessalement, en particulier le procédé par osmose inverse

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses est le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses 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 conduits notamment à la baisse importante du coût de production. Avec plus de 17000 unités installées dans le monde, qui représentent aujourd'hui environ 51 millions de m³/jour d'eau produite, il est estimé que la production d'eau dessalée se situera à 109 millions de m³/jour en 2016 [8].

La figure I.3 montre une prévision de la capacité de dessalement jusqu'en 2015 dans différentes régions du monde [9].

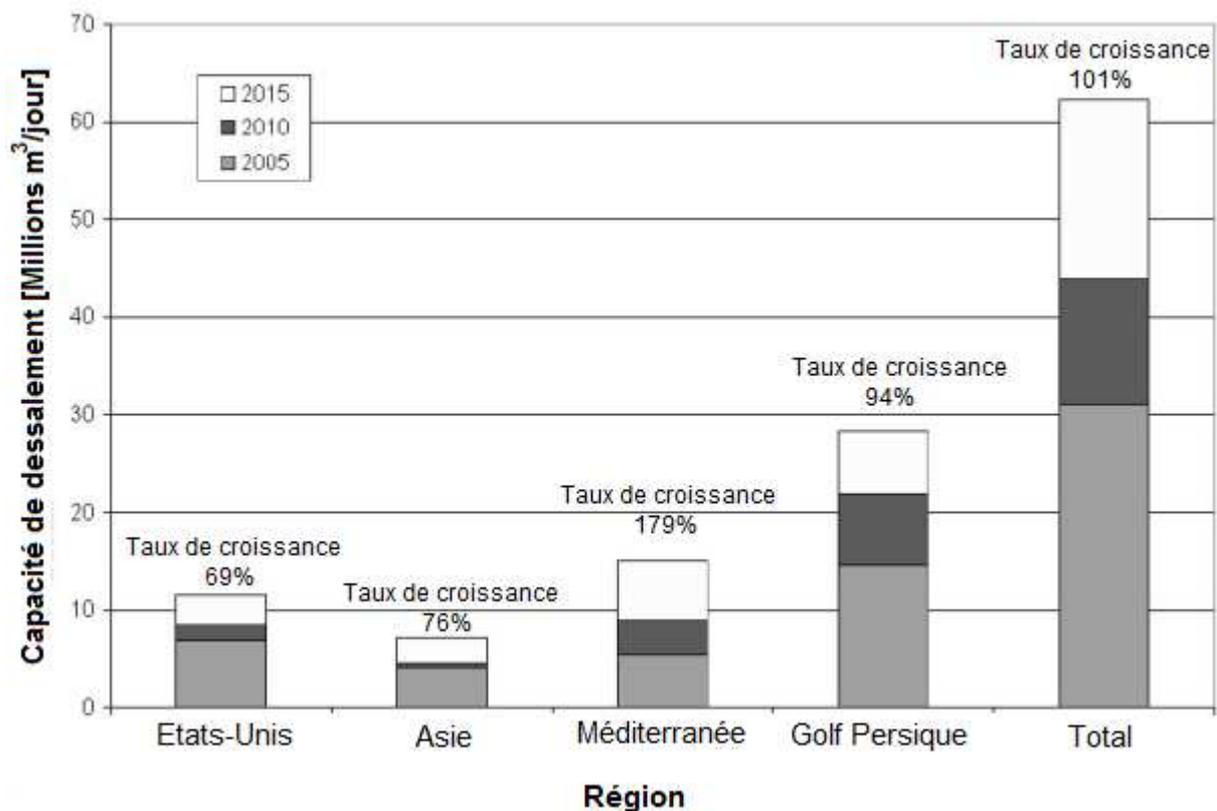


Figure I.3: Prévisions de croissance de la capacité de dessalement dans le monde [9]

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ce qui a incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer. Aux dix usines de productions déjà opérationnelles, le pays souhaite en rajouter 33 autres d'ici 2019 et doubler les capacités journalières actuelles qui s'élèvent à 1,04 million de m³ pour répondre aux besoins domestiques nationaux.

Par ailleurs, il a été prévu le dessalement des eaux saumâtres des Chotts dans les régions arides du pays et cela au sud et dans la région intermédiaire (les hauts plateaux). Dans ce cadre plusieurs stations de type monobloc à faible débit de traitement (100 à 200 m³/j) ont été réalisées pour traiter des eaux des chotts à 7 g/L et mises à la disposition des collectivités locales destinées uniquement à l'alimentation en eau potable des populations [10].

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué : la distillation thermique (procédé utilisant une consommation très importante d'énergie), principe non retenu à l'échelle commerciale, et la filtration membranaire qui est très efficace et permet de retenir les sels et toutes impuretés. Sa bonne fiabilité fait qu'elle atteint aujourd'hui 50% de la part du marché de dessalement [11].

La figure I.4 représente l'évolution historique et prévisionnelle de la capacité cumulative des technologies de dessalement thermiques et membranaires [12].

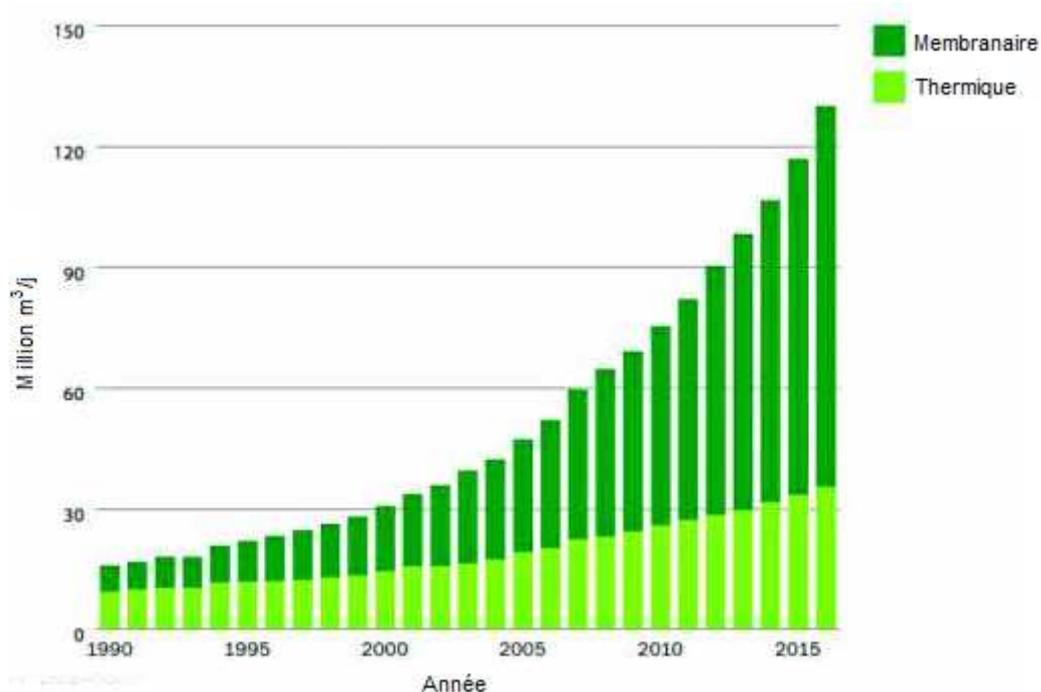


Figure I.4 : Croissance de la capacité cumulative des technologies thermiques et membranaires (1990-2016) [12]

Parmi les techniques de filtration membranaire, l'osmose inverse (OI) est une technologie prometteuse dont les performances ont été prouvées [13]. Il est utilisé en dessalement des eaux saumâtres, des eaux de mer et également pour la réutilisation des eaux usées urbaines et industrielles. En dessalement des eaux saumâtres, ce procédé a été longtemps en compétition avec diverses techniques comme l'échange ionique, l'électrodialyse. Toutefois, leurs limites technologiques les ont progressivement défavorisées par rapport à l'OI. Les facteurs qui ont permis une évolution à la baisse du coût de dessalement par le procédé d'OI sont :

- la réduction des coûts d'investissement et notamment le coût des membranes ;
- l'amélioration des performances techniques des membranes par l'accroissement du taux de conversion et la réduction de la pression d'alimentation ;
- l'amélioration des performances énergétiques des machines tournantes (moteurs, pompes, turbines) ;
- le progrès en matière de récupération d'énergie ;
- l'augmentation des capacités d'installation et la réduction des coûts par l'effet d'échelle.

Grâce à ces développements successifs, la consommation énergétique rapportée au mètre cube d'eau produit par la technique d'OI est passée respectivement d'une valeur de 16 kWh/m³ dans les années 1970 à des valeurs de 3 à 6 kWh/m³ dans les années 1990 et à une valeur avoisinant 2 kWh/m³ actuellement (Fig. I.5) [14].

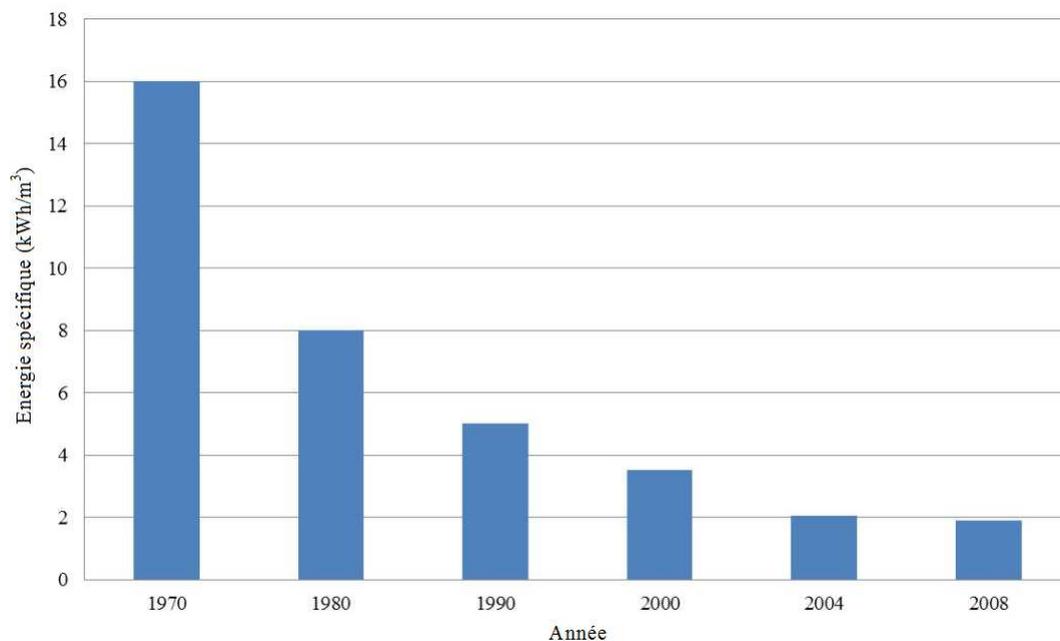


Figure I.5 : Réduction de la consommation spécifique avec l'osmose inverse [14]

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 comme le montre la figure I.6 [15]. C'est donc 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.

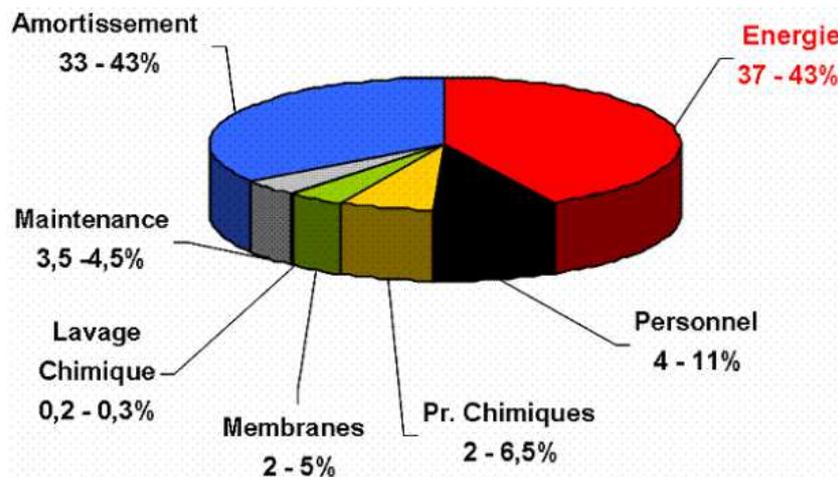


Figure I.6 : Structure moyenne des coûts d'exploitation d'une usine de dessalement par osmose inverse [15]

I.3 Problématique de l'environnement

Récemment, le problème environnemental est devenu lui aussi un axe de recherche significatif pour ce thème. Le principal impact environnemental associé aux procédés de dessalement provient de la production de la saumure, solution à forte teneur en sels résultant de la concentration de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre dessalée. Cependant, les rejets des usines de dessalement ne comprennent pas seulement l'effluent de saumure concentrée mais également des eaux chaudes et des effluents aqueux tels que les distillats et condensats d'éjecteur. L'autre trait marquant des procédés de dessalement est qu'ils nécessitent un apport d'énergie thermique ou mécanique afin de réaliser la séparation de l'eau douce et de l'eau salée d'alimentation. Cet apport d'énergie se traduit par une hausse de la température de la saumure éliminée et par des rejets thermiques et des émissions atmosphériques associées à la production d'électricité. Les autres impacts environnementaux à prendre en considération sont : les problèmes de dégradation paysagère, le bruit généré principalement par les pompe HP et certains dispositifs de récupération d'énergie (DRE), ou encore les rejets associés comme les eaux provenant du nettoyage (filtres de sable, membranes et dépôts).

Le tableau I.2 [16] résume l'impact environnemental des principaux procédés de dessalement.

Tableau I.2 : Récapitulatif des impacts environnementaux [16]

Paramètres	Osmose inverse	Distillation
Bruit	3	2
Rejet Température	0	3
Salinité	1	1
Réactifs	1	3
Traitement des boues	1	1
Gaz à effet de serre	2	3

Il est à noter que des efforts importants ont permis de réduire de façon très importante les principaux paramètres :

- la consommation énergétique du dessalement par OI a été divisée par un facteur 3–4 ces dernières années ;
- le couplage à des sources d'énergie renouvelable (SER) permet de diminuer fortement la production de gaz à effet de serre associée à ces procédés ;
- les études d'impact sur le milieu ont permis de développer et d'appliquer des systèmes de dilution, limitant fortement l'effet sur la faune et la flore du milieu naturel au voisinage du rejet, dilution qui a d'ores et déjà démontré son efficacité.

I.4 Problématique des sites isolés

Une autre problématique non moins importante qui s'ajoute à celles détaillées précédemment, est celle des sites isolés. Des récentes estimations ont montré qu'actuellement près de 2,2 milliards d'individus ne sont pas toujours raccordés aux grands réseaux de distribution d'électricité [17], ce qui représente environ 44% de la population mondiale, pour la plus part située dans les pays en voie de développement (Fig. I.7) dont l'Algérie, où plus de 50% vivent encore sans électricité, 95% d'entre eux vivent dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, de la présence des régions rudes et d'une faible densité de population.

Dans la plupart des régions isolées, l'approvisionnement électrique dépend seulement des systèmes de génération diesel autonomes. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique est prohibitif et le prix de combustible augmente radicalement avec l'éloignement ce qui rend la production d'électricité économiquement très dispendieuse.

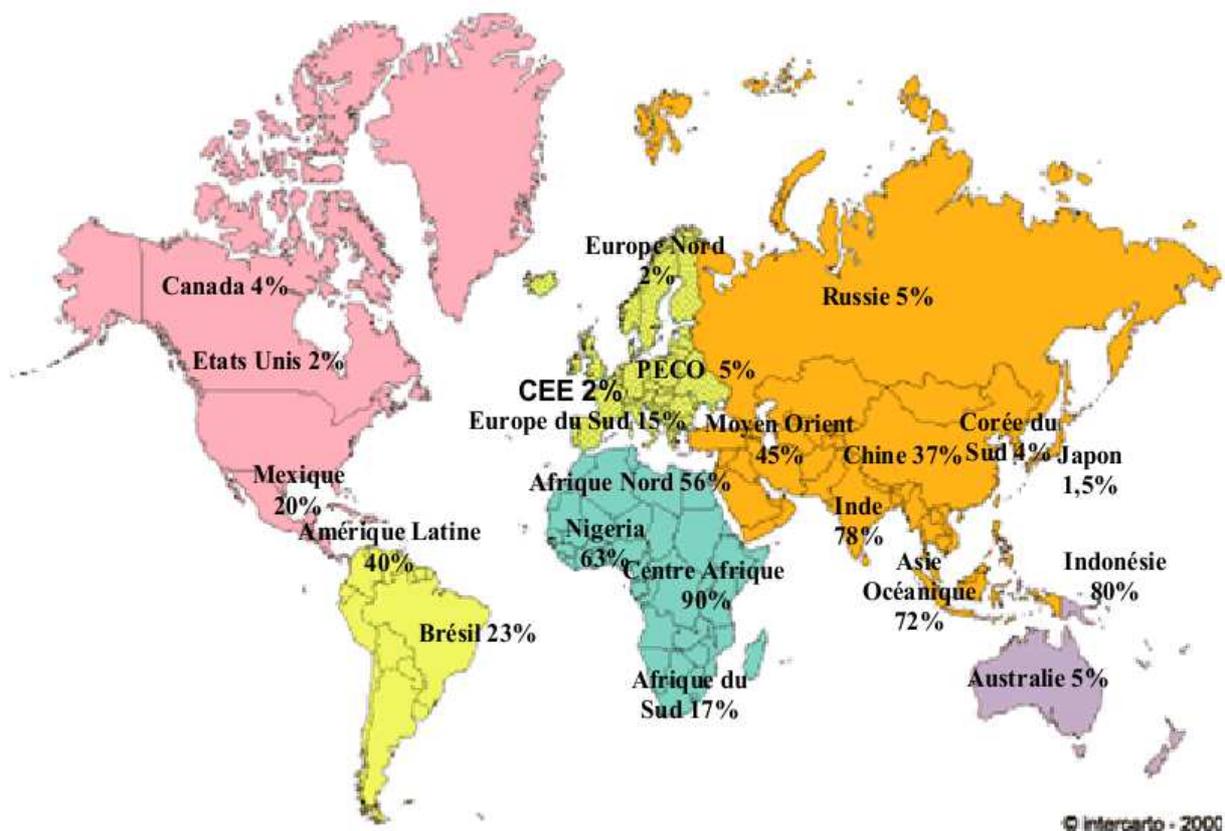


Figure I.7 : Pourcentage de la population non raccordée au réseau de distribution d'électricité [18]

I.5 Solution apportée par les énergies renouvelables, dont principalement l'énergie éolienne

Dans ces conditions, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques aux SER est une alternative prometteuse pour la satisfaction des besoins énergétiques dans les régions isolées. Cette solution technologique aura sans doute une incidence profitable sur la production de l'énergie électrique, en termes de coût, de disponibilité, de la protection de l'environnement et du développement social de ces régions.

Parmi toutes les SER, l'énergie éolienne est la source alternative la plus prometteuse [19]. En effet, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des SER les plus compétitives. Ceci explique le très fort taux de croissance de cette filière énergétique partout dans le monde, comme le montre la figure I.8 [20].

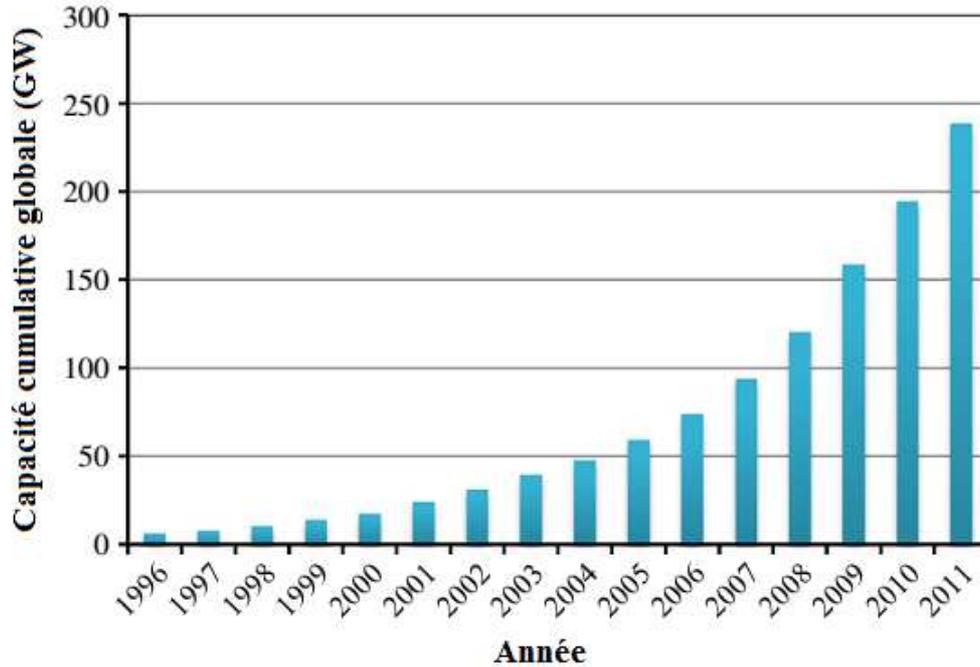


Figure I.8 : Évolution de la capacité de l'énergie éolienne installée dans le monde [20]

En Algérie, la part des SER dans le bilan énergétique national est encore très faible. Cependant, l'Algérie 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 2015, à environ 5% de la production nationale d'électricité. Pour atteindre cet objectif, plusieurs projets sont à développer et à réaliser dans ce domaine.

Dans la filière éolienne, le peu de projets réalisés concernait l'installation de pompes éoliennes. Cependant, l'Algérie envisage de construire plusieurs 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. Ces fermes permettront de renforcer les sources énergétiques actuelles, disponibles au niveau de la région, constituées de centrales fonctionnant au diesel [21].

I.6 Dessalement par énergie éolienne

Le recours à l'énergie éolienne couplée aux unités de dessalement peut constituer une alternative potentielle pour pallier le déficit en ressources conventionnelles dans les régions isolées possédant un gisement éolien important. Cependant, l'utilisation de l'énergie éolienne pour le dessalement conventionnel souffre de deux contraintes : son coût élevé et la discontinuité de la production (aléas climatiques).

Pour pallier la première, l'utilisation de procédés de dessalement à très hautes performances énergétiques est impérative. Le procédé d'OI, utilisant uniquement de l'énergie électrique ou mécanique, est le plus performant du point de vue énergétique (soit 2 kWh/m³ dans le cas de l'eau de mer). Pour pallier la seconde, il y a une nécessité d'un stockage d'énergie ou de couplage avec d'autres sources d'énergie (hydraulique, thermique).

Différentes approches pour les systèmes de dessalement par énergie éolienne sont possibles. D'abord, la turbine éolienne et l'unité de dessalement sont connectées à un réseau électrique (on-grid). Dans ce cas, les dimensions optimales du système de conversion éolien et de l'unité de dessalement ainsi que les coûts prohibés de carburant sont d'intérêt.

La seconde possibilité est basée sur un couplage plus ou moins direct de la (les) turbine (s) éolienne (s) et l'unité de dessalement (stand-alone). Dans ce cas, le système de dessalement est affecté par les variations de puissance et les interruptions provoquées par la source d'énergie (vent). Ces variations de puissance ont, néanmoins, un effet négatif sur les performances et la durée de vie des composants de certains équipements de l'unité de dessalement. Par conséquent, des systèmes de stockage, comme les batteries, les générateurs diesel ou les volants d'inertie pourraient être intégrés dans le système [22].

Les systèmes de dessalement éoliens autonomes peuvent être une option très intéressante dans les régions isolées, où le raccordement au réseau électrique public n'est pas rentable ou non réalisable, et où la pénurie d'eau est sévère.

En Algérie, dans le cadre de projets d'implantation de fermes éoliennes dans le sud du pays, le dessalement des eaux saumâtres à l'aide de l'énergie éolienne pourra jouer un rôle important et constituer une alternative viable à prendre en considération. En effet, ces fermes éoliennes peuvent permettre d'électrifier avec une grande autonomie des sites isolés et d'assurer la fourniture de l'énergie électrique des unités de dessalement dimensionnées à la mesure des besoins en eau potable.

I.7 Choix et description des sites étudiés

L'étude de faisabilité porte sur des sites situés au sud de l'Algérie. Région, dont le climat chaud et sec en été et très froid en hiver, est caractérisé par de longues périodes de sécheresse et des précipitations irrégulières qui accroissent les besoins en eau.

L'Atlas vent du sud de l'Algérie (Fig. I.9), réalisé en utilisant les vitesses moyennes à 10 m d'altitude [23] montre une zone climatique ventée dont le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6,5 m/s.

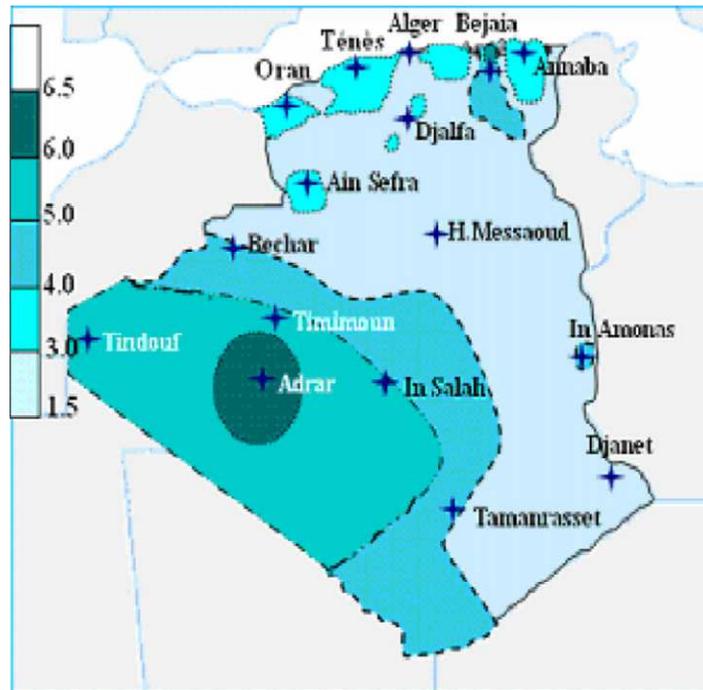


Figure I.9 : Carte de vent de l'Algérie [23]

En outre, la majorité de cette partie du Sahara a une ressource importante en eau saumâtre. Il existe deux types de ressources : les ressources renouvelables qui sont localisées dans le bassin versant de Chott Melrhir et les bassins de Hoggar-Tassili et Saoura-Tindouf ; et les ressources non renouvelables situées au Sahara Septentrional (Fig. I.10) qui englobent une série de couches d'aquifères qui ont été regroupées en deux importants réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) [24].

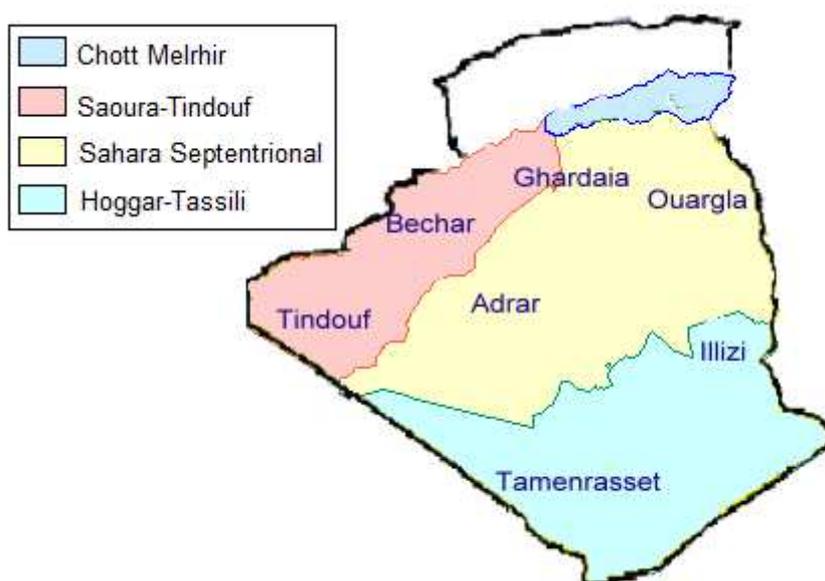


Figure I.10 : Bassin hydrographique du Sahara [24]

En considérant ces paramètres et vu que le sud de l'Algérie, est connu pour son habitat dispersé qui n'est pas relié au réseau d'alimentation électrique, les sites d'Adrar, Timimoun et Tindouf ont été choisis pour l'étude de faisabilité.

Les données géographiques et météorologiques des trois sites sont résumées dans le tableau I.3 [25,26].

Par ailleurs, les variations de la moyenne mensuelle et des moyennes annuelles horaires de la vitesse du vent des sites étudiés sont représentées en figures I.11 et I.12 [26].

Tableau I.3 : Données géographiques et météorologiques des sites étudiés [25,26]

Sites	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Altitude (m)	Vitesse moyenne annuelle (m/s)
Adrar	27°49'N	00°17'E	263	6,3
Timimoun	29°15'N	00°17'E	312	5,8
Tindouf	27°40'N	08°06'W	401	5,1

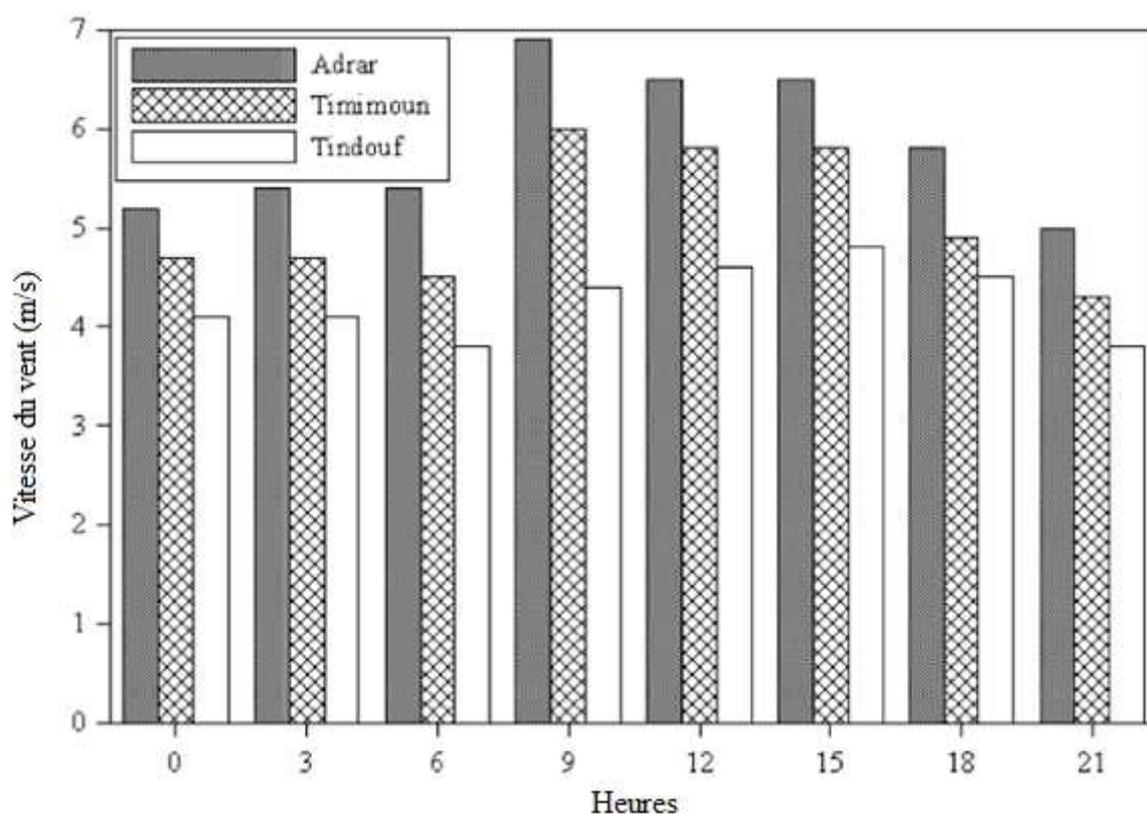


Figure I.11 : Évolution de la vitesse moyenne horaire du vent pour les trois sites (à 10 m du sol) [26]

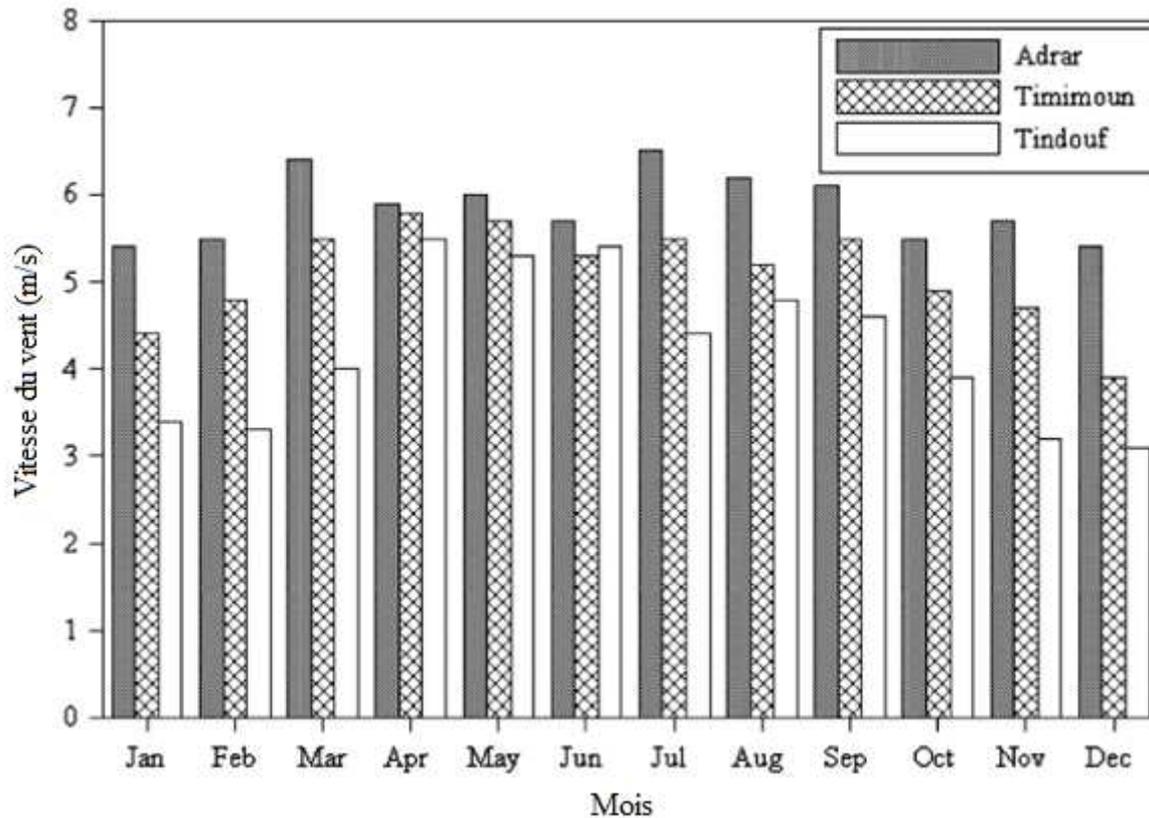


Figure I.12 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent des sites étudiés [26]

Comme le montre ces figures, un maximum de vitesse de vent se produit à 09h00 dans les trois sites. Quant au minimum, il se produit à 21h00. En général, les vitesses de vents élevées sont observées durant la journée entre 09h00 et 18h00 tandis que celles les plus faibles le reste de la journée (durant la nuit). Ainsi, un maximum de vitesse moyenne mensuelle de vent est trouvé pendant la période Juillet-Septembre et le mois de Mars. Quant au minimum, il se produit durant la période hivernale. Les données montrent aussi que le site d'Adrar présente un potentiel éolien plus important par rapport aux deux autres sites du fait que le vent souffle à une vitesse relativement élevée pendant longtemps. En effet, le vent souffle à une vitesse supérieure à 5 m/s durant toute la journée et supérieure à 6 m/s pendant presque 10 heures (plus de 40% du temps) et cela seulement à 10 m du sol.

I.8 Contexte et objectifs de la recherche

Ce travail de recherche entre dans le cadre du développement durable pour les sites isolés. En effet, le seul système de dessalement à OI par énergie renouvelable qui existe dans le sud de l'Algérie consiste en une unité de petite échelle située à Hassi-Khebi (Wilaya de Tindouf) alimentée par un générateur solaire photovoltaïque (PV).



(a) Générateur photovoltaïque 2,59 kW crête



(b) Modules d'osmose inverse

Figure I.13 : Unité de dessalement solaire de Hassi-Khebi

L'unité produit approximativement 950 L/h de l'eau potable à environ 800 habitants de ce village à partir des eaux saumâtres provenant d'un forage avec une salinité de 3,2 g/L. Le coût du mètre cube d'eau traitée sur la base d'un amortissement sur 20 ans a été estimé à 6 \$/m³ qui reste très élevé comparé au coût de l'eau produite par les systèmes de dessalement conventionnels.

Concernant l'énergie éolienne, son implantation se limite à la production de l'électricité à une petite échelle et à quelques installations de pompage d'eau pour l'irrigation des terres agricoles. Toutefois, le problème posé reste dans la qualité de l'eau et sa salinité qui risque de causer la stérilité des sols à long terme. Ainsi, l'objectif principal de ce thème est d'accomplir une étude, analyses et recherches des propositions d'optimisation de la consommation d'énergie dans les unités de dessalement à grande échelle pour répondre aux besoins en alimentation d'eau potable en milieu rural. À cet effet, on va envisager le couplage de la technique d'OI avec des systèmes de conversion éoliens autonomes pour le dessalement des eaux saumâtres de quelques régions du sud de l'Algérie ayant un potentiel énergétique éolien très important. Un système de dessalement par OI équipé d'un DRE et alimenté par une turbine éolienne d'une puissance nominale de 1 MW est proposé pour élucider sa faisabilité technique et économique. L'influence des différents paramètres de fonctionnement sur la performance du système est ainsi étudiée. Ce travail est accompli par la présentation de l'intérêt environnemental évident qu'offre cette alternative, en particulier pour les sites isolés.

I.9 Plan de la thèse

Ce travail est composé de deux parties et de six chapitres. Ainsi après avoir exposé la problématique du thème de recherche, une description de la région d'étude a été présentée dans ce premier chapitre.

La première partie, composée de trois chapitres, est réservée à la recherche bibliographique concernant les systèmes de conversion éoliens et leurs applications ainsi que l'essentiel des travaux portant sur l'estimation des potentiels éoliens ; la conception et les paramètres de fonctionnement des systèmes de dessalement par la technique d'OI ainsi que les mécanismes de transport au sein des membranes ; et l'état de l'art des technologies de dessalement par énergie éolienne.

La deuxième partie est composée de deux chapitres où l'un est consacré à la présentation du système proposé et le développement du modèle numérique sous FORTRAN à partir des lois et approches mathématiques disponibles dans la littérature. Les résultats de modélisation seront ainsi discutés dans ce chapitre. Dans l'autre chapitre, une étude économique et environnementale sera élaborée moyennant le logiciel HOMER et l'ensemble des résultats de simulation sera exposé et interprété.

Enfin, la conclusion générale synthétisera les principaux résultats de thèse et présentera quelques perspectives de ce travail.

PARTIE I
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE II
SYSTÈMES DE CONVERSION DE
L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

CHAPITRE II

SYSTÈMES DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

II.1 Introduction

Le vent est une SER, économique, exploitable avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement. Dans le monde entier, les ressources d'énergie éolienne sont pratiquement illimitées. Les récents développements technologiques dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, par le biais de l'électronique de puissance et de la commande de machines électriques tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile [25].

L'Allemagne est aujourd'hui le premier producteur d'énergie à partir du vent, avec une puissance installée de 16630 MW, et plus de 15000 turbines opérationnelles [26,27]. Elle est suivie par l'Espagne avec quelques 8260 MW. Les Etats-Unis sont en troisième position avec 6740 MW de puissance installée, suivis par le Danemark avec 3120 MW et l'Inde avec 3000 MW installés. L'Europe concentre pratiquement le reste de la production mondiale. Les Pays-Bas, le Royaume-Uni et l'Italie progressent fortement en ce domaine. D'autres pays envisagent de développer considérablement cette source d'énergie : par exemple, la Chine et l'Australie [27].

En Algérie, la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national est encore très faible. Cependant, l'Algérie dispose actuellement de tous les atouts nécessaires pour le développement des énergies renouvelables. 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. Parmi ces projets on trouve les projets d'implantation de fermes éoliennes dans le sud du pays [19].

II.2 Principes et éléments constitutifs de l'éolien

II.2.1 Principe de fonctionnement

L'éolienne, appelée aussi aérogénérateur, est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique.

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de forces moyennes fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes [28].

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

II.2.2 Éléments constitutifs d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux (Fig. II.1) :

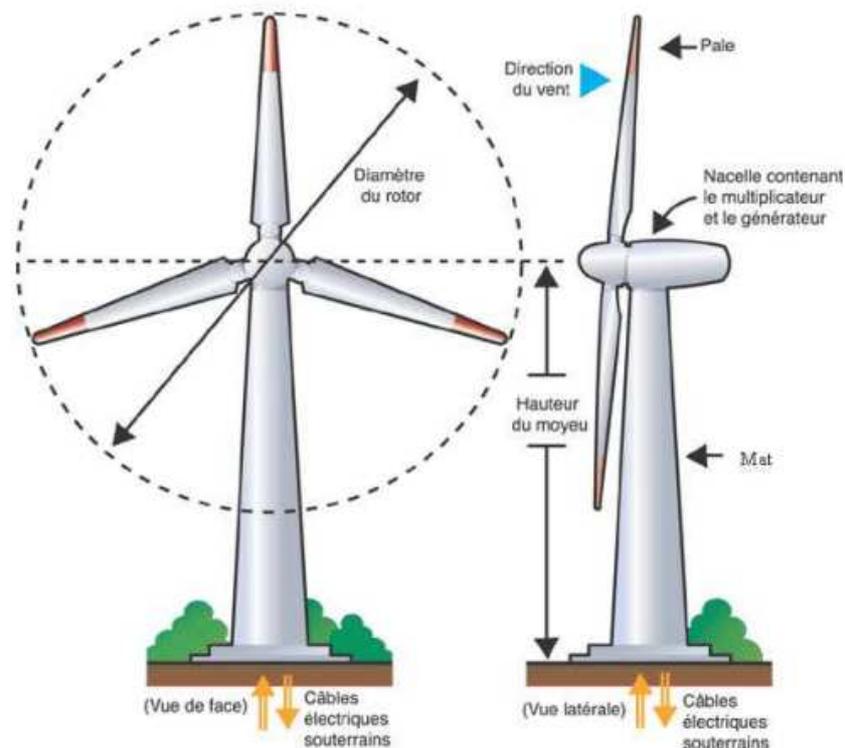


Figure II.1 : Schéma d'ensemble d'une éolienne [28]

II.2.2.1 Le mât

C'est généralement un tube en acier, il supporte l'ensemble des équipements (nacelle + rotor), il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, suivant le type de l'éolienne il varie entre 10 et 100 m. Etant donné que le vent souffle plus fort en hauteur le mât des éoliennes à axe horizontal est généralement entre 80 et 100 m, à l'intérieur sont disposés des câbles de transport de l'énergie électrique, les appareillages de connexions au réseau de distribution (transformateur) ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

II.2.2.2 La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique tel que l'arbre lent et rapide, les roulements, le multiplicateur, le générateur et les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle. Pour capter au mieux l'énergie du vent, un calculateur est intégré dans la nacelle, afin d'orienter l'hélice perpendiculairement à la direction du vent, de modifier l'angle de calage des pales dans le cas d'un contrôle pitch, pour contrôler et coordonner tout cela la nacelle contient aussi divers actionneurs de commande. Les signaux émis par l'anémomètre sont transmis au système de contrôle commande de l'éolienne pour démarrer celle-ci si la vitesse du vent atteint 5 m/s ou de l'arrêter si le vent dépasse 25 m/s. Pour le système d'orientation de la nacelle, une girouette placée sur la nacelle indique le sens du vent, les signaux transmis à l'ordinateur permettent de commander le système d'orientation de la nacelle face au vent. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

L'arbre lent relie le moyeu au multiplicateur et est muni d'un système de freinage hydraulique en cas de besoin. La vitesse de rotation de l'hélice est de 12 à 15 tr/min ce qui n'est pas suffisant à un alternateur pour fonctionner correctement, un multiplicateur est donc placé juste avant l'alternateur pour augmenter la vitesse de rotation à environ 1500 tr/min. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique actionné en cas d'urgence.

II.2.2.3 Le rotor

Le rotor est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. En effet un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

II.2.3 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.2. 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. Les principales composantes de la nacelle d'une éolienne classique sont illustrées à la figure II.3 [29].

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 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.

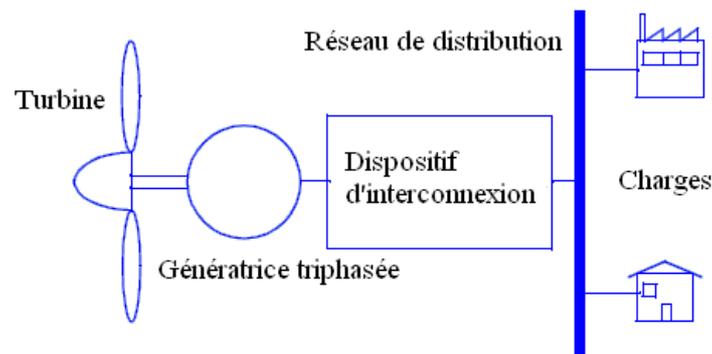


Figure II.2 : Structure d'un système normal de conversion de l'énergie éolienne [29]

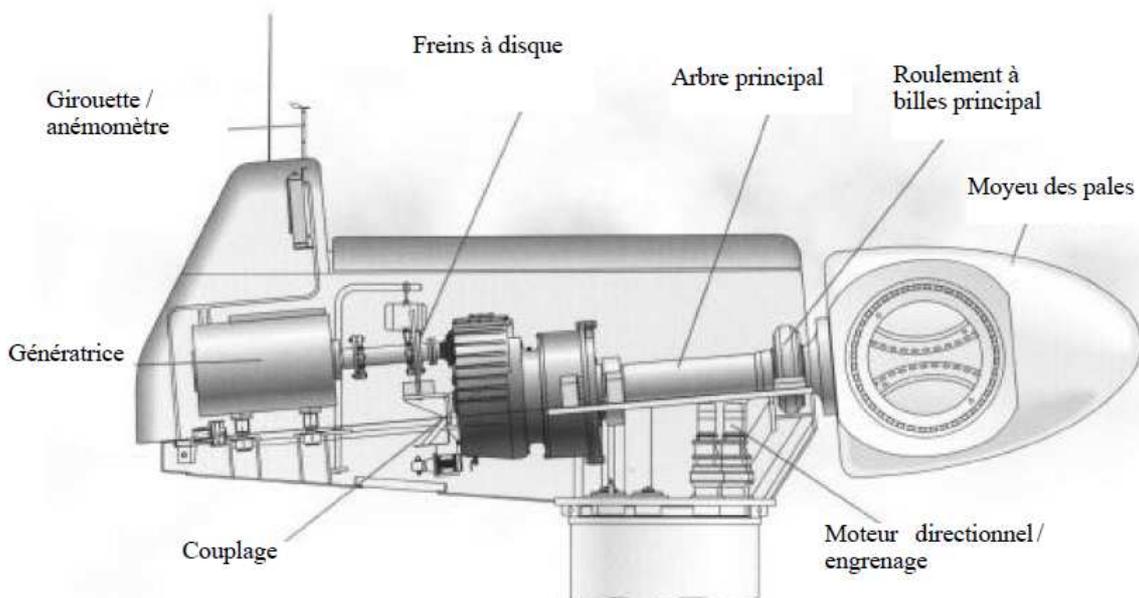


Figure II.3 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine [29]

La configuration à entraînement direct, où le rotor de la turbine est couplé directement à la génératrice, est d'une grande fiabilité, exige une maintenance minimale et permet parfois de réduire les coûts. Plusieurs concepteurs ont opté pour la configuration à entraînement direct pour leurs nouvelles turbines.

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.3 Systèmes de Stockage pour la production d'électricité

II.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 [30]. La nature intermittente des SER comme le solaire, l'éolien et les marées 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.

II.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 [31]. On distingue deux grandes catégories:

II.3.2.1 Énergie intermédiaire: énergie électrochimique

a) Stockage sous forme d'hydrogène

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

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.

III.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 [32]. 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.4 Systèmes éoliens autonomes

II.4.1 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.

Les communautés isolées, soit celles qui ne sont pas desservies par un réseau électrique, utilisent couramment des systèmes diesel pour produire de l'électricité puisque ces derniers sont fiables. Cependant, la hausse des coûts des combustibles fossiles ainsi que le désir de réduire les émissions des gaz à effet de serre font que les systèmes diesel sont maintenant remplacés par des systèmes autonomes d'énergie renouvelable afin d'alimenter ces communautés en électricité. Les systèmes éoliens peuvent être classifiés à partir de leur puissance installée comme le montre le tableau II.1 [33].

D'après ce tableau, un système éolien micro comporte une petite éolienne de moins de 1 kW ; un système éolien maison possède une puissance installée entre 1–100 kW et comprend généralement une éolienne de 1–50 kW ; un système éolien autonome possède entre 10 kW et 10 MW de puissance installée avec des éoliennes de 100 kW à 3 MW ; tandis que la puissance installée d'un système éolien industriel est habituellement plus que 10 MW venant de plusieurs éoliennes de plus de 500 kW chacune.

Les principales composantes d'un système éolien autonome sont : l'éolienne, une source de génération d'énergie primaire ou seconde selon la configuration du système (exemple : générateur diesel), un contrôleur, un inverseur et enfin, la demande ou charge énergétique (bâtiments, etc.). Lors de la configuration des systèmes plus complexes, d'autres composantes peuvent s'ajouter.

Tableau II.1 : Classification des systèmes éoliens [33]

Puissance installée	Classification
< 1 kW	Système éolien micro
1–100 kW	Système éolien maison
10 kW–10 MW	Système éolien autonome
> 10 MW	Système éolien industriel

II.4.2 Types de systèmes éoliens autonomes

Les systèmes éoliens autonomes sont habituellement classifiés selon deux facteurs. Premièrement, ils sont classifiés selon le type de système de production énergétique accompagnant le système éolien dans un système donné. Cette conception est due au fait que l'énergie éolienne varie selon la vitesse du vent et donc n'est jamais constante.

L'utilisation d'un second système de production énergétique assure que la production énergétique totale de l'ensemble des deux systèmes demeure relativement constante et/ou peut fournir à la demande de la communauté ou des utilisateurs.

Les systèmes éoliens autonomes les plus répandus sont : les systèmes éolien/diesel, les systèmes éolien/photovoltaïque, les systèmes éolien/hydrogène et les systèmes éolien/hydro.

Deuxièmement, les systèmes éoliens autonomes sont aussi classifiés selon le degré de pénétration de l'énergie éolienne dans le système par rapport à la charge d'énergie totale à être alimentée. Les systèmes éoliens autonomes sont alors classifiés selon trois niveaux de pénétration : faible, moyenne et élevée [34]. Les caractéristiques de chacun des systèmes sont présentées dans le tableau II.2 par rapport aux systèmes éolien/diesel autonomes.

II.4.3 Taux de pénétration du vent

La quantité d'énergie récupérée par les technologies associées aux sources renouvelables dans les systèmes de puissance isolés influence la structure, la performance et l'économie du système. Le taux de pénétration des générateurs éoliens dans les réseaux électriques représente le ratio de la production éolienne et de la demande du réseau fiable. Plus le taux de pénétration est élevé, plus grand est l'impact potentiel des générateurs éoliens sur la stabilité du réseau électrique auquel ils sont connectés [35]. Les volumes et périodes de production éolienne ne correspondant pas aux volumes et périodes de consommation électrique. Pour disposer d'électricité au moment que l'on désire, on a recours à un système qui combine l'éolienne et une source d'énergie avec une production garantie.

Les systèmes éoliens peuvent ainsi être équipés d'un dispositif de stockage d'énergie (volant d'inertie, batterie, etc.), qui fournit, pour un temps limité, de l'électricité de remplacement quand le vent n'est pas propice, et d'une source de production au diesel (groupe électrogène) pour la génération d'électricité à long terme. De nos jours, dans les réseaux concernés par la présente, le groupe électrogène diesel est la source principale de production d'électricité. Dans l'application en groupe électrogène, la capacité de bon fonctionnement en puissance variable est essentielle pour garder la stabilité du réseau lorsque varient les besoins des clients qui y sont raccordés.

Tableau II.2 : Niveau de pénétration des systèmes éolien/diesel autonomes [34]

Niveau de pénétration	Caractéristiques du système	Pénétration instantanée maximale	Pénétration annuelle moyenne
Faible	<ul style="list-style-type: none"> Générateur diesel fonctionnent en tout temps Énergie éolienne utilisée pour réduire la charge nette sur les générateurs diesel Toute l'énergie éolienne est transmise à la charge primaire du système Aucun système de contrôle 	< 50%	< 20%
Moyenne	<ul style="list-style-type: none"> Générateur diesel fonctionnent en tout temps Utilise une charge secondaire fin de contrôler les fluctuations de génération d'énergie éolienne Requière un système de contrôle simple 	50–100%	20–50%
Élevée	<ul style="list-style-type: none"> Lors des vents élevés, les générateurs diesel peuvent être mis hors service Utilise des composants auxiliaires afin de contrôler la tension et la fréquence de l'électricité générée Requière un système de contrôle complexe 	100–400%	50–150%

Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, des systèmes de stockage et des systèmes de génération intermédiaires, de nouvelles méthodes de gestion multi sources et algorithmes de contrôle sont apparus pour optimiser cette génération d'énergie [36]. Dans le cas d'un usage en site isolé, pour des applications nordiques par exemple [37], dont l'alimentation est généralement assurée par des groupes électrogènes diesels seulement, le carburant est généralement plus cher car il faut prévoir des coûts de transport additionnels vers ces endroits isolés, parfois difficilement accessibles. C'est pourquoi l'utilisation des groupes électrogènes diesels combinés à une SER et un système de stockage, formant ainsi un système hybride, est appelée à jouer un rôle essentiel, et permet de réduire la consommation du carburant par les groupes électrogènes diesels et éventuellement réduire les coûts d'opération. Les variations de la puissance produite par l'éolienne peuvent être absorbées par le groupe électrogène, ou par les systèmes de stockage.

II.5 Tendances et récentes améliorations

En plus de l'installation de grands parcs off-shore et la fabrication de machines encore plus grandes, des projets de recherche portant sur tous les différents aspects de la technologie éolienne commencent à voir le jour. Ceci donne de l'espoir au développement de nouvelles conceptions pour faire de cette filière un outil de production encore plus présent et compétitif sur le marché énergétique.

II.5.1 Système mécanique

De nouvelles sortes d'engrenages, comme les boîtes de vitesses planétaires à plusieurs étages et à étages hélicoïdaux sont en développement [38]. Avec ces progrès, les systèmes devraient améliorer leurs rendements et la puissance mécanique récupérée.

Des valeurs de couple et de vitesse de rotation supérieures sont synonymes d'une meilleure conversion électromécanique dans les générateurs fonctionnant à haute vitesse. La conception et la fabrication des pales pour inclure des matériaux légers comme la fibre de carbone et des composites hybrides de carbone/verre sont aussi l'objet de programmes de recherche. Bien qu'étant plus coûteuse que la fibre de verre utilisée couramment, la fibre de carbone est beaucoup plus résistante et plus légère.

Les tours d'acier ou de ciment pour les turbines de plusieurs MW sont déjà courantes et permettent l'emploi de nouvelles méthodes de production de ces mâts pour éoliennes de façon à réduire les coûts de fabrication et de transport.

II.5.2 Système électrique

De nouveaux générateurs, en configurations multipolaires, machines à haute tension, à réluctance commutée, à flux axial et transversal sont en développement pour réduire la masse et améliorer le rendement du générateur. Pour réduire les coûts et augmenter le rendement des systèmes éoliens, de nouvelles améliorations de la conversion d'énergie employant des composants électroniques de puissance sont en cours.

Dans ce contexte, de nouveaux dispositifs électroniques de puissance sont à l'en étude pour remplacer le silicium par du carbure de silicium (silicon carbide). Ce dernier a l'avantage de travailler à haute tension et de supporter des températures élevées. Cette technologie permettrait de réduire la taille des convertisseurs de puissance et de les faire plus compétitifs. L'utilisation de composants de moyenne tension pour diminuer le coût des systèmes de conversion des grandes turbines éoliennes. Actuellement, diverses topologies de convertisseurs statiques de plusieurs mégawatts sont aussi en développement pour fournir une conversion de puissance économiquement efficace, avec une haute fiabilité et une qualité élevée.

II.5.3 Intégration de l'énergie éolienne et nouvelles applications

Des aspects comme la prévision de la vitesse du vent et, en conséquence, l'estimation de la quantité de puissance apportée par les fermes éoliennes permettra de faire une prédiction plus juste de la valeur de l'électricité produite.

Ceci aidera à la planification, à la programmation et à la coordination entre la génération et la demande du système et, aura ainsi des effets bénéfiques sur des contrats de fourniture d'énergie. Des actions au niveau de l'amélioration des précisions des modèles peuvent assurer le succès de ces progrès pour obtenir le maximum de profit à risque minimal.

La croissance rapide de la pénétration éolienne dans les réseaux de puissance présente aussi un nouveau défi pour les opérateurs des grands systèmes électriques. La production des parcs éoliens varie en permanence avec le temps, mais le réseau doit maintenir un équilibre constant entre la production et la demande. De nombreuses études sont menées pour connaître les effets de cette énergie stochastique sur la régulation et la stabilité des réseaux.

Le but est alors d'informer les opérateurs et les planificateurs des réseaux pour leur faire connaître le réel impact associé à cette augmentation de la présence de l'énergie éolienne. Pour fournir de l'énergie à coût marginal faible et stabiliser le fonctionnement dans un réseau avec de la production éolienne, un moyen est de combiner cette production avec de l'énergie hydraulique. Dans ce cas, d'importantes recherches concernant la génération, le transport et l'économie de ces systèmes associés sont en cours.

En plus des applications en chauffage et pompage déjà en utilisation, l'exploration de nouveaux marchés comme les systèmes de désalinisation, la production d'hydrogène, etc., permettra d'ouvrir de nouvelles opportunités d'usage de l'énergie propre à coût faible dans plusieurs secteurs, des systèmes hydrauliques jusqu'aux transports.

II.6 Évaluation des ressources éoliennes

II.6.1 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 :

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

Où : ρ_a : est la masse volumique de l'air généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne $1,25 \text{ kg/m}^3$.

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

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

Où : A est la surface balayée par les pales et r la longueur des pales.

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

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

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.6.2 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 [39].

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 (Fig.II.9). Les hypothèses sont celle d'un fluide parfait (pas de frottement) incompressible en régime permanent. Par conservation de la masse, le débit massique (\dot{m}) le long de veine d'air est constant :

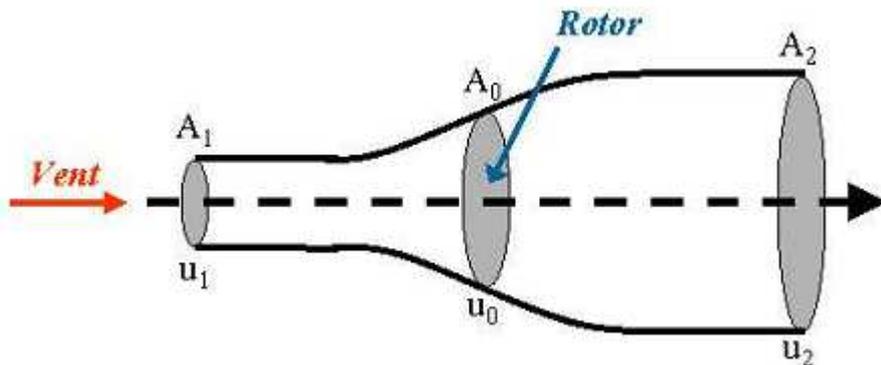


Figure II.9 : Veine d'air traversant la zone balayée par les pales d'une éolienne

$$\dot{m} = \rho_a V_1 A_1 = \rho_a V_2 A_2 \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_u = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_a (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) \quad (\text{II.5})$$

En utilisant l'équation (II.4) et en faisant l'hypothèse que $V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2}$, on a :

$$P_u = \frac{1}{2} \rho_a A_0 u_0 (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho_a A_0 (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.6})$$

En divisant (II.6) par la puissance totale disponible, on fait alors apparaître le facteur de capacité :

$$F_c = \frac{P_u}{\frac{1}{2} \rho_a A_0 V_1^3} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \quad (\text{II.7})$$

Le facteur de capacité représente la fraction de la puissance totale du vent disponible qui est réellement extraite par l'éolienne. En notant $a = V_2/V_1$, on a :

$$F_c = \frac{1}{2} (1+a)(1-a^2) \quad (\text{II.8})$$

On voit que C_p admet un maximum (Fig.II.10). 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 :

$$\frac{dF_c}{da} = 0 \Leftrightarrow -3a^2 - 2a + 1 = 0 \quad (\text{II.9})$$

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

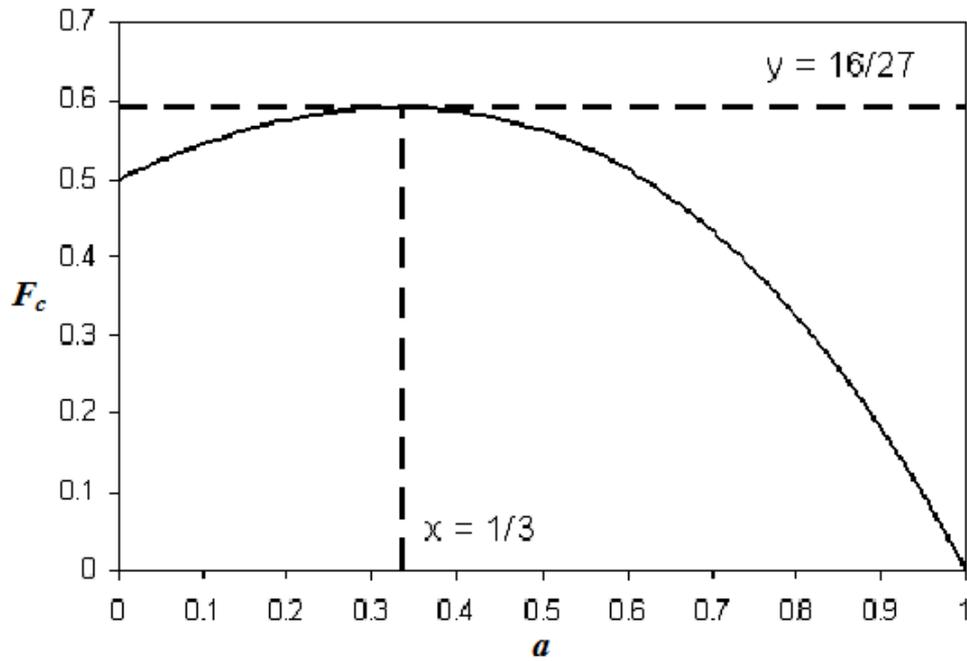


Figure II.10 : Évolution de F_c en fonction de a [39]

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 :

$$\lambda = \frac{\Omega_t r}{V_1} \quad (\text{II.10})$$

Où : Ω_t : est la vitesse de rotation avant la transmission.

La Figure (II.11) [40], montre les facteurs de capacité obtenus selon le type d'éolienne en fonction de la vitesse spécifique λ . Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur facteur de capacité atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre une et trois pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation.

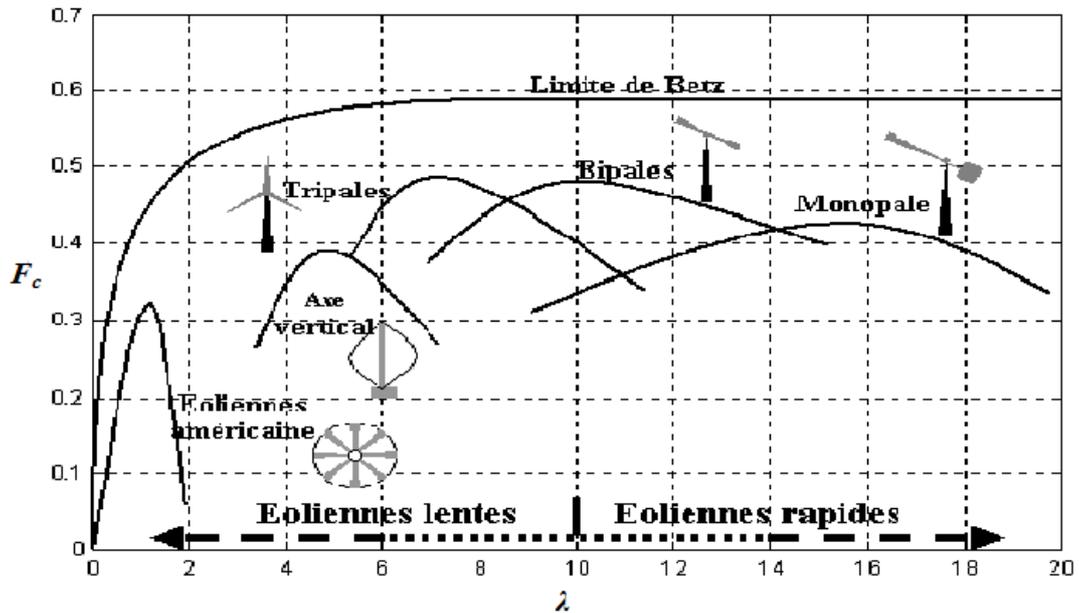


Figure II.11 : Facteur de capacité pour différents types d'éoliennes [40]

II.6.3 Caractérisation horizontale de la vitesse de vent

On a vu d'après l'équation (II.3) que la puissance disponible varie avec la vitesse cubique moyenne du vent. Cette dernière étant déterminée à partir d'un traitement statistique des données vent brutes et le calcul des fréquences à un seuil donné de vitesse [41].

II.6.3.1 Modèles d'ajustement

De part la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant :

- la distribution de Weibull ;
- la distribution hybride de Weibull ;
- la distribution de Rayleigh.

II.6.3.2 Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme [42]:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (\text{II.11})$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées. k et c sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que c détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse. La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes. La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II.12})$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II.13})$$

II.6.3.3 Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull, [43] est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \text{ pour } V > 0 \quad (\text{II.14})$$

$$f(V) = ff_0 \quad \text{pour } V = 0$$

Où : ff_0 : représente la fréquence des vents calmes.

II.6.3.4 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(V) = 2 \frac{V}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right) \quad (\text{II.15})$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

II.6.4 Extrapolation verticale des paramètres de vent

Généralement les vitesses sont mesurées auprès des stations de météorologie à une hauteur normalisée égale à 10 mètres du sol. Toutefois, le rotor des systèmes éoliens est généralement placé à une hauteur supérieure ou égale à 25 mètres du sol. Pour calculer le potentiel énergétique éolien moyen annuel, il faut extrapoler les vitesses moyennes à la hauteur du rotor. Cette extrapolation entraîne une variation du mode de distribution.

Pour l'extrapolation verticale des paramètres de la vitesse du vent, on distingue généralement deux cas :

- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à court terme, qui passe par l'extrapolation de la mesure de la vitesse du vent quasi instantanée, moyennée sur une minute ou une heure.
- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à long terme liée aux résultats de l'étude statistique en occurrence par l'extrapolation des paramètres de Weibull.

II.6.4.1 Extrapolation verticale de la vitesse du vent :

Les premiers travaux portant sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau z_1 à z_2 ont été effectués par Justus et Mikhaïel qui étudient la variation de la vitesse du vent ainsi que les paramètres de Weibull en 1976 [44,45]. Plusieurs auteurs ont proposé des formules empiriques permettant l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. La plus connue est la loi de la puissance modifiée de Mikhaïel [46], qui s'écrit :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad (\text{II.16})$$

Où :

$$n = \frac{1}{\ln \left(\frac{z_g}{z_0} \right)} - \left[\frac{0.0881}{\left[1 - 0.0881 \left(\frac{z_1}{10} \right) \right]} \right] \ln \left(\frac{V_1}{6} \right) \quad (\text{II.17})$$

z_g : étant la moyenne géométrique de la hauteur donnée par :

$$z_g = \sqrt{z_1 \cdot z_2} \quad (\text{II.18})$$

z_0 : rugosité du sol [m]

En 1985, Mikhaïel ajuste expérimentalement le modèle précédent et propose l'expression suivante, [47]:

$$n = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} + \frac{0,0881 - 0,0881 \ln V_1}{1 - 0,0881 \left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad (\text{II.19})$$

II.6.4.2 Extrapolation des paramètres de Weibull

a) Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïel

En 1976, Justus et Mikhaïel [45] ont proposé, pour une référence d'altitude initiale égale à 10m, les formules d'extrapolation suivantes :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1 - 0,0881 \left(\frac{z_1}{10}\right)}{1 - 0,0881 \left(\frac{z_2}{10}\right)} \right] \quad (\text{II.20})$$

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^m \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$m = \left[\frac{0,37 - 0,0881 \ln(c_1)}{1 - 0,0881 \left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \quad (\text{II.22})$$

b) Modèle modifié d'extrapolation de Justus

Repris par Poje [48], Justus a modifié en 1978, l'expression d'extrapolation des paramètres de Weibull en introduisant la rugosité du sol, tel que :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1}{1 - 0,0881 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)} \right] \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{m_1} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$m_1 = \frac{1}{\ln \left(\frac{z_g}{z_0} \right)} - 0,0881 \left(\frac{c_1}{6} \right) \quad (\text{II.25})$$

c) Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïel,

Pour une extrapolation à partir d'un niveau quelconque, Mikhaïel en 1985 [45], reprend les expressions d'extrapolation des paramètres proposés en 1976, en modifiant l'exposant tel que:

$$m = \frac{1}{\ln \left(\frac{z_g}{z_0} \right)} + \frac{0,0881(1 - \ln(c_1))}{1 - 0,0881 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)} \quad (\text{II.26})$$

d) Modèle d'extrapolation de Spéra et Richardson

Mikhaïel en 1985, [47] expose la formule de Spéra et Richardson qui introduit le paramètre de rugosité du sol z_0 , en proposant une extrapolation du paramètre de forme qui se présente sous la forme :

$$k_2 = k_1 \frac{1 - \alpha_0 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_r}\right)}{\ln V_h}}{1 - \alpha_0 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_r}\right)}{\ln V_h}} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$\alpha_0 = \left(\frac{z_0}{z_r}\right)^{0.2} \quad (\text{II.28})$$

z_r étant la hauteur de référence égale à 10 m et V_h la vitesse du vent homogène égal à V_1 .

Par ailleurs, l'exposant m_c de l'extrapolation du facteur d'échelle est donné par :

$$m_c = \alpha_0 \frac{1 - \frac{\ln C_1}{\ln V_h}}{1 - \frac{\alpha_0 \ln(z_1/z_r)}{\ln V_h}} \quad (\text{II.29})$$

CHAPITRE III
TECHNIQUE DE DESSALEMENT
PAR OSMOSE INVERSE

CHAPITRE III

TECHNIQUE DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE

III.1 Introduction

La filtration membranaire est de plus en plus utilisée comme procédé de séparation dans de nombreux domaines notamment dans le cycle de l'eau (potabilisation de l'eau, traitement des effluents, réutilisation de l'eau, adoucissement, dessalement,...). La filtration membranaire est basée sur l'application d'une différence de pression qui permet le transfert du solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés. Ces opérations, classées selon une taille des pores décroissantes, sont : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nano-filtration (NF) et l'OI. Le cas extrême est l'OI qui arrête tous les solutés contenus dans l'eau mais laisse passer le solvant. C'est un procédé mature technologiquement (une bonne part du développement technologique est déjà réalisé) mais encore en plein développement industriel.

III.2 Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes (Fig. II.1), l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer.

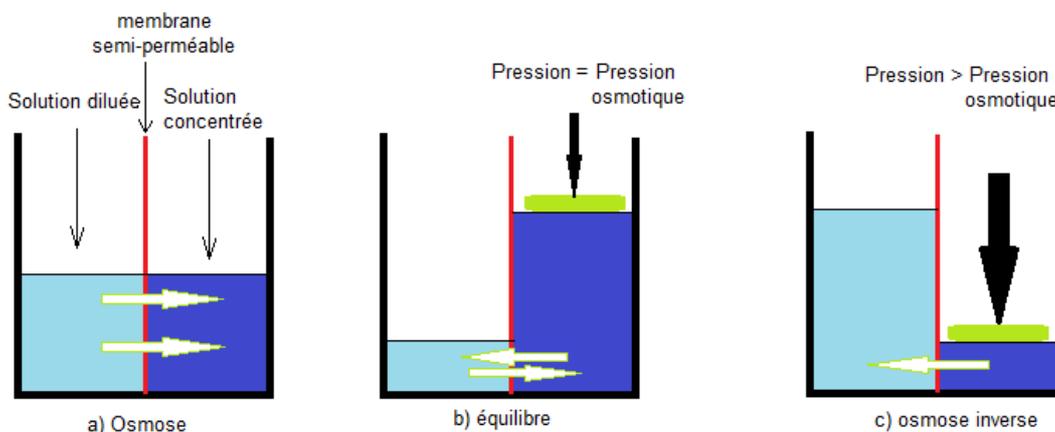


Figure III.1 : Principe de l'osmose inverse

Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau va s'annuler. En faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est nommée la pression osmotique. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'OI.

L'OI est un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression. L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane.

Une partie de la solution à traiter se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes (Fig. III.2):

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

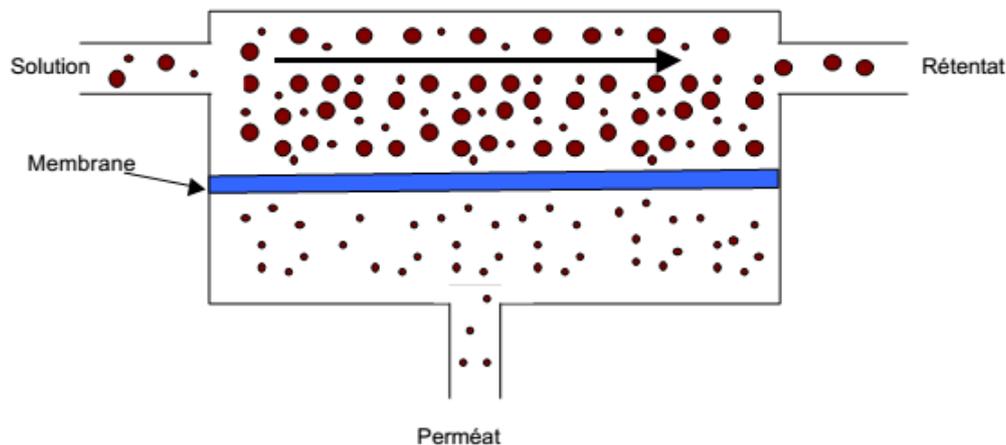


Figure III.2 : Écoulement à travers la membrane

III.3 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 (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 :

$$\pi V = nRT \quad (III.1)$$

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 :

$$\pi = iCRT \quad (\text{III.2})$$

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 [4].

$$\pi = 0,7C \quad (\text{III.3})$$

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.

III.4 Éléments d'un système d'osmose inverse

Les principaux constituants d'un système d'OI sont les suivants (Fig. III.3) :

- les membranes proprement dite
- les modules
- la pompe HP
- éventuellement un DRE
- un système de prétraitement
- un système de post-traitement.

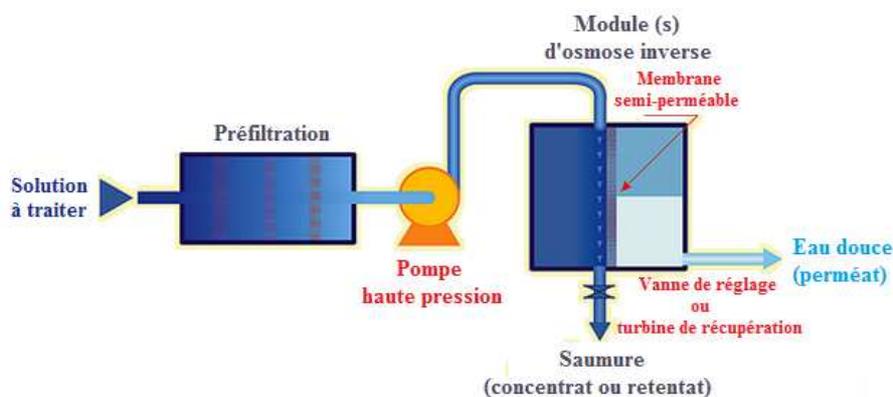


Figure III.3 : Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse

III.4.1 Les membranes

Une membrane peut être définie comme étant une couche mince de matière, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert [49]. Une membranes semi- sélectives est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en interdisant d'autres, ou plus généralement, en favorisant certains par rapport à d'autres (Fig. III.4) [52].

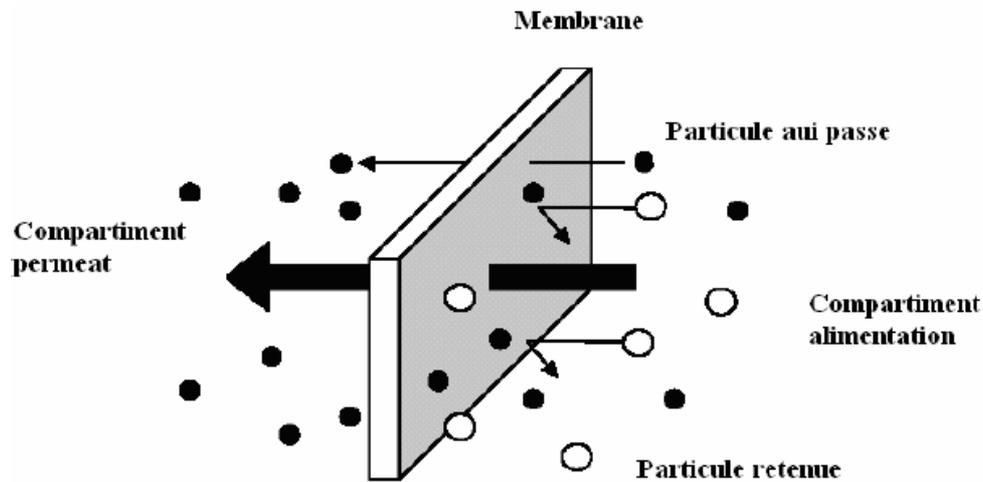


Figure III.4 : Membrane sélective [50]

Les membranes d'OI sont composées d'une couche mince (couche active : peau) de faible épaisseur comprise entre $0,1\mu\text{m}$ et $1,5\mu\text{m}$, composant des micropores. Cette couche active est supportée par une ou plusieurs couches, à la fois plus poreuses et mécaniquement plus résistantes [51].

III.4.2 Modules d'osmose inverse

III.4.2.1 Modules spirales

Les modules spirales (Fig. III.6) sont parmi les types de modules les plus utilisées dans le monde des membranes. À l'origine, ils ont été exclusivement conçus pour le dessalement, mais la conception compacte et le bas prix pousse beaucoup d'industrie à les utiliser, même en conception immergée (laiterie, jus, pulpe...).

III.4.2.2 Modules tubulaires

Ayant une conception simple, ils sont très utilisés dans les laboratoires pédagogiques, à cause de la facilité de calculer le nombre de Reynolds et d'établir l'état théorique des coefficients de transfert de masse (Fig. III.7).

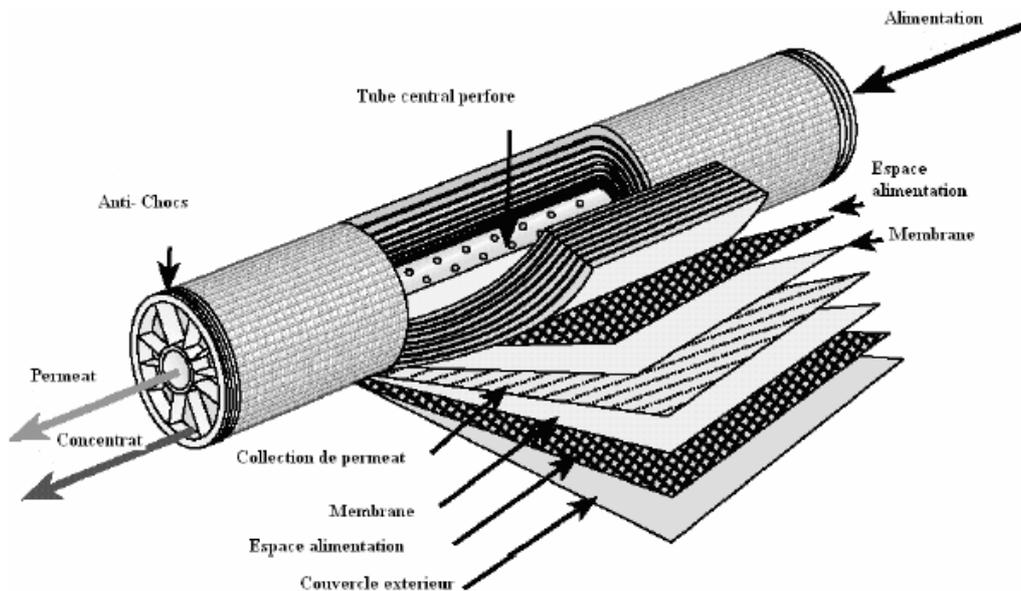


Figure III.6: Module spirale [52]

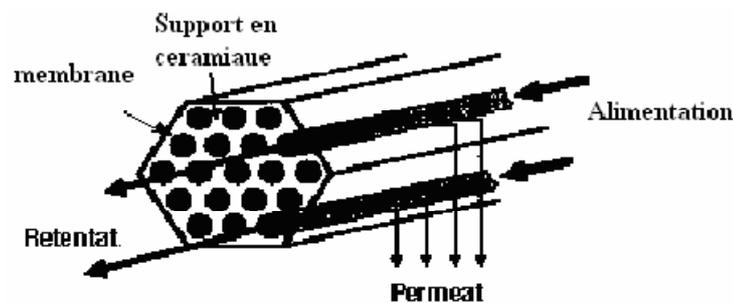


Figure III.7 : Module tubulaire [52]

Les modules tubulaires ont de grands avantages : ils tolèrent les solides en suspension, et les filtres jusqu'à un degré élevé. Leurs inconvénients sont :

- l'exigence de beaucoup d'espace.
- le changement de membrane à cause des difficultés et du temps.
- les modules à grand diamètre nécessitent beaucoup d'énergie.
- sont coûteux et moins souples.
- nécessitent de rinçage périodique (coûteux vis à vis des produits chimiques).

III.4.2.3 Modules plans et en plaques

Dominant le marché en Europe pendant une période, mais par suite du manque de développement et du prix élevé leur expansion s'est réduite.

Le système de feuilles plates (Fig. III.8) offre une conception très robuste mais coûteuse. Certains systèmes modernes tolèrent une très forte pression (jusqu'à 100 bars).

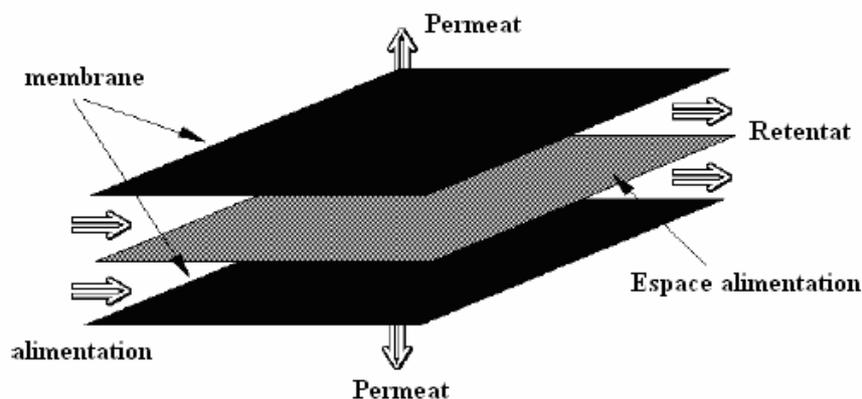


Figure III.8 : Module plan [52]

III.4.2.4 Modules en fibres

Ils sont similaires aux modules tubulaires mais leur diamètre intérieur est inférieur à 2 mm (d'où vient leur nom). La différence qui les sépare des modules à grands diamètres c'est qu'elles sont des membranes sans support (sont mécaniquement faible). Ils sont utilisés beaucoup plus pour l'UF.

III.4.2.5 Modules en céramiques

Ils sont très chers. Théoriquement, sont très efficaces pour la MF. En réalité, actuellement sont très peu commercialisés sur le marché.

III.4.2.6 Modules en fibres creuses

Les fibres en U sont mises en faisceau et assemblées de façon à réaliser l'étanchéité aux deux extrémités du module. Le liquide à traiter circule perpendiculairement à l'axe des fibres, tandis que le concentrat est recueilli dans une enceinte qui enveloppe le faisceau et permet son évacuation à l'une des extrémités du module. Le perméat s'écoule à l'intérieur de chacune des fibres puis dans un collecteur (Fig. III.9). Ce type de modules nécessite un prétraitement adéquat. Dans le domaine de dessalement, les modules spirales et en fibres creuses sont les plus utilisés, dont le tableau III.1 donne une comparaison entre les deux [53].

III.4.3 Pompes de mise en pression

Le débit, la perte de pression et la pression osmotique déterminent ensemble la pression de l'eau d'alimentation nécessaire. On utilise alors un système de pompage (une ou plusieurs pompes) qui permet un débit élevé que celui théoriquement nécessaire pour garder la pression d'alimentation continue.

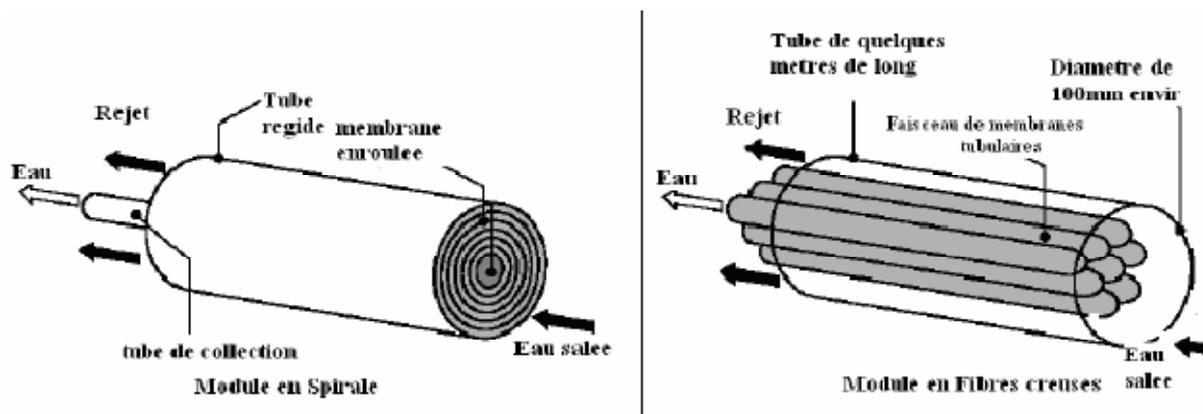


Figure III.9: Structures des modules en spirale et fibres creuses [53]

Tableau III.1: Comparaison entre modules spirale et en fibres creuses

Type	Modules en Fibres creuses	Modules Spirales
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - moins chères - conversion élevée - réparation facile - remplacement facile 	<ul style="list-style-type: none"> - résistance au colmatage - maintenance facile - variété de matériaux et fabricants
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - sensible au colmatage par matières colloïdes - nombre limité de matériaux et fabricants 	<ul style="list-style-type: none"> - conversion faible - surface modérée de la membrane
Fabricant	<ul style="list-style-type: none"> - Tory - Dow/Filmtec - Koch/fluidosystem - NittoDenko/Hydranautics - Viola 	<ul style="list-style-type: none"> - Toyobo - DuPont
Matériau	Polyamides aromatiques	Cellulose triacétates
Morphologie	Membranes asymétriques	Membranes composites

Il est recommandé, si convenable, d'utiliser de grandes pompes qui donnent un rendement élevé à prix réduit avec opération flexible, cela va réduire le nombre de pompes à utiliser. L'efficacité de grandes pompes est 5% plus que celle des petites pompes, avec un coût spécifique sensiblement inférieur [54]. Ce choix est justifié aussi par le fait de mettre une pompe de réserve pour le système mieux que de mettre plusieurs petites pompes.

Les pompes volumétriques à piston, ont un rendement supérieur à celui des pompes centrifuges, mais ne sont pas adaptées aux débits supérieurs à 100 m³/h [65].

Le tableau III.2 donne les avantages et inconvénients des différents types de pompes utilisés en OI [4].

Tableau III.2 : Avantages et inconvénients des pompes utilisées en osmose inverse [4]

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

III.4.4 Récupération de l'énergie du concentrât

Dès que l'OI a été appliquée au dessalement de quantités importantes d'eau de mer, on a tout naturellement pensé à récupérer l'énergie hydraulique du concentrât, qui est de l'ordre de 55% de celle nécessaire à la mise en pression des modules d'OI [56]. La décision d'adopter un DRE doit être prise en comparant le coût des annuités financières dues à cet investissement supplémentaire et le coût de l'énergie récupérée. Elle dépend de [4] :

- de la taille de l'unité.
- du coût de l'énergie.
- de la pression de fonctionnement.
- du taux de conversion.

Du point de vue technologique deux solutions sont actuellement disponibles : les turbines Pelton et les systèmes dits échangeurs de pression. Les premiers systèmes de récupération ont utilisé des pompes centrifuges multi-étagées fonctionnant en turbine. Puis il a été fait appel à des turbines hydrauliques spécifiques, dont la technologie est issue des turbines utilisées pour l'entraînement des alternateurs des usines hydro-électriques.

Étant donné la pression d'alimentation élevée, le type de turbine le plus adapté est celui utilisant le principe de la roue Pelton. La puissance nécessaire aux pompes HP peut être fournie par le moteur électrique et la turbine de récupération, ou bien on utilise une pompe centrifuge alimentée par la turbine et reliée en série avec celle de HP.

Dans la turbine Pelton toute l'énergie potentielle est transférée en énergie cinétique, la vitesse de l'eau à la sortie de la buse ne dépend donc que de la pression. Actuellement, plusieurs industriels proposent des turbines Pelton pour des débits de 10 à 1200 m³/h [4]. Bien qu'ayant un bon rendement compris entre 80 et 90%, ces machines présentent quelques inconvénients :

- corrosion des augets due à la vitesse élevée du jet (environ 100 m/s).
- centrage du jet difficile à maintenir.

Un nouveau système développé récemment peut donner un rendement de 95% [57], consiste à transférer l'énergie hydraulique directement dans le circuit d'alimentation HP à l'aide d'un échangeur de pression à piston, fonctionnant alternativement: alimentation des modules-évacuation du rejet (Fig. III.10). Le système comprenant une pompe HP, un ensemble d'échangeurs de pression associés à des distributeurs d'eau salée et de rejet, une pompe de surpression qui compense les pertes de charge dans le circuit de rejet et dans les échangeurs afin d'amener l'eau à la même pression que celle refoulée par la pompe HP. Ce système permet de réduire la taille de la pompe HP, son débit étant égal à celui de la production, tandis que le débit de la pompe de surpression est égal à celui du rejet.

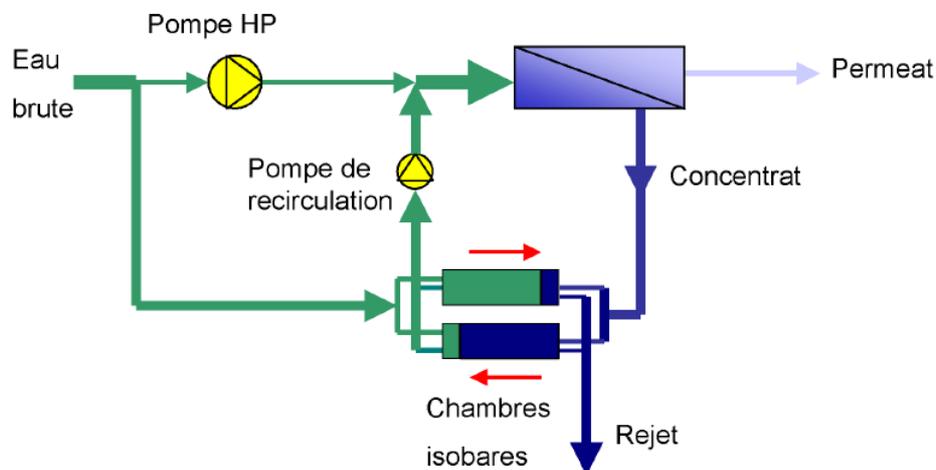


Figure III.10 : Récupération d'énergie par système à piston (échangeurs de pression)

III.4.5 Système de prétraitement

Le rôle principal du prétraitement de l'eau dessalée est de limiter l'encrassement et l'entartrage, afin de maximiser la durée de fonctionnement des membranes, ça concerne principalement la teneur en chlore, le pouvoir encrassant (colmatage) et les précipitations de sels en sursaturation [58,59].

III.4.5.1 Chloration

L'injection de Chlore ou de son équivalent de Javel, sera faite dès la prise d'eau pour éviter tout développement biologique dans l'eau d'alimentation. Cependant les membranes ne supportent pas la mise en contact avec le Chlore. On recommande l'injection d'un réducteur de Chlore tel que le Bisulfite de Sodium ou un produit équivalent pour que l'eau arrive sur les membranes contenant moins de 0,1 ppm de Chlore libre.

III.4.5.2 Pouvoir encrassant (colmatage)

On peut considérer l'OI comme procédé de filtration à l'échelle moléculaire, toute particule de dimension supérieure à une molécule, sera retenue à fortiori. C'est évidemment le cas des matières en suspension et colloïdales. Leur accumulation à la surface de membrane provoque une baisse continue des performances (débit, salinité).

Les différents types de colmatage sont :

- entartrage (Scaling) (CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , CaF_2).
- colmatage organique.
- Bio-encrassement (Biofouling).
- colmatage colloïdal (SiO_2 , S) et hydroxydes métalliques $\text{Fe}(\text{OH})_3$...

Les indicateurs de colmatage sont : la baisse de la perméabilité, l'augmentation de la perte de charge longitudinale et l'accroissement du passage de sels. Si ce phénomène est mal estimé, il aboutit rapidement dans le pire des cas à un colmatage irréversible.

Le second rôle du prétraitement est de réduire le pouvoir encrassant de l'eau. Comme la mesure des matières en suspension n'est pas suffisante, une méthode empirique a été mise au point consistant à mesurer le temps de passage d'un volume d'eau connu à travers une membrane de porosité calibré à 0,45 μm . Plus le temps de passage est court, plus le pouvoir encrassant de l'eau est faible. Une formule converti ce temps en indice appelé indice de colmatage ou SDI (Silt Density Index) qui soit inférieur à 5 pour l'OI. Pour des eaux chaudes et chargées en algues, une prise sur puits côtier peut assurer cette condition.

III.4.5.2 Contrôle d'entartrage (seuil de solubilité des sels dans le rejet)

Une autre cause de colmatage est la précipitation de sels au niveau du rejet. Les sels de calcium peu solubles, sont les premières causes d'entartrage. Connaissant leur concentration dans l'eau de mer, il est indispensable de calculer leur concentration dans le rejet en fonction de la conversion souhaitée et d'évaluer le risque de précipitation.

La méthode consiste à :

- fixer une conversion y , et par la suite un facteur de conversion FC .
- supposer que la température n'évolue pas entre l'entrée et la sortie du module, et que la concentration du sel étudié augmente du facteur FC dans le rejet :

$$FC = \frac{1}{1-y} \quad (\text{III.4})$$

Si on considère le sel très ré pondu : le sulfate de calcium CaSO_4 , la concentration des sulfates dans le rejet est :

$$[SO_4^{--}]_R = FC[SO_4^{--}]_A \quad (\text{III.5})$$

Avec : R : rejet et A : alimentation.

De même :

$$[Ca_4^{--}]_R = FC[Ca_4^{--}]_A \quad (\text{III.6})$$

Le produit de solubilité du sulfate de calcium dans le rejet est :

$$PS_R = [Ca_4^{--}]_R \cdot [SO_4^{--}]_R = [Ca_4^{--}]_A \cdot [SO_4^{--}]_A \cdot FC^2 \quad (\text{III.7})$$

- Si $PS_R < K_S$ (valeur limite : produit de solubilité limite) : pas de sursaturation, la conversion choisie peut être retenue.
- Si $PS_R > K_S$: il y a une saturation : la solution est ; soit prendre une conversion plus basse, soit prévoir (injection d'un inhibiteur d'entartrage et reprendre le calcul en introduisant le nouveau produit de solubilité admissible. La valeur de ce dernier est définie par le fabricant de l'inhibiteur.

Le plus ancien des inhibiteurs est l'hexametaphosphate de sodium. On doit vérifier auprès du fournisseur de la membrane, la compatibilité chimique entre l'inhibiteur et la membrane. En pratique, il existe plusieurs procédés dont le tableau III.3 les résume.

Tableau III.3 : Procédés de prétraitement [59]

Procédé	Fonction
Filtre à sable	Enlever les particules de taille importante
Charbon actif	Élimination du chlore (Cl ₂) et des composés organiques
Adoucisseur	Enlever les ions divalents, prévenir le tartre
Injection d'acide (de base)	Réglage du pH
Injection de métabisulfite de sodium	Élimination du chlore (Cl ₂)

III.4.6 Système de post-traitement (adoucissement)

Le système de post-traitement concerne la phase d'adaptation de l'eau dessalée à la consommation. Il est nécessaire de dégazer pour éliminer l'acide carbonique (causé par l'acidification en prétraitement) et l'hydrogène (H₂S souvent présent dans les eaux souterraines) qui passe à travers les membranes. Le post-traitement de l'eau dessalée par OI est habituellement nécessaire, il ne dépend pas du dispositif de dessalement, de l'arrangement ou de la nature chimique des membranes. Le degré et le type de post-traitement souhaité dépendent essentiellement de l'utilisation de cette eau dessalée. Par exemple, l'eau potable destinée à la consommation humaine nécessite une désinfection et un traitement de prévention contre la corrosion des tuyauteries et des différents équipements. Si l'hydrogène sulfurée H₂S est présent : le dégazage est à envisager.

Si l'eau dessalée est à utiliser dans les chaudières à HP : on envisage de compléter la déminéralisation pour éviter l'entartrage, et de deoxygéner pour minimiser la corrosion. Si on prévoit de produire de l'eau pure (pour l'industrie haute technologie): le post-traitement doit comprendre une complète déminéralisation, une stérilisation et une élimination des solides en suspension. Le plus souvent, le post-traitement consiste à : compléter la déminéralisation, l'ajustement du pH, traitement de réduction de la corrosivité, la désinfection et le dégazage.

III.5 Salinités des eaux

III.5.1 Les eaux salines

En fonction de la concentration en sels et de leur origine on distingue généralement :

- les eaux de mer proprement dites.
- les eaux saumâtres qui présentent une concentration moins importante en sels dissous que les précédentes. Ce sont des eaux continentales, souterraines ou superficielles.

III.5.1.1 Les eaux de mer

La composition chimique d'une eau de mer varie peu sauf dans les mers fermées. Dans le tableau III.4 sont rassemblées les caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau standard [60]. On peut constater que 85% environ poids total des sels est du chlorure de sodium. Dans le tableau III.5 est rapportée la salinité de différentes mers fermées. Celle-ci est liée à la situation hydrique et géographique de la mer.

Tableau III.4 : Composition de l'eau de mer standard [60]

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	Hydrogénocarbonate	152	0,0025	61
Strontium	13	0,000149	87	Nitrate	< 0,7	0,000013	62
Baryum	0.05	$3,65 \times 10^{-7}$	137	Fluorure	1.4	0,0000737	19
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		$1,43 \times 10^{-6}$	44
Caractéristiques							
pH	8,1			TDS (mg/L)	35000		

Tableau III.5 : Salinité de différentes mers [60]

Nom	Salinité (g/L)
Mer Standard	35
Mer Morte	270
Golfe Arabo-persique	40 à 70
Mer Rouge	40
Mer Méditerranée	36 à 39
Mer Caspienne	13
Mer Baltique	7

III.5.1.2 Les eaux saumâtres

Les eaux saumâtres se distinguent des eaux de mer par une concentration plus faible en sels, comprises entre 1 et 10 g/L et par une composition variée contrairement à celles de l'eau de mer qui est globalement constante.

Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme d'eaux souterraines. Leur composition chimique varie énormément d'une région à l'autre et pour une même région d'une saison à l'autre. Ces variations de composition chimique dépendent de plusieurs paramètres : des apports d'eau (pluie, superficielle, souterraine,...), de la vitesse de circulation de l'eau et par conséquent le temps de contact, du taux d'évaporation, des matières déjà dissoute (la solubilité variant avec la force ionique), de la nature des terrains traversés mais aussi des entrées d'eau de mer qui peuvent varier selon la distance à la mer.

III.5.2 Les eaux potables

Pour l'OMS une eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 100 et 1000 mg/L. Ce paramètre global n'est pas la seule caractéristique à laquelle doit satisfaire une eau destinée à la consommation humaine.

L'OMS classe les critères de potabilité d'une eau en cinq groupes. Ceux qui intéressent le producteur d'eau dessalée concernent l'aspect physique (température, limpidité, odeur, teneur en matières en suspension) et les caractéristiques chimiques (salinité, chlorures, pH, ...). Pour chaque critère, l'OMS précise une valeur guide, par exemple :

- salinité inférieure ou égale à 1000 mg/L ;
- chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/L.

À titre d'exemple, dans le tableau III.6 [60] sont reportées quelques valeurs guides concernant les caractéristiques physico-chimiques en sachant que d'autres critères aussi bien organoleptiques, physico-chimiques que microbiologiques sont également imposées ou recommandés.

Tableau III.6 : Caractéristiques physico-chimiques normalisées pour les eaux potables [60]

Espèce	(mg/L)
Sodium	200
Chlorures	200
Sulfates	250
Nitrates	50
pH	6,9–9

III.7 Développement industriel de l'osmose inverse

Parmi les différents procédés disponibles, l'OI s'est généralisée pour le dessalement des eaux saumâtres. Dans le cas des eaux de mer, l'OI, qui, vers les années 1980, était surtout utilisé pour les unités de faibles capacités, quelques centaines de m³/jour, concurrence actuellement la distillation pour les capacités importantes.

Il faut reconnaître que par rapport à la distillation, la technique d'OI présente les avantages suivants [4] :

- faible consommation d'énergie grâce en particulier à la mise en place des systèmes de récupération d'énergie et à l'augmentation des taux de conversion.
- investissements de base plus faibles dus en particulier à l'augmentation des performances des membranes et à la diminution importante de leurs coûts.
- gamme de capacité très vaste allant de quelques litres/jour pour des appareils allant à 320000 m³/jour pour l'installation d'Ashkelon par exemple.

Une solution récente consiste à adjoindre une unité d'OI au couple centrale thermique + distillation. L'OI consomme l'énergie électrique lorsque la demande est faible, la distillation peut fonctionner à tout moment de la journée avec de la vapeur basse pression. On dispose ainsi d'un ensemble hybride assez souple pour s'adapter aux variations de la demande d'eau et d'électricité tout en minimisant la consommation d'énergie. OI et distillation peuvent aussi s'avérer deux procédés complémentaires.

Récemment, deux alternatives prometteuses ont fait leur apparition. La première est une innovation technique qui permettrait d'obtenir une eau de très bonne qualité à des coûts très inférieurs aux techniques classiques : c'est la distillation membranaire. La seconde est une substitution des centrales thermiques classiques par des centrales nucléaires pour fournir la chaleur aux usines de dessalement. On gagne alors sur deux plans : pas de rejet de gaz à effet de serre et diminution du prix global de production de l'eau. Cette solution permettrait d'envisager le dessalement pour l'irrigation et non plus seulement pour la consommation domestique. Cependant, le problème des déchets nucléaires et le problème de sécurité pouvant limiter cette alternative.

Par ailleurs, de nouvelles technologies de dessalement, faisant également appel à des membranes semi-perméables, voient le jour, à savoir l'osmose directe (Forward Osmosis) et la thermo osmose (Memstill). Ces deux procédés font appel, en plus de l'énergie électrique, à des énergies thermiques économiques (vapeur perdue, énergie solaire).

Il est aussi signalé le procédé Demwax [61], en cours de développement avancé, qui consiste à immerger des modules d'OI directement dans la mer, alimentés par la seule pression hydrostatique. Le facteur de conversion adopté est faible afin de limiter la pression osmotique, et donc la profondeur d'immersion. Les développements en cours concernent également l'amélioration des rendements des différents composants électromécaniques et, notamment au niveau des systèmes de récupération de l'énergie des concentrats.

Quant aux énergies renouvelables couplées aux installations de dessalement, leur investissement élevé et leur faible compétitivité ne permettent pas de les utiliser à l'échelle industrielle. Cependant, dans certains cas, le dessalement solaire ou éolien de petite capacité, pour des lieux isolés peut se révéler meilleur marché que les techniques conventionnelles.

III.8 Mécanismes de transfert

Plusieurs théories ont été avancées pour décrire les transferts de masse à travers les membranes semi-perméables et expliquer le mécanisme de sélectivité de ces membranes.

III.8.1 Modèle diffusionnel

Dans ce modèle, les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation-diffusion, c'est-à-dire toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme un solide ou un liquide sous l'action d'un gradient de concentration de pression. C'est notamment le cas de l'OI.

Les flux de solvant et de soluté à travers la membrane sont donnés respectivement par [72]:

$$J_i = -\frac{\bar{D}_i \cdot \bar{C}_i}{RT} \text{grad} \mu_i = -\frac{\bar{D}_i \cdot \bar{C}_i}{RT} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial C_i} \text{grad} C_i + V_i \cdot \text{grad} P \right) \quad (\text{III.8})$$

Si on donne l'indice e au solvant et l'indice s au soluté, l'équation (III.8) peut être intégrée en supposant que la différence de concentration en eau à travers la membrane est faible. On obtient :

$$J_e = -\frac{\bar{D}_e \cdot \bar{C}_e \cdot V_e}{RT \Delta x} (\Delta P - \Delta \pi) \quad (\text{III.9})$$

Dans le cas de membranes très sélectives, le terme $V_i \cdot gradP$ de l'équation (III.8) est négligeable devant le terme $(\partial\mu_i/\partial C_i)gradC_i$ et l'on obtient pour le flux de soluté :

$$J_s = -\bar{D}_s \frac{\Delta \bar{C}_{sm}}{\Delta x} = -\bar{D}_s \cdot K_s \frac{\Delta C_{ss}}{\Delta x} \quad (\text{III.10})$$

Si aucune des propriétés de la membrane ne dépend que de la pression ou de la concentration des solutions, le terme $A = -\bar{D}_e \cdot \bar{C}_e \cdot V_e / RT \Delta x$ peut être considéré comme une constante de la membrane. De même, le terme $B = -\bar{D}_s \cdot K / \Delta x$ peut être considéré comme une constante relative au transfert de soluté.

Ces constantes représentent des flux unitaires de solvant ou de soluté pour une membrane donnée et on les appelle respectivement : perméabilité de la membrane au solvant et perméabilité de la membrane au soluté. Les relations précédentes peuvent alors s'écrire :

$$J_e = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (\text{III.11})$$

$$J_s = B \Delta C_{ss} \quad (\text{III.12})$$

Comme le montre les équations (III.11) et (III.12), le flux de solvant est directement proportionnel à la pression efficace $(\Delta P - \Delta \pi)$ tandis que le flux de soluté en est indépendant.

III.8.2 Modèle capillaire

Ce modèle considère que la membrane est un milieu poreux constitué d'une multitude de capillaires. Dans ce cas, la sélectivité et la perméabilité peuvent être déterminées à partir du diamètre de pore, du nombre de pores et de leur courbe de distribution. C'est le cas des membranes d'ultrafiltration et de la microfiltration. Le flux de solvant à travers une telle membrane peut être déterminé par la loi de Poiseuille [62] :

$$J_e = \frac{\pi r^4}{8\mu} N \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (\text{III.13})$$

Le nombre de pores par unité de surface peut être relié à la porosité par la relation :

$$N = \varepsilon / \pi r^2 \tau \quad (\text{III.14})$$

Le flux de soluté peut être exprimé par la relation :

$$J_s = \sigma_s J_e C_0 = \sigma_s C_0 \frac{K_s \mu}{\Delta x} \Delta P \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$K_s = \varepsilon r^2 / 8\tau \quad (\text{III.16})$$

σ_s : est une constante sans dimension comprise entre 0 et 1.

Physiquement, la constante σ_s représente la fraction de liquide qui passe à travers les pores de dimension suffisante pour ne pas tenir les moles de soluté.

III.9 Paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse

Quand un système d'OI est utilisé à une échelle commerciale, il est important de vérifier sa performance périodiquement. Avec le temps, la performance des membranes se détériore continuellement sous la contrainte de la pression et du colmatage ce qui fait changer ses paramètres de transport et diminuer la performance des modules. Par conséquent, le contrôle des données est une étape importante dans l'optimisation de la performance d'une unité d'OI [63]. Les variables principales de conception des systèmes d'OI sont :

- le flux de perméation ;
- le taux de conversion ;
- le taux de rejet ;
- la conductivité du perméat ;
- la pression de fonctionnement ;
- la température ;
- le pH....

L'optimisation de la conception des systèmes d'OI exige une analyse préliminaire des corrélations complexes entre ces paramètres.

III.9.1 Flux de perméation

Le flux de perméation ou la densité de flux volumique est le rapport du débit de perméat par la surface membranaire :

$$J_e = \frac{Q_p}{S} \quad (\text{III.12})$$

Pour une sélectivité donnée le flux de perméation doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de filtration à mettre en œuvre et, par là même, l'investissement. La densité de flux en cours d'opération est la plupart du temps bien inférieure à celle que l'on peut mesurer avec du solvant pur, ou calculer par le biais de la perméabilité. Cette densité de flux dépend de la perméabilité de la membrane, de la différence de pression appliquée, de la quantité et du type d'espèces retenues par la membrane.

III.9.2 Taux de conversion

Le taux de conversion d'un système d'OI est le rapport entre le débit produit et le débit d'alimentation :

$$y = \frac{Q_p}{Q_A} \quad (\text{III.13})$$

La conversion est définie par la salinité d'eau d'alimentation. Par exemple, la conversion d'une unité d'eau de mer varie entre 20–35%. L'augmentation de la conversion soulève la concentration en saumure et la pression osmotique, par conséquent le flux perméation diminue et le TDS augmente dans le produit. On peut augmenter la conversion en augmentant le nombre de bancs dans le système. Le choix de la valeur de ce paramètre résulte d'un compromis entre des considérations économiques et des considérations techniques :

- Du point de vue économique, on a en effet intérêt à adopter un taux de conversion le plus élevé possible, de manière à diminuer la quantité d'eau brute entrant dans le système, d'où des investissements plus faibles (groupes électropompes, filtres,...) et une consommation d'énergie réduite.
- Du point de vue technique, un taux de conversion élevé va se traduire par une augmentation de la salinité de la saumure et par la même de sa pression osmotique. Cela va entraîner une diminution de la pression efficace ($\Delta P - \Delta \pi$) et donc du débit de

perméat ainsi qu'une augmentation de la salinité de l'eau produite d'où des risques de précipitation de sels peu solubles.

Dans le cas de l'eau de mer, on opte généralement pour des taux de conversion compris entre 10 et 60%.

Dans le cas des eaux saumâtres, où l'on cherche en général à récupérer le maximum d'eau, le taux de conversion est limité uniquement par la solubilité des sels. L'utilisation des produits antitartre ou l'élimination préalable des ses susceptibles de précipiter permet d'augmenter le taux de conversion jusqu'à des valeurs qui peuvent atteindre 90%.

III.9.3 Taux de rejet

Le taux de rejet d'une membrane est défini par la fraction de soluté présent dans la solution, qui est retenue par la membrane :

$$R = \frac{C_0 - C_p}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0} \quad (\text{III.14})$$

Le principe de conservation de masse permet d'écrire [62] :

$$J_s = J_e \cdot C_e \quad (\text{III.15})$$

D'où :

$$R = \frac{A(\Delta P - \Delta \pi)}{A(\Delta P - \Delta \pi) + B} \quad (\text{III.16})$$

L'équation (III.16) montre que le taux de rejet d'une membrane augmente lorsque la pression efficace augmente et tend vers 1 lorsque la pression efficace tend vers l'infini. En fait l'expérience montre que cela n'est pas tout à fait exact.

En effet, il ya en général couplage des flux de solvant et de soluté, ce qui veut dire que, lorsque la pression efficace augmente, le débit de soluté augmente aussi. Il résulte de cela que le taux de rejet ne tendra pas vers 1 pour les hautes pressions mais plutôt vers une valeur asymptotique inférieure à l'unité.

III.9.4 Conductivité du perméat

L'objectif principal d'un procédé d'OI est de produire une eau douce d'un faible TDS. Cependant, puisque le TDS n'est pas facilement mesuré sauf dans des conditions contrôlées dans les laboratoires, les exploitants de l'installation utilisent la conductivité pour estimer la qualité de l'eau produite. Le contrôle de la conductivité du perméat est nécessaire pour produire une eau de bonne qualité. Une augmentation progressive ou rapide de la conductivité du perméat est une indication de l'encrassement de membrane ou des dommages mécaniques dans le module de la membrane, respectivement.

III.9.5 Pression de fonctionnement (pression motrice)

La pression motrice ΔP est égale à la pression de refoulement de la pompe diminuée de la pression statique à la sortie du module d'osmose (côté production) et de la perte de charge due à l'écoulement de l'eau. L'équation (III.11) montre que le flux de solvant est directement proportionnel à la chute de pression à travers la membrane.

Puisque la pression côté production est constante, il s'en suit que le flux de solvant est directement lié à la pression d'alimentation. En plus, le flux de soluté est une fonction de la température du système et de la composition chimique de la solution saline et est indirectement lié à la pression d'alimentation. À une basse pression de fonctionnement, l'eau pénètre moins à travers la membrane tandis que le flux de soluté reste le même. À des pressions de fonctionnement plus élevées l'eau pénètre plus à travers la membrane au même flux de soluté. Une pression d'alimentation élevée peut causer un colmatage de la membrane, ce qui réduit l'écoulement de l'eau après un certain temps fonctionnement comme le montre l'équation (III.11). Le choix de la pression de fonctionnement est lié à des considérations d'abord techniques ensuite économiques :

III.9.5.1 Considérations techniques

La pression de fonctionnement doit être supérieure à la pression osmotique en tenant compte du taux de conversion. Ainsi, dans le cas d'une eau de mer à 45 g/L et un taux de conversion de 40%, la concentration de la saumure sera de l'ordre de 75 g/L et la pression osmotique aura pour valeur 52,5 bars [4]. La sélectivité d'une membrane d'OI augmentant avec la pression pourra dans certains cas être amenée à choisir la pression en fonction de sélectivité souhaitée pour la membrane. Pour une vitesse de circulation donnée, il existe une pression limite au-delà de laquelle le flux de perméat n'augmente plus par suite du phénomène de polarisation de concentration.

Il est donc impératif de connaître cette valeur limite, de manière à situer nettement au-dessous. Lorsque la pression est trop élevée se posent des problèmes de tenue mécanique des membranes (compactage), ainsi que des modules. Actuellement la pression maximale se situe aux environs de 70–80 bars.

III.9.5.2 Considérations économiques

Comme pour tout procédé de séparation, le choix de la pression de fonctionnement doit faire l'objet d'une optimisation entre le coût de la consommation énergétique et le coût lié à la surface de membranes.

En effet, lorsque la pression augmente, la consommation d'énergie nécessaire devient plus faible (Fig. III.17). Les pressions de fonctionnement utilisées sont les suivantes [64] :

- eau de mer (30–50 g/L) : 50–75 bars
- eau saumâtre (1–10 g/L) : 10–40 bars

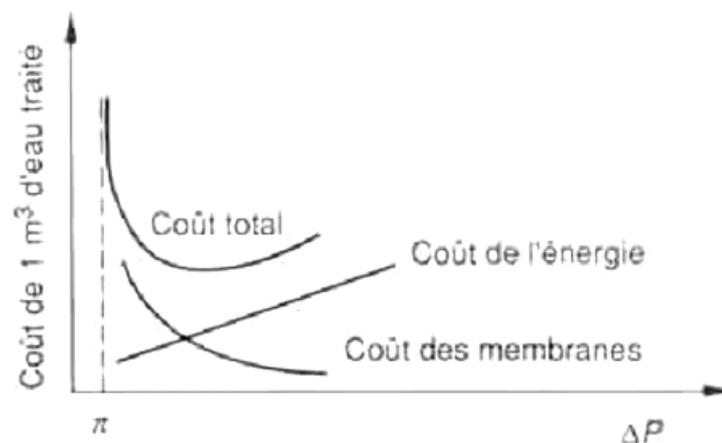


Figure III.17 : Choix de la pression de fonctionnement [64]

III.9.6 La température

La température d'alimentation a un effet significatif sur le comportement des membranes pour les raisons suivantes :

III.9.6.1 Augmentation de la perméabilité

La valeur de la perméabilité (A) dans l'équation (II.8) dépend de la température du système : une augmentation de la température de l'eau d'alimentation causera une augmentation de débit d'eau. Le débit de perméat à travers une membrane d'OI augmente avec la température d'environ 3% par degrés Celsius ce qui correspond approximativement à une augmentation proportionnelle à l'inverse de la viscosité de l'eau [4].

En effet, la viscosité d'un liquide en fonction de la température est donnée par la relation :

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E_0}{RT}\right) \quad (\text{III.17})$$

E_0 : est énergie d'activation du liquide à la température de référence (25°C), égale pour l'eau à 15675 J/mol [65].

La variation de la viscosité de l'eau en fonction de la température peut donc être calculée par la relation :

$$\frac{d\mu}{dT} = -\mu \cdot \frac{E_0}{RT^2} \quad (\text{III.18})$$

En général, les perméabilités des membranes sont données à 20°C. Si l'on veut connaître la perméabilité à une température donnée, l'équation précédente permet d'écrire dans le cas de l'eau [4] :

$$A(T) = A_0 \exp\left(6,433 - \frac{1885}{T}\right) \quad (\text{III.19})$$

Le tableau III.7 [4] montre que cette relation suit les valeurs expérimentales de la viscosité située à 3% près.

III.9.6.2 Colmatage des membranes

La température de l'eau d'alimentation affecte le débit d'eau d'une autre manière. Si l'unité d'OI fonctionne dans une condition idéale sans entartrage, le débit d'eau diminuera avec le temps, en raison des phénomènes de colmatage. Le facteur de correction de colmatage est obtenu par la relation suivante [63] :

$$FCC = t^m \quad (\text{III.21})$$

où : t : est le temps de fonctionnement de la membrane.

Tableau III.7 : Influence de la température sur la perméabilité d'une membrane [4]

Température (°C)	Viscosité de l'eau (m.Pa/s)	$A(T)/A_0$		Écart (%)
		À partir des viscosités	Calculée par la relation (III.19)	
17	1,083	0,923	0,935	+ 1,3
20	1,000	1,000	1,000	0
27	0,854	1,171	1,161	- 0,8
28,2	0,836	1,196	1,191	- 0,4
30,2	0,801	1,248	1,241	- 0,6
32	0,768	1,302	1,287	- 1,15
34	0,737	1,357	1,340	- 1,2
35,5	0,715	1,398	1,381	- 1,2
37,5	0,686	1,458	1,436	- 1,5
40	0,656	1,524	1,507	- 1,1

m : est un exposant négatif dont la valeur dépend de la membrane, de la pression de fonctionnement, et de la température. Pour une membrane sous une certaine pression de fonctionnement, la valeur de m est plus grande à une température plus élevée, qui signifie plus de perte par colmatage, et un débit d'eau plus moins.

Le choix d'une température de fonctionnement d'une unité d'OI est déterminé donc en fonction des considérations suivantes :

- pour une pression donnée, le compactage d'une membrane est d'autant plus important que la température est élevée.
- le débit d'eau à travers la membrane augmente avec la température par suite de la diminution de la viscosité.

III.9.7 Le pH

L'ajustement de pH est une étape importante dans les procédés de prétraitement. Le pH de l'eau d'alimentation doit être contrôlé et régulé pour les raisons suivantes :

- Empêcher la précipitation de l'oxyde d'alcalin (carbonate de calcium).
- Augmenter la durée de vie des membranes en acétate de cellulose en les protégeant contre la dégradation qui résulte de l'hydrolyse. L'hydrolyse est la réaction de l'acétate de cellulose avec de l'eau pour produire un alcool et un acide. L'hydrolyse dépend du pH et de la température. Le taux minimum d'hydrolyse se produit à un pH de 4,5 à 5.
- Optimiser le rejet de saumure de la membrane.

III.10 Polarisation de la concentration

III.10.1 Phénomène de polarisation

Les membranes utilisées en OI ayant la propriété d'effectuer des séparations à l'échelle moléculaire, il va y avoir accumulation progressive des espèces arrêtées à la surface de la membrane. C'est le phénomène de polarisation de concentration (Fig. III.18).

Le facteur de polarisation est défini par :

$$\gamma = \frac{C_m}{C_0} \quad (\text{III.22})$$

La polarisation est un phénomène réversible qui disparaît si le vecteur de transfert est annulé. Les conséquences de ce phénomène sont les suivantes [62]:

III.10.1.1 Diminution du flux de perméat

Une augmentation de la concentration près de la membrane va se traduire par une augmentation de pression osmotique (π) de la solution et une diminution de pression efficace ($\Delta P - \Delta\pi$). Le flux de perméat étant directement proportionnel à la pression efficace, va donc diminuer. On peut avoir aussi une diminution du flux à cause de la résistance supplémentaire à la filtration provenant des dépôts résultants d'une augmentation de la concentration.

III.10.1.2 Diminution de la sélectivité

Une augmentation de la concentration près de la membrane se traduit par une augmentation de la concentration dans le perméat, le flux étant proportionnel à la différence de concentration de part et d'autre part de la membrane soit ($C_m - C_p$) et non ($C_0 - C_p$).

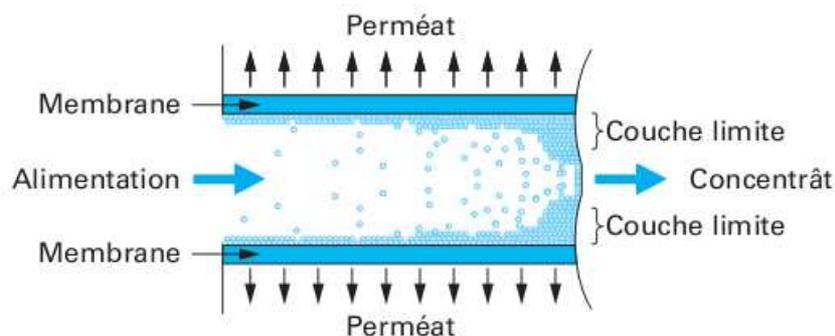


Figure III.18 : Mécanisme de formation de la couche de polarisation [66]

III.10.1.3 Colmatage dû à des précipitations

Deux phénomènes secondaires peuvent se produire lorsque la concentration C_m atteint la limite de solubilité des sels. On peut alors avoir formation de tartre (CaSO_4 , CaCO_3 par exemple).

III.10.2 Modélisation de la polarisation : Théorie du film

La concentration d'une espèce près de la membrane va augmenter jusqu'à ce que qu'un équilibre s'établisse entre le flux transféré à travers la membrane sous l'action du gradient de pression et le flux qui diffuse en sens inverse, sous l'action du gradient de concentration, de la couche limite vers la solution. En régime stationnaire, le bilan de matière relatif à l'espèce retenue (Fig. III.19) s'écrit [67] :

$$J_e C(x) - D_s \frac{dC}{dx} = J_e C_p \quad (\text{III.23})$$

Où :

$J_e C(x)$: Densité de flux massique convectif

$D_s \frac{dC}{dx}$: Densité de flux massique diffusif

$J_e C_p$: Densité de flux massique transféré à travers la membrane

Avec :

x : distance par rapport à la membrane [m]

$C(x)$: concentration du soluté dans la couche limite à la cote x [kg/m]

D_s : coefficient de diffusion du soluté à l'interface membrane-solution [m^2/s]

La théorie de film suppose qu'il existe une couche limite de polarisation d'épaisseur δ , située près de la membrane. L'intégration de l'équation précédente permet de déterminer en régime permanent le flux de perméat :

$$J_e = [C(x) - C_p] = D_s (dC/dx) \quad (\text{III.24})$$

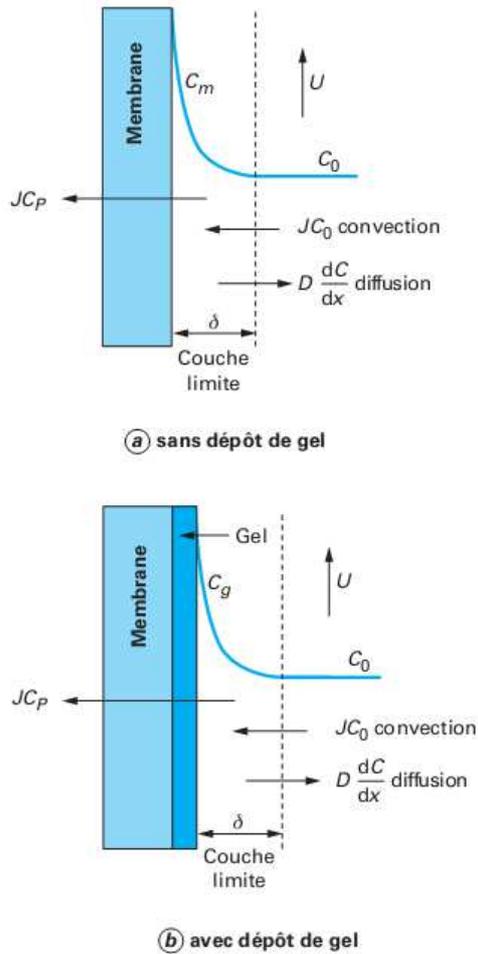


Figure III.19 : Évolution des différents paramètres à l'interface membrane-solution [66]

soit :

$$J_e \int_0^\delta dx = D_s \int_{C_m}^{C_p} \frac{dC}{C - C_p} \quad (\text{III.25})$$

Les conditions aux limites sont : $C = C_m$ pour $x = 0$ et $C = C_0$ pour $x = \delta$. D'où :

$$J_e = \frac{D_s}{\delta} \ln \frac{C_m - C_p}{C_0 - C_p} = K_s \ln \frac{C_m - C_p}{C_0 - C_p} \quad (\text{III.26})$$

$K_s = D_s / \delta$: est le coefficient de transfert de matière du soluté.

III.11 Consommation d'énergie

Dessaler l'eau conduit à fractionner une masse initiale d'eau salée, possédant un certain potentiel chimique, en deux masses, l'une dépourvue de sel, l'autre plus salée.

Dans le cas d'une transformation thermodynamique idéale réversible, une certaine dépense minimale d'énergie sera nécessaire pour effectuer ce fractionnement en fonction du pourcentage d'eau pure produite ramené au mètre cube d'eau pure, ce travail minimal est donné par le tableau III.8 pour deux cas, celui d'une eau titrant 35 kilogrammes par mètre cube de chlorure de sodium (assimilée à l'eau de mer) et celui d'une eau saumâtre titrant 5 kilogrammes par mètre cube de chlorure de sodium [68].

Tableau III.8 : Consommation énergétique du dessalement [68]

Taux d'eau douce produite (%)	Consommation énergétique spécifique (kWh)	
	Eau de mer (35 kg/m ³)	Eau saumâtre (5 kg/m ³)
10	0,8	0,032
50	1,1	0,174
90	2,2	0,29

On constate que l'eau saumâtre, du fait de sa salinité moins importante requiert moins d'énergie que l'eau de mer durant son dessalement. En outre, plus l'énergie fournie est importante plus le rendement de production est important.

Le procédé d'OI ne faisant pas intervenir de changement de phase, doit présenter une consommation énergétique plus faible que d'autres procédés de séparation tels que la distillation. D'autre part, ce procédé peut fonctionner dans des conditions très proches de la réversibilité. En fait, la consommation d'énergie est toujours supérieure au minimum théorique et cela pour plusieurs raisons :

- si l'on veut que le flux d'eau à travers la membrane ait une valeur acceptable, il est nécessaire que la pression de fonctionnement soit nettement supérieure aux conditions de réversibilité.
- de manière à minimiser les phénomènes de polarisation, les vitesses de passage dans les modules doivent être suffisamment élevées.
- dans le cas où aucun DRE n'est prévu, le circuit de concentration est détendu à travers une vanne, d'où perte d'énergie.

CHAPITRE IV

**ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES
DE DESSALEMENT À OSMOSE
INVERSE PAR ÉNERGIE
ÉOLIENNE**

CHAPITRE IV

ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES DE DESSALEMENT À OSMOSE INVERSE PAR ÉNERGIE ÉOLIENNE

IV.1 Introduction

L'utilisation des technologies de dessalement de l'eau par les énergies renouvelables pour la production de l'eau potable est considérée comme une solution durable pour combler le déficit en eau pour les régions rurales qui n'ont pas accès à l'eau potable et à l'énergie électrique. Les unités de dessalement utilisant les SER, entre autres les énergies solaires, les énergies éoliennes, permettent de protéger l'environnement, et présentent des coûts avantages très intéressants, et elles sont très efficaces en matière d'énergies pour la production de l'eau dessalée dans les régions qui souffrent de manque d'eau potable et qui ont l'opportunité d'avoir un potentiel élevé en énergies renouvelables. Dans ce chapitre, une revue sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour le dessalement par OI est présentée.

IV.2 Couplage osmose inverse/énergies renouvelables

Une combinaison des 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 [69,70], 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 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 [69] :

- 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, qui ne nécessite que de l'énergie électrique, est le plus adapté à de tels couplages puisqu'il présente la consommation spécifique énergétique la plus faible.

La figure IV.1 montre les principales combinaisons de l'OI avec les SER. 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 [70].

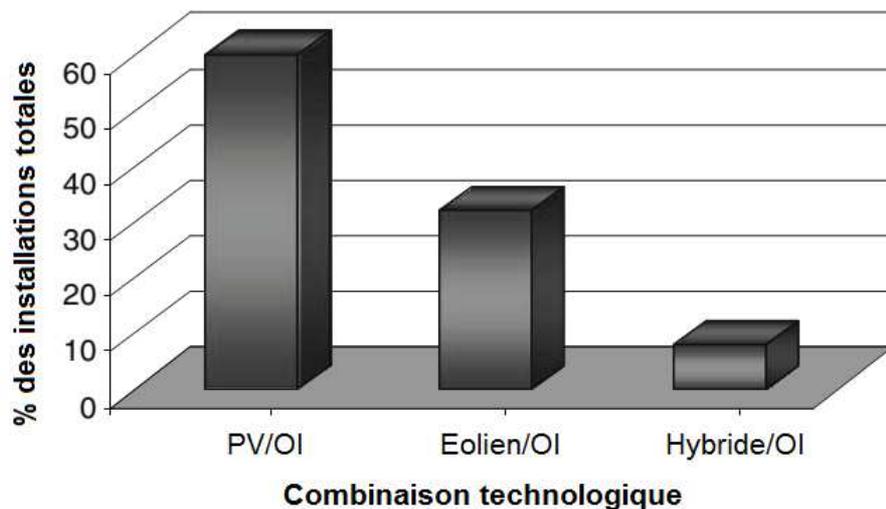


Figure IV.1 : Combinaisons osmose inverse/énergies renouvelables [69]

L'utilisation des SER pour alimenter les unités de dessalement par OI 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 [71–73]. Une revue est donnée dans [74]. De petites unités d'OI alimentés par énergie solaire PV peuvent également être trouvées dans [75–78]. Plus récemment, de nombreuses applications dans ce domaine ont été reportées dont certaines d'entre elles sont données dans [79–82]. Dans [83], 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 [75, 84–88]. Des travaux plus récents sont donnés dans [89–92]. Une unité fonctionnant sans batteries a été présentée par [93]. La combinaison OI/PV/éolien a été premièrement proposée dans un environnement de simulation par [94]. D'autres projets, comportant cette combinaison, ont été également présentés dans [95–101].

IV.3 Description des technologies éolien/osmose inverse

L'utilisation des turbines éoliennes pour alimenter les unités d'OI est techniquement faisable. L'inconvénient majeur de la combinaison des procédés de dessalement avec l'énergie éolienne est la fluctuation de l'alimentation électrique générée par les éoliennes. En général, les systèmes de dessalement sont traditionnellement conçus pour fonctionner avec une puissance d'alimentation constante car une puissance d'alimentation imprédictible et non stationnaire force l'unité de dessalement à fonctionner dans des conditions sous-optimales. Jusqu'à présent, seuls quelques unités éolien/OI autonomes, sans batteries, ont été développées et étudiées. Cependant, tels systèmes de dessalement par des SER fonctionnant dans des conditions de puissance variables n'ont pas encore prouvé leur performance et leur avantage économique. Un système de batterie est généralement utilisé pour le stockage à moyen terme, tandis que les volants d'inertie peuvent être utilisés pour le stockage à court terme [102]. Un facteur important, en particulier dans les systèmes 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.

Les systèmes de dessalement autonomes éolien/OI peuvent être utilisés en conjonction avec d'autres sources d'énergie conventionnelles ou renouvelables (par exemple : diesel, PV); ceux-ci sont connus sous le nom des systèmes hybrides. Un système éolien/OI autonome se compose des équipements suivants:

- générateur éolien
- contrôleur de charge
- banque de batteries
- convertisseur
- unité d'OI

La banque de batteries est utilisée pour la stabilité de la puissance et comme source d'énergie pendant les périodes où l'énergie éolienne n'est pas suffisante pour entraîner l'unité de dessalement. Les contrôleurs de charge sont utilisés pour la protection des batteries contre la surcharge. Les onduleurs sont utilisés pour convertir le courant continu (DC) de la sortie de la batterie, à la charge de courant alternatif (AC). Un générateur diesel de soutiens peut également être utilisé pour charger la banque de batteries ou actionner directement l'unité d'OI. Un schéma typique d'un système hybride autonome PV/éolien/diesel/OI est présenté dans la figure IV.2.

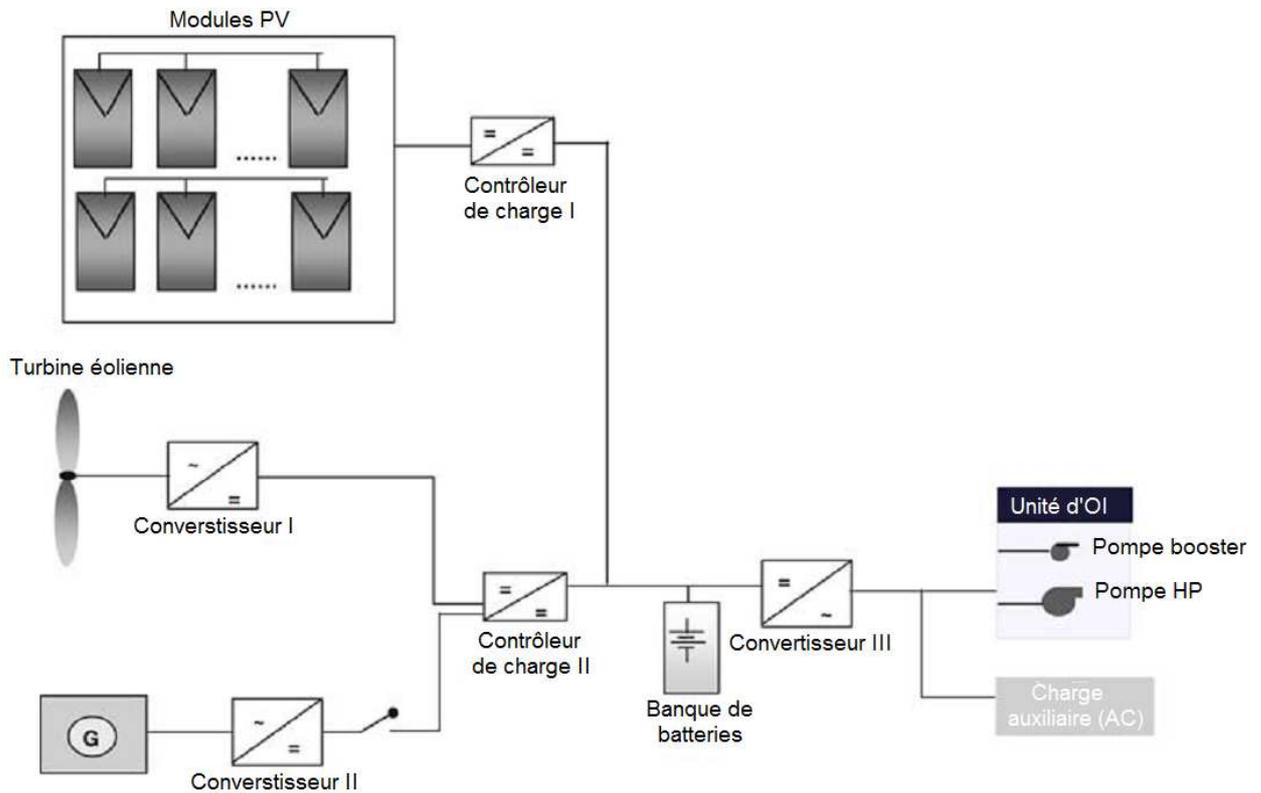


Figure IV.2 : Schéma typique d'un système d'osmose inverse hybride

Pour le procédé d'OI, les DRE sont utilisés pour recycler l'énergie dans le rejet de la saumure sous pression, améliorant ainsi l'efficacité globale du système. Les grandes unités d'OI utilisent des DRE peut réduire la consommation d'énergie jusqu'à 2–2,5 kWh/m³. Leur utilisation augmente le coût initial du système, mais réduit le besoin en énergie de manière efficace. Les systèmes autonomes sont principalement à petite échelle. La majorité des petites installations à grande échelle ont jusqu'à présent été mis au point au sein de projets de recherche. 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.

IV.4 Applications des systèmes éolien/osmose inverse

Plusieurs unités de dessalement combinant l'énergie éolienne avec l'OI ont été conçues, installées et testées. La plupart de ces installations ont été construites dans le cadre de recherche ou des projets de démonstration. Aux alentours des années 1982, un petit système a été installé en France (Ile du Planier), avec une éolienne de 4 kW actionnant une unité d'OI d'une capacité de production de 0,5 m³/h. Ce système a été conçu pour fonctionner soit par couplage direct ou avec des batteries [103].

D'autres systèmes éolien/OI ont été installés en Europe durant les années 1980 : le premier dans l'île de Suderoog (Allemagne) produisant 6–9 m³/jour à partir d'une éolienne de 6 kW, le deuxième à l'île de Grande Canarie (Espagne) avec une production d'eau potable de 200 m³/jour et le troisième dans l'île de Helgoland (Allemagne) produisant 960 m³/jour à l'aide d'une éolienne de 1,2 MW et un groupe électrogène [104].

En 1995, un système de dessalement hybride éolien/diesel/OI a été mis en service dans l'île de Fortaventure (Espagne) avec une capacité de production de 56 m³/jour. Un autre système éolien/diesel a été installé dans l'île de Syros (Grèce) comme une partie du programme de recherche JOULE de la commission européenne (DG XII). Ce système est basé sur une éolienne d'une puissance de 500 kW et huit modules d'OI avec une production d'eau potable entre 60 et 900 m³/jour. La turbine éolienne de 500 kW est connectée à un système de régulation qui permet la gestion de la tension et de la fréquence électrique du réseau, et une auto-adaptation du système de conversion éolien au faible réseau électrique de l'île (Figs IV.9 et IV.10) [105].

En Grèce, le Centre des Sources d'Énergies Renouvelables (CRES) a installé une unité hybride autonome PV/éolien/OI pour le dessalement de l'eau de mer (Figs. IV.5–IV.8) [106]. Le système est à l'échelle pilote, fonctionnant avec un circuit d'eau fermé vu que l'eau de mer n'est pas disponible dans le site d'essai. L'unité d'OI a une capacité de production de 130 L/h et elle est alimentée par un système hybride consistant en des modules PV (4 kW crête) et une turbine éolienne (900 W) (Fig. IV.7). Le système comporte aussi des contrôleurs de charge, une banque de batteries et deux convertisseurs pour actionner la pompe booster et la pompe HP de l'unité d'OI (Fig. IV.8). Ce système est en service depuis 2001.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs systèmes de dessalement de l'eau de mer éolien/OI ou hybrides ont été installés et testés. Une turbine éolienne d'une puissance nominale de 15 kW alimentant une unité d'OI d'une capacité de 0,80 m³/h a été installée en Pozo Izquiedo (Grande Canarie) par l'Institut Technologique de Canarie (ITC), dans le cadre du projet « AEROGEDESA » (Figs. IV.3 et IV.4). La mise en service du système a été lancée en 2004 [107]. Ce projet concerne le couplage électrique d'une éolienne commerciale à une unité de dessalement de l'eau de mer par OI fonctionnant sous un régime constant par le contrôle du stockage et de la puissance éolienne disponible à partir d'une banque de batteries de capacité minimale [108]. Un réservoir de stockage de l'eau potable d'une capacité de 250 m³ est ainsi disponible. L'intégrité du système est totalement automatisée. La salinité de l'eau d'alimentation est de 35500 mg/L tandis que celle de l'eau produite est inférieure à 500 mg/L. Le prix unitaire de l'eau dessalée est estimé à 4–7 \$/m³.



Figure IV.3 : Unité d'osmose inverse de Pozo Izquierdo



Figure IV.4 : Turbine éolienne de Pozo Izquierdo



Figure IV.5 : Turbine éolienne de 900 W



Figure IV.6 : Modules PV de 4 kWp



Figure IV.7 : Unité d'osmose inverse autonome



Figure IV.8 : Banque de batteries



Figure IV.9 : Éolienne de 500 kW à Syros

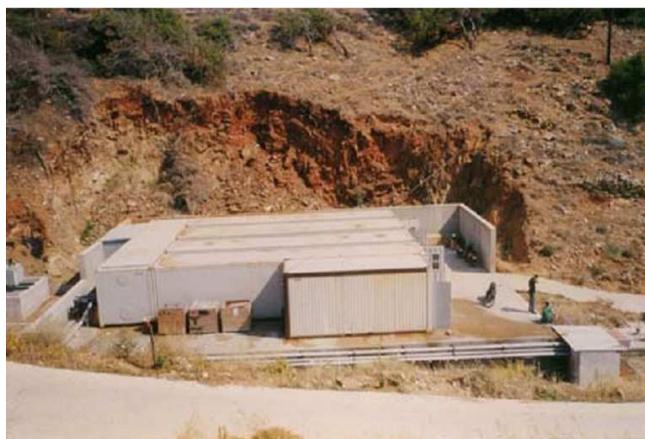


Figure IV.10 : Vue de l'unité d'osmose inverse à l'île de Syros

Au cours des dernières années, quelques fabricants/fournisseurs, dont la majorité est de l'industrie éolienne, ont fourni au marché des solutions éolien/OI compacts pour la production de l'eau et de l'électricité. À titre d'exemple, le constructeur d'éoliennes allemand ENERCON fournit des unités de dessalement éolien/OI modulaires autonomes ou connectées au réseau pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. La gamme de ces unités disponibles sur le marché s'étend de 175 à 1400 m³/jour (eau de mer) et de 350 à 2500 m³/jour (eau saumâtre) [109]. Une entreprise danoise [70] fournit également des solutions clés en main pour la production d'eau douce à l'aide d'éoliennes. Les unités d'OI sont conçues comme des modules conteneurs d'une capacité de production de 10 à 3800 m³/jour. En outre, plusieurs grands projets éolien/OI, impliquant des installations d'une capacité de 1200 m³/jour et plus au Maroc, les Émirats arabes unis et à Aqaba, en Jordanie, ont été annoncés.

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) au Maroc a annoncé l'installation d'une unité éolien/OI dans le village de Akhfennir [110]. Il s'agit d'un village côtier d'environ 4000 habitants, avec un potentiel touristique et industriel satisfaisant, un climat aride, pas de ressources d'eau et pas de réseau électrique. L'alimentation actuelle en eau potable se fait par des citernes à partir de la cité de Tan-Tan qui est environ 100 km plus loin. Le coût de l'eau produite est d'environ 12 \$/m³ alors que la demande estimée en eau potable est de 850 m³/jour en 2010 et peut atteindre 1430 m³/jour en 2020. Le projet projette le développement d'une turbine éolienne de 650 kW pour actionner une unité de dessalement d'une capacité de production de 850 m³/jour. Un groupe électrogène sera ainsi inclus et il y aura en plus des plans pour un nouveau projet de dessalement par SER dans la cité de Tan-Tan.

La première unité de dessalement hybride flottante dans le monde a été construite dans l'île d'Iraklia (Grèce) par une collaboration entre des entreprises grecques, quelques instituts et l'université de la mer d'Egée (Figs. IV.11 et IV.12). L'énergie nécessaire pour le fonctionnement de l'unité est fournie par une éolienne de 30 kW (off-shore) et en outre par des modules PV. Le système est autonome et peut être commandé à distance via une connexion internet. La technologie utilisée pour le dessalement est l'OI et qui produit approximativement 70–80 m³/jour.



Figure IV.11 : Vue de la station de dessalement éolien/OI flottante à l'île d'Iraklia

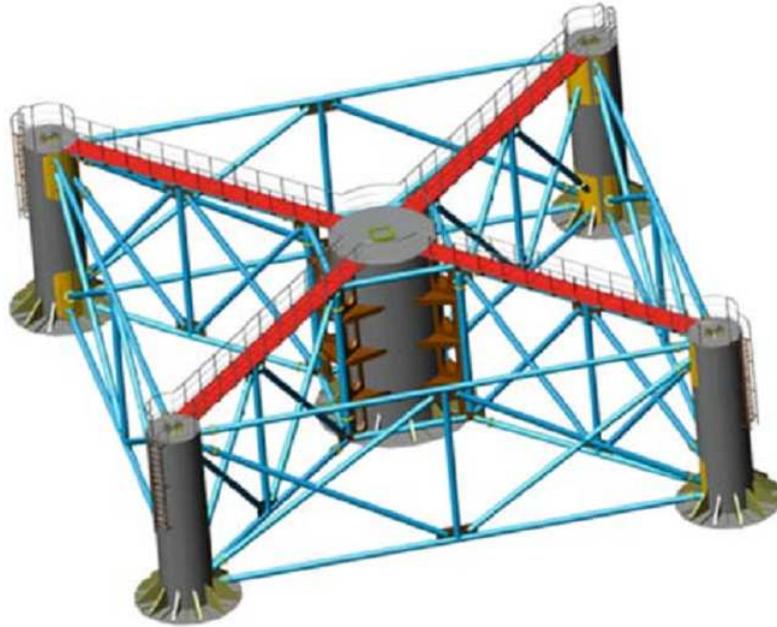


Figure IV.12 : Structure d'une unité off-shore

Dans les années récentes, selon le principe fonctionnement des unités prototypes précédentes, il y a une tendance de développement des unités plus larges pour couvrir les besoins de base de l'eau dans les régions isolées, les îles, etc. Il apparaît que les technologies de dessalement par les SER commencent à gagner plus de terrain et sont devenues plus matures. Le tableau IV.1 regroupe les unités de dessalement éolien/OI les plus répandues dans le monde [70,111]

IV.5 Évolution du marché et faisabilité économique des systèmes éolien/osmose inverse

Le marché des SER n'a cessé d'accroître au cours des 20 dernières années. La technologie éolienne a été acceptée dans le commerce partout dans le monde, et dans un large éventail d'applications, depuis quelques années actuellement. En parallèle, le marché du dessalement est bien établi avec de nombreuses applications potentielles dans le monde entier.

La hausse prévisible du marché du dessalement par les SER a tendance à accroître la compétitivité et réduire le coût de ces systèmes. Le coût de l'eau produite à partir de systèmes d'OI alimentés par les SER varie considérablement, car il dépend fortement du potentiel des SER et de l'emplacement de l'unité de dessalement. En outre, la conception globale du système (la taille du système, l'utilisation de DRE, le type de matériaux utilisés, etc.) affecte de manière significative le coût final.

Tableau IV.1 : Unités de dessalement éolien/osmose inverse [70,111]

Lieu	Capacité de Production (m ³ /j)	Alimentation en énergie électrique	Année d'installation
Ile de Planier, France	12	Éolienne de 4 kW	1982
Ile de Suderoog, Allemagne	6–9	Éolienne de 6 kW	1983
Grande Canarie, Espagne	200	Éolienne de 40 kW	1984
Ile de Helgoland, Allemagne	960	Éolienne de 1,2 MW et groupe électrogène	1988
Ile de Drence, France	–	Éolienne de 10 kW	1990
Denham, Baie Shark, Australie	168	Éolienne de 30 kW	1991
Fuerteventura, Espagne	56	Éolienne de 225 kW, groupe électrogène de 160 kV et volant d'inertie	1995
Pozo Izquierdo, Grande Canarie, Espagne, Projet SDAWES	8 unités × 24	2 éoliennes × 230 kW	1995
Ile de Thérasia, Grèce, Programme APAS RENA	5	Éolienne de 15 kW, batteries de 440 Ah	1995/1996
Ile de Ténérife, Espagne	60–108	Éolienne de 30 kW	1997/1998
Ile de Syros, Grèce, JOULE	60–900	Éolienne de 500 kW, autonome et connecté au réseau	1998
Ile de noix de coco, Hawaii	4	Éolienne de 1,2 kW	1999
Kératea, Grèce, Projet PAVET	3	Éolienne de 900 W, Modules PV de 4 kW crête, batteries	2001/2002
Ile de Grande Canarie, Espagne	5000	Éolienne de 2,64 MW	2002
Pozo Izquierdo, Grande Université de Canarie, Espagne, AEROGEDESA	19	Éolienne de 15 kW, batteries de 190 Ah	2003/2004
Loughborough, Royaume Uni	12	Éolienne de 2,5 kW, pas de batteries	2004
ENERCON, Allemagne	175–1400 (eau de mer) 350–2500 (eau saumâtre)	Éolienne de 200 kW	2006
Ile de Milos, Grèce, Programme OPC	48–984	Éolienne de 850 kW, connecté au réseau	2007
Ile d'Iraklia, Grèce, Programme OPC	70–80	Éolienne de 30 kW (off-shore), modules PV, batteries	2007
Université de Delft, Pays-Bas	5–10	Moulin à vent, pas de batteries	2007/2008

Plusieurs études de simulation ont été effectuées pour discuter la faisabilité des technologies de dessalement éolien/OI sur la base de plusieurs modèles avec des modulations différentes. Feron [112] a été parmi les premiers à évaluer la faisabilité économique d'une unité de dessalement éolien/OI à partir d'une analyse de modélisation mathématique en fonction des hypothèses suivantes: intermittence, disponibilité et dominance de la vitesse du vent et fluctuation de la pression de l'eau d'alimentation. L'auteur conclut que l'utilisation économique d'une unité de dessalement éolien/OI peut être limitée à des zones avec des vents violents et des prix du carburant élevés. Cependant, il pourrait devenir plus économique à cause de l'évolution actuelle tels que la baisse des coûts des unités d'OI en raison du développement continu des sciences de la membrane, la réduction des coûts d'investissement des turbines éoliennes, et la stabilité ou l'augmentation des prix du carburant.

Par ailleurs, la mise en œuvre de plusieurs prototypes de système éolien/OI a été reportée. Un système d'OI alimenté par énergie éolienne à petite échelle a été testé par Robinson et al. [86]. La production d'eau douce par leur système était de 0,5 à 1 m³/j, ce qui est le volume estimé nécessaire par une collectivité éloignée typique en Australie. Un tube de pression a été inclus pour le stockage sous pression de l'eau d'alimentation. Il n'y avait aucun mécanisme de commande « feedback » pour le fonctionnement du système, et quand la puissance éolienne disponible est faible, un petit diesel ou pompe à essence portable sont utilisés.

Miranda et al. [93] ont employé une stratégie de commande qui tente à maximiser l'énergie extraite et le débit de production, malgré les fluctuations de puissance. Ils ont développé et testé une petite unité de dessalement de l'eau de mer par OI entraînée par une éolienne de 2,5 kW sans batteries. Le système fonctionne à débit variable, lui permettant une utilisation efficace de la ressource éolienne naturellement variable, sans avoir recours aux batteries.

Carta et al. [113] ont présenté un système entièrement autonome, sans batterie, installé sur l'île de Grande Canarie, dans l'archipel des Canaries. Le système se compose d'un parc éolien fournissant les besoins énergétiques d'un groupe de huit modules d'OI. La principale innovation de ce système se réfère à la mise en œuvre d'une stratégie de fonctionnement automatique, le contrôle du nombre de modules d'OI qui doivent être connectés afin de correspondre à l'approvisionnement en énergie éolienne variable. Les auteurs ont conclu que ce système peut être appliqué au dessalement de l'eau de mer à la fois sur une petite et à grande échelle, dans les régions côtières avec une pénurie d'eau pour l'usage domestique et/ou agricole, mais avec des ressources d'énergie éolienne.

Park et al. [114] ont testé un système de dessalement éolien/OI sans stockage utilisant l'eau saumâtre synthétique sur une plage de vitesses de vent simulées dans les régimes permanent et transitoire. Le principal défi lié à ce mode de fonctionnement est l'effet de la coupure d'alimentation qui réduit le débit et la qualité de la production. Ce travail a démontré que les systèmes membranaires peuvent être directement connectés aux systèmes d'énergies renouvelables (l'énergie éolienne présente les fluctuations les plus extrêmes) et fonctionnent efficacement au sein d'une plage de fonctionnement assurée avec de grandes fluctuations de puissance, mais de nouvelles stratégies de contrôle sont nécessaires pour faire face au fonctionnement intermittent, en particulier avec des eaux d'alimentation de salinité élevée.

Plus tard, Habali et Saleh [115] ont effectué une analyse du coût d'un système éolien/OI pour dessaler l'eau souterraine saumâtre en Jordanie. La pompe HP du système est alimentée soit par un moteur diesel soit par un système de conversion éolien. L'analyse a été basée sur la distribution de la vitesse du vent mesurée et les courbes de puissance du système de conversion de l'énergie éolienne en Jordanie. Les auteurs ont indiqué qu'il en coûterait moins de dessaler l'eau saumâtre avec un système éolien/OI qu'avec un système à moteur diesel conventionnel.

Une étude analytique sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour le dessalement par OI a été menée par Kiranoudis et al. [116]. Les courbes de conception généralisées pour le traitement des variables de fonctionnement structurel ont été obtenues. L'étude a révélé que le coût unitaire de production d'eau douce par une unité d'OI conventionnelle pourrait être réduit jusqu'à 20% pour les régions avec une vitesse moyenne du vent de 5 m/s (mesurée à la hauteur standard, soit 10 m) ou plus.

Voivontas et al. [117,118] ont développé une méthode pour évaluer le potentiel du marché des systèmes de dessalement alimentés par les SER. Les résultats ont montré que les îles de la mer Égée sont les zones les plus arides de la Grèce avec des ressources éoliennes abondantes. Ainsi la plupart des unités de dessalement éolien/OI pourraient fonctionner économiquement dans la majorité de ces îles arides. Ils ont également exploré un outil de commande assistée par ordinateur (CAO) comme un moyen pour comparer les différentes options sur la base d'indicateurs économiques et la combinaison de technologies qui assurent les besoins en énergie du dessalement. En utilisant le modèle, les effets des paramètres de conception critiques sur le prix de vente de l'eau ont été analysés pour une unité d'OI alimentée par l'énergie éolienne.

Une évaluation préliminaire des coûts de dessalement par couplage éolien/OI a été présentée par Garcia-Rodriguez et al. [90]. En particulier, l'influence des conditions climatiques et la capacité de l'unité sur le coût de production a été analysée pour le dessalement de l'eau de mer. En outre, l'évolution possible du coût de production due aux variations éventuelles de l'énergie éolienne et des technologies d'OI a été évaluée. Enfin, l'influence de l'évolution des paramètres financiers et du coût de l'énergie conventionnelle sur la performance des unités de dessalement éolien/OI par rapport aux unités d'OI classiques a été soulignée.

Romero-Ternero et al. [119] ont évalué le coût unitaire de l'eau douce produite à partir d'un système de dessalement de l'eau de mer éolien/OI typique ainsi que l'efficacité exergétique du procédé au moyen de la thermo-économie. L'analyse exergo-économique a montré que le dessalement de l'eau de mer à OI par énergie éolienne a été rentable pour le site éolien typique avec une capacité de production moyenne et le coût unitaire de l'eau douce était d'environ 1,04 \$/m³.

Koklas et Papathanassiou [120] ont proposé un modèle logistique pour fournir un aperçu sur les critères de sélection des composants d'une unité éolien/OI autonome. La simulation du fonctionnement du système a été réalisée en utilisant une variété de configurations différentes par rapport à la taille de ses principaux composants (turbine éolienne, unité d'OI et batteries). Pour chaque cas, la production annuelle d'eau a été déterminée, une évaluation économique est effectuée et le coût de production d'eau est estimé.

Forstmeier et al. [121] ont évalué la faisabilité économique d'une unité de dessalement éolien/OI par une analyse de modélisation mathématique. Il a été démontré que les coûts d'un système de dessalement par OI utilisant l'énergie éolienne sont en ligne avec ce qui est prévu d'un système de dessalement conventionnel et s'avèrent particulièrement économiques dans les régions avec de bonnes ressources éoliennes et ayant des coûts élevés de l'énergie. Ainsi, le dessalement par énergie éolienne pourrait être compétitif avec d'autres systèmes de dessalement fournissant efficacement une eau potable propre et salubre d'une manière respectueuse de l'environnement.

Un modèle intégré incorporé dans le logiciel REDDES (Renewable Energy Driven DESalination) pour l'utilisation des énergies renouvelables (éolien, solaire) dans le dessalement de l'eau de mer a été développé par Koroneos et al. [122]. Les technologies de dessalement (principalement l'OI) ont été couplées avec des systèmes SER pour produire l'eau potable à moindre coût possible. Les résultats ont indiqué que le coût d'une configuration SER/dessalement dépend fortement du potentiel renouvelable disponible.

Plus le potentiel d'énergie renouvelable disponible est important, plus faible est le coût de la production d'énergie à partir du système SER et donc plus faible est le coût de production de l'eau à partir de l'unité de dessalement.

Zejli et al. [123] ont étudié la faisabilité économique d'un système de dessalement éolien/OI connecté au réseau dans la ville de Tan-Tan au Maroc par l'évaluation de coût moyen actualisé de l'eau douce. L'étude a relevé que le système proposé n'est pas rentable dans cette ville pour son faible potentiel éolien.

Spyrou et Anagnostopoulos [124] ont proposé une unité de dessalement à OI alimentée par des générateurs d'électricité éoliens et solaires, et par une unité de pompage. Un algorithme informatique spécifique a été développé pour simuler le fonctionnement de l'unité entière et effectuer une évaluation économique de l'investissement. Des études d'optimisation de la conception de l'unité pour différents objectifs ont été réalisées, comme la minimisation des coûts de production d'eau douce ou la maximisation des besoins en eau à satisfaire.

Koutroulis et Kolokotsa [125] ont présenté une méthodologie pour le dimensionnement optimal des modules PV et des systèmes d'OI alimentés par des générateurs éoliens. Parmi une liste des dispositifs du système disponibles sur le marché, le nombre optimal et le type d'unités ont été déterminées de façon à minimiser le coût total du système sur une période de 20 ans, tandis que simultanément la demande en eau des consommateurs a été complètement couverte. Les résultats du dimensionnement optimal correspondants ont indiqué que le coût total du système d'OI a été fortement affecté par les caractéristiques de fonctionnement des dispositifs composants le système.

Bourouni et al. [126] ont proposé un nouveau modèle basé sur les algorithmes génétiques (GA) permettant la génération de plusieurs individus (solutions possibles) pour coupler une petite unité d'OI à une SER afin de minimiser le coût total de l'eau. Un intérêt particulier a été porté sur les systèmes hybrides (PV/éolien/batteries/OI), et un cas d'une unité PV/OI, installée depuis 2007 dans le village de Ksar Ghilène du sud de la Tunisie, a été étudié.

Käufler et al. [127] ont présenté les spécifications techniques et économiques du dessalement de l'eau de mer à OI par énergie éolienne à partir du coût moyen actualisé de l'eau pour des configurations d'unités typiques et des variations de paramètres adéquates. Ils ont révélé que le tarif du réseau est le critère le plus important pour la viabilité économique du système dès que le réseau électrique conventionnel est destiné à être remplacé par l'énergie éolienne.

IV.6 Conclusion

L'utilisation de l'énergie éolienne pour le dessalement semble de nos jours comme une option raisonnable et techniquement au point face aux problèmes émergents et préoccupants de l'énergie et de l'eau potable. En dépit des recherches intensives dans le monde entier, la pénétration actuelle des installations de dessalement éoliennes est encore faible. Au cours de ces dernières années, il y a eu une tentative assez intense pour développer des unités dessalement fonctionnant à petite ou moyenne échelle, principalement alimentées par énergie éolienne. Les technologies ont été développées dans une certaine mesure d'intégrer l'énergie éolienne directement ou indirectement au procédé de dessalement. Jusqu'à présent, l'OI reste le procédé de dessalement le mieux disposé à s'adapter à l'énergie éolienne de part sa simplicité et sa souplesse de fonctionnement.

PARTIE II

**ÉTUDE TECHNICO-
ÉCONOMIQUE ET
ENVIRONNEMENTALE**

CHAPITRE V

**MODÉLISATION DU SYSTÈME
ET ÉTUDE DES PERFORMANCES**

CHAPITRE V

MODÉLISATION DU SYSTÈME ET ÉTUDE DES PERFORMANCES

V.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une description du système de dessalement proposé est présentée. Afin d'évaluer les performances du système étudié, un modèle numérique a été développé sous FORTRAN (Annexe A) à partir d'un ensemble d'équations mathématiques non linéaires implicites générées par la combinaison de la loi de distribution de Weibull, la loi de puissance modifiée de Justus et Mikhaïel, le modèle solution-diffusion et l'approche de la théorie du film. L'effet des différents paramètres de fonctionnement sur la performance du système à savoir : la vitesse de vent, la pression et le débit d'alimentation, et le taux de conversion sont ainsi étudiés. Enfin, une analyse exergétique du système éolien/OI est effectuée.

V.2 Description du système proposé

Le système proposé (Fig. V.1) comporte une turbine éolienne de puissance nominale de 1000 kW couplée directement à une unité de dessalement par OI à deux étages avec récupération d'énergie et l'option de l'insertion d'un booster entre les deux étages. Cette disposition est particulièrement intéressante pour le dessalement des eaux saumâtres car le deuxième étage est favorisé par la pression qui reste dans le premier concentrât ce qui permet d'augmenter le taux de conversion et réduire l'énergie de pompage [128], augmentant cependant la consommation de membranes pour le procédé et ceci devrait être compensé par un cadre de travail dans la littérature [129].

L'unité d'OI consiste principalement à la section de séparation (8) (assemblage de plusieurs membranes montées sur des supports résistant à la pression appelés modules) alimentée par une pompe HP (7) correspondant à la pression de fonctionnement de l'unité. Les modules spiralés sont insérés dans des tubes de pression raccordés entre eux par des connecteurs. Les tubes de pressions sont arrangés en parallèle afin de satisfaire le débit d'eau traversant les membranes, la pression de fonctionnement et la capacité de production de l'unité. Le nombre total des membranes et des tubes de pression nécessaires est fonction du débit du perméat et de la pression appliquée.

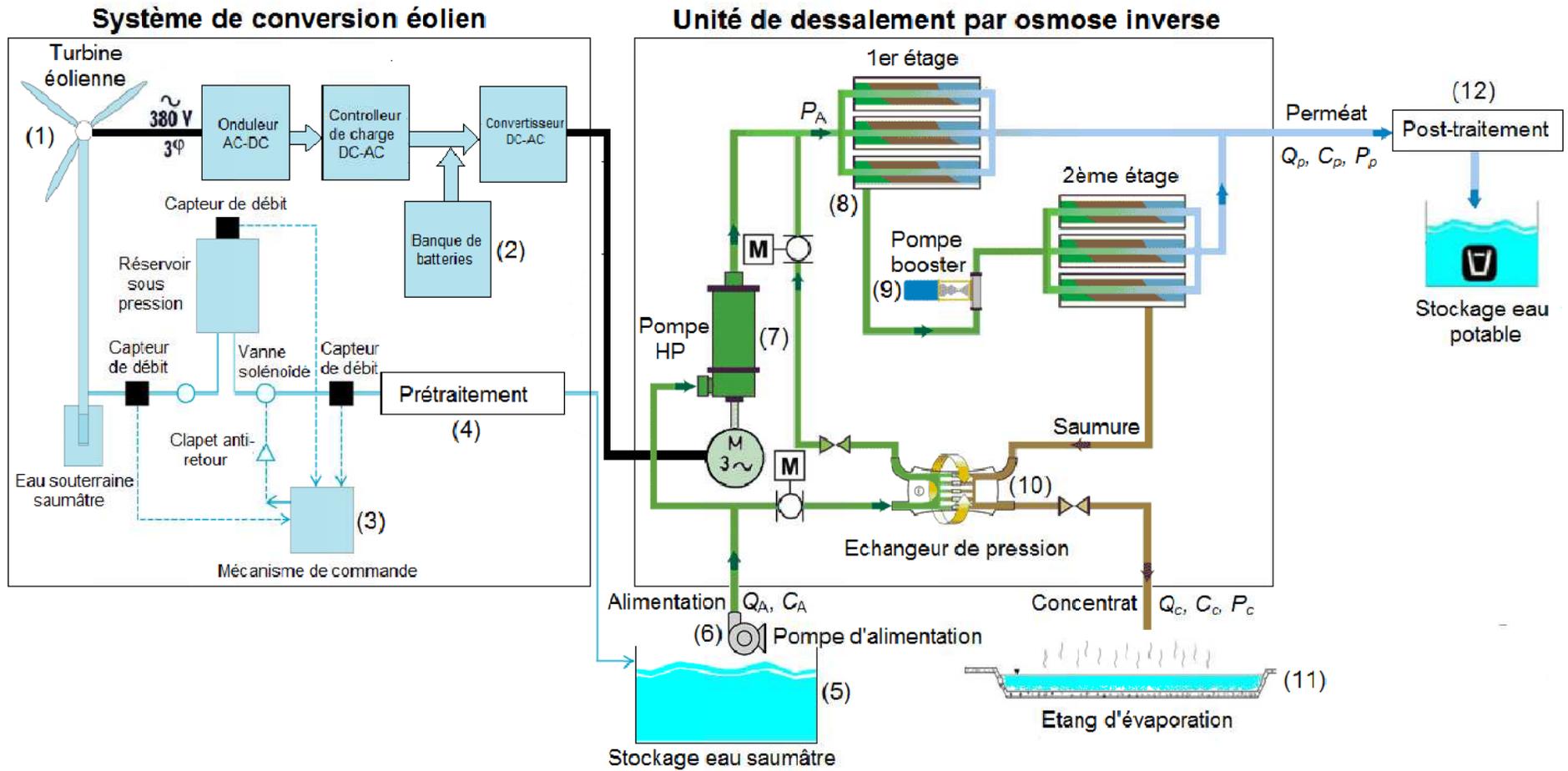


Figure V.1 : Schéma du système de dessalement éolien/osmose inverse proposé

Une pompe d'alimentation (6) fournit un débit et une pression d'eau suffisants à l'entrée de la pompe HP et l'échangeur de pression (10). Le rejet de saumure des membranes d'OI passe à travers l'échangeur de pression où sa pression et son débit sont transférés directement à une partie de l'eau d'alimentation.

La pompe booster (9) est nécessaire pour assurer la circulation du fluide dans le circuit HP. Il faut noter que, dans la conception des systèmes de dessalement de l'eau de mer classiques (à un seul étage), la pompe booster est appliquée à la sortie de l'échangeur de pression. Cependant, il y a un intérêt pour l'optimisation de la conception des systèmes de dessalement des eaux saumâtres à deux étages d'insérer la pompe booster entre le 1^{er} et le 2^{ème} étage [130]. Dans cette disposition, la pompe booster réduit la pression requise par la pompe principale HP et contribue à l'équilibre des écoulements entre les deux étages. La saumure quittant l'unité de dessalement est rejetée à la pression atmosphérique.

Comme la vitesse de vent est très variable, le débit et la pression de l'eau d'alimentation générés par la turbine éolienne sont aussi très variables. C'est pourquoi, l'addition d'un stabilisateur et d'un mécanisme de commande « feedback » (3) pour ajuster le débit et la pression de l'eau suivant la variabilité de la vitesse de vent permettra d'améliorer la performance du système. Des batteries de stockage temporaire (2) sont employées pour éviter les fluctuations d'énergie dans le système et garantir un fonctionnement continu de l'unité de dessalement.

Un système de prétraitement (4) est appliqué afin d'optimiser la performance de l'unité d'OI et augmenter la durée de vie des membranes par la réduction du pouvoir colmatant minéral, organique ou bactérien qui engendrerait rapidement un dysfonctionnement de l'étape membranaire. Le choix du prétraitement dépend de l'origine et de la qualité de l'eau brute d'alimentation. Les eaux de surface ont typiquement une grande aptitude au colmatage et nécessitent des systèmes de prétraitement coûteux par rapport aux eaux souterraines. Les méthodes de prétraitement doivent être judicieusement choisies afin d'assurer le minimum de colmatage au minimum coût possible. Les quantités des produits chimiques à ajouter doivent être calculées précisément en fonction des matières en suspension dans l'eau d'alimentation. Pour des eaux peu contaminées, le prétraitement peut nécessiter uniquement l'addition de polyélectrolyte comme un agent de floculation, et le H₂SO₄ pour réduire le niveau du pH et éviter la précipitation de CaCO₃. Quand aux eaux fortement contaminées, d'autres étapes d'addition de chlore et de déchloration doivent être incluses avant l'étape finale qui consiste au dosage en métrasulfite de sodium, filtration par charbon active et traitement par ultraviolet [131].

L'unité de dessalement est raccordée à un système de stockage de l'eau d'alimentation (5) pour assurer un fonctionnement continu de l'unité durant les périodes de faible régime de vent. Ce système additionnel est nécessaire car la puissance éolienne varie suivant la vitesse du vent disponible et la plupart des systèmes de dessalement actuels sont conçus pour fonctionner à une puissance constante.

Le rejet de saumure de l'unité de dessalement alimente une série de bassins d'évaporation (11). Ce système est particulièrement efficace dans les régions avec faible pluviométrie et dont les conditions climatiques sont favorables pour des taux d'évaporation instantanés et relativement rapides. Par l'extension de telles surfaces en parallèle avec une des dimensions latérales importantes et une longueur considérable avec un minimum de profondeur (3–4 m), le vent peut être exploité pour intensifier l'évaporation et réduire le volume de la saumure rejetée [132].

Enfin, un système de post-traitement est nécessaire avant l'utilisation finale de l'eau dessalée. Ceci peut être accompli par l'injection de la lime pour ajuster le pH et du chlore pour la désinfection ou en mélangeant avec le perméat de faibles quantités de l'eau d'alimentation contenant des niveaux suffisants de carbonate de calcium et d'alcalinité [133].

V.3 Modélisation mathématique

V.3.1 Évaluation de la puissance moyenne annuelle fournie par l'éolienne

Chaque système de conversion d'énergie éolienne est caractérisé par :

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

Dans la littérature, de nombreux modèles sont présentés pour la simulation de la puissance fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent pour tout type d'éolienne. Tous les modèles considèrent que la puissance produite par une éolienne est nulle dans les intervalles de vitesse du vent $V < V_d$ (Région 1) et $V > V_c$ (Région 4) et elle est maintenue constante et nominale pour l'intervalle $V_n < V < V_c$ (Région 3) (Fig. V.2).

Pour l'intervalle de vitesses du vent $V_d < V < V_n$, (Région 2) la puissance fournie par l'éolienne est fonction de la vitesse du vent et c'est dans cet intervalle que ces modèles diffèrent.

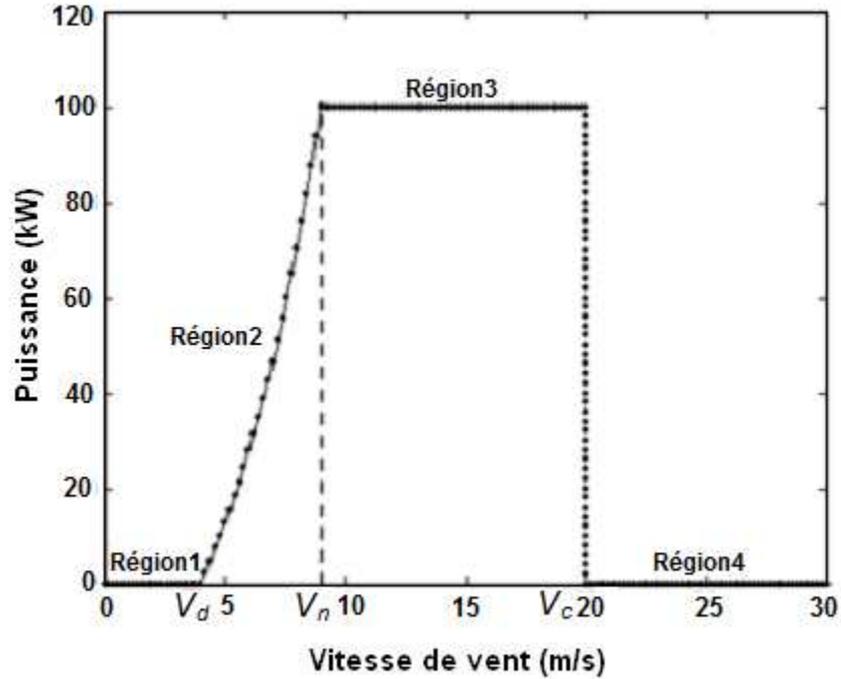


Figure V.2 : Courbe caractéristique d'une éolienne

L'étude menée dans des travaux précédents montre qu'il n'existe aucun modèle mathématique qui soit adapté à tous les types d'éoliennes [134,135]. Cependant le modèle quadratique est celui qui présente, en général, la plus faible erreur quadratique et donc qui semble le plus adapté à la plupart des éoliennes testées. Ce modèle, permettant de déterminer la puissance produite par l'éolienne est décrit par l'équation suivante [136] :

$$P(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } V < V_d \\ \alpha + \beta V + \gamma V^2 & \text{si } V_d \leq V < V_n \\ P_n & \text{si } V_n \leq V \leq V_c \\ 0 & \text{si } V > V_c \end{cases} \quad (\text{V.1})$$

Les constantes α , β et γ sont déterminées en vertu des conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \alpha + \beta V_d + \gamma V_d^2 &= 0 \\ \alpha + \beta V_n + \gamma V_n^2 &= P_n \\ \alpha + \beta(V_d + V_n) + \gamma(V_d + V_n)^2 &= P_n \left(\frac{(V_d + V_n)}{V_n} \right)^3 \end{aligned} \quad (\text{V.2})$$

La puissance moyenne annuelle fournie par une turbine éolienne peut ainsi être calculée par la relation suivante :

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) \cdot dV \quad (\text{V.3})$$

$f(V)$: est la fonction de distribution de Weibull.

L'équation (V.3) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\bar{P} = \int_{V_d}^{V_c} \left(\alpha + \beta V + \gamma V^2 \right) \frac{k_1}{c_1} \left(\frac{V}{c_1} \right)^{k_1-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c_1} \right)^{k_1} \right] dV + P_n \cdot \left\{ \exp \left[- \left(\frac{V_n}{c_1} \right)^{k_1} \right] - \exp \left[- \left(\frac{V_c}{c_1} \right)^{k_1} \right] \right\} \quad (\text{V.4})$$

Le premier terme de cette équation est une simple intégration qui nécessite une résolution numérique par la méthode de Simpson. Les paramètres de Weibull déterminés à une hauteur de 10 m a.d.s pour les trois sites étudiés sont regroupés dans le tableau V.1 [137].

Le facteur de capacité est l'un des paramètres de performance des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Il correspond à l'énergie annuelle produite par une éolienne divisée par sa production théorique nominale (maximale) annuelle. Il est donné par l'équation suivante :

$$F_c = \frac{\bar{P}}{P_n} \quad (\text{V.5})$$

Enfin, la production annuelle d'électricité de la turbine éolienne est obtenue par :

$$P_{elec} = \bar{P} \times t = F_c \times P_n \times 8760 \quad (\text{V.6})$$

où : 8760 est le nombre d'heures dans une année de 365 jours

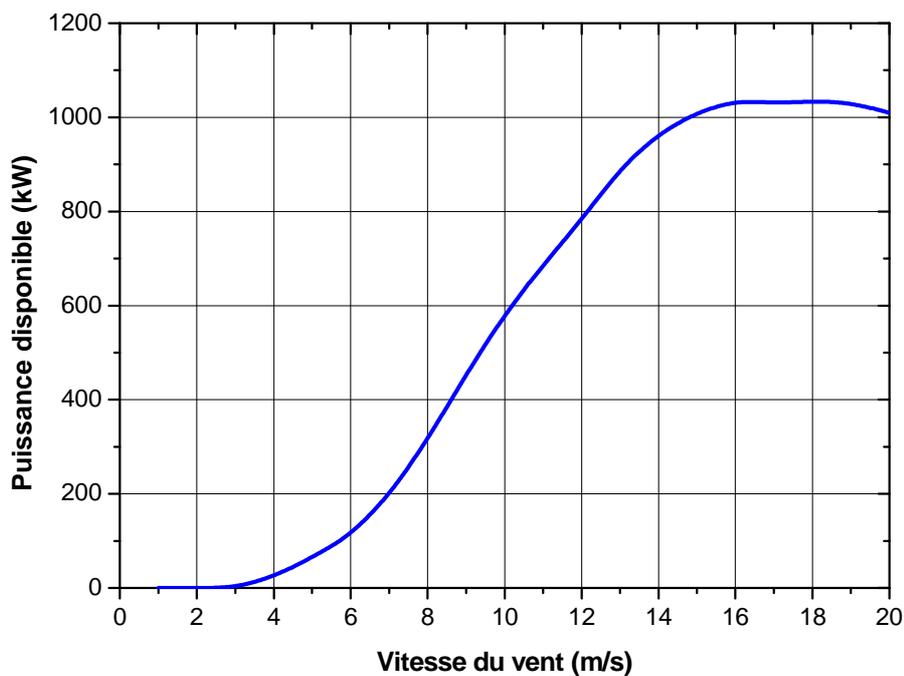
Les caractéristiques techniques de la turbine éolienne sont présentées dans le tableau V.2 et la courbe de puissance est illustrée dans la figure V.3 [138].

Tableau V.1 : Paramètres de distribution de Weibull [137]

Site	Rugosité (m)	Paramètres de Weibull	
		C_1 (m/s)	k_1 (-)
Adrar	0,01	7,2	2,15
Timimoun	0,01	6,5	1,91
Tindouf	0,01	5,8	1,85

Tableau V.2 : Données techniques de la turbine éolienne [138]

Paramètre	Valeur
Puissance nominale (kW)	1000
Diamètre du rotor (m)	54
Hauteur du mât (m)	82
Surface balayée par le rotor (m ²)	2290
Vitesse de démarrage (m/s)	3
Vitesse de coupure (m/s)	20
Vitesse nominale (m/s)	16
Vitesse de rotation du rotor (tr/min)	15 – 22
Durée de vie (année)	25

**Figure V.3 : Courbe de puissance de la turbine éolienne [138]**

V.3.2 Estimation de la capacité de production de l'unité d'osmose inverse

Pour estimer le débit produit par l'unité d'OI, le modèle de solution-diffusion est combiné avec l'approche de théorie de film. En régime stationnaire, les équations qui gouvernent le transport de solvant et de soluté sont les suivantes [139] :

Les équations de continuité (balance) :

$$\begin{aligned} Q_A &= Q_c + Q_p \\ Q_A C_A &= Q_c C_c + Q_p C_p \end{aligned} \quad (\text{V.7})$$

Les débits spécifiques de l'eau et de la saumure sont donnés respectivement par :

$$J_e = A(T)(\Delta P - \Delta \pi) \quad (\text{V.9})$$

$$J_s = B(T)(C_m - C_p) \quad (\text{V.10})$$

Avec :

$$\Delta \pi = b_\pi (C_m - C_p) \quad (\text{V.11})$$

Le flux de solvant peut ainsi être exprimé par la relation suivante :

$$J_s = J_e C_p \quad (\text{V.12})$$

En présence de la polarisation de la concentration, le flux de solvant est donné par :

$$J_e = K_s \ln \frac{C_m - C_p}{C_0 - C_p} \quad (\text{V.13})$$

Combinons les équations (V.10)–(V.12) (éliminant C_m), on obtient :

$$J_e = A(T) \left[\Delta P - b_\pi \left(C_0 - \frac{B(T)C_0 \exp(J_e/K_s)}{J_e + B(T) \exp(J_e/K_s)} \right) \exp(J_e/K_s) \right] \quad (\text{V.14})$$

et :

$$C_p = \frac{B(T)C_0}{B(T) + J_e \exp(J_e/K_s)} \quad (\text{V.15})$$

La relation (V.14) est une équation algébrique non linéaire implicite qui peut être résolue numériquement par la méthode de la Sécante.

La valeur de la concentration de perméat, C_p , peut ensuite être calculée en utilisant l'équation (V.15). Cette concentration est astreinte à se situer en dessous de la concentration désirée, $C_{p,d}$, comme suit :

$$C_p \leq C_{p,d} \quad (\text{V.16})$$

La concentration dans la masse, C_0 , est exprimée par :

$$C_0 = \frac{C_A + C_c}{2} \quad (\text{V.17})$$

L'effet de la température sur la perméabilité de la membrane au solvant, $A(T)$, et de la perméabilité de la membrane au soluté, $B(T)$, est évalué par les relations suivantes [140] :

$$A(T) = A_0 \frac{\mu(T_0)}{\mu(T)} \quad (\text{V.18})$$

$$B(T) = B_0 \times \frac{T + 273,15}{T_0} \times \frac{\mu_0}{\mu(T)} \quad (\text{V.19})$$

La dépendance en température de la viscosité est calculée approximativement par l'équation de Guzman–Andrade [141] :

$$\mu(T) = 1,984 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{1825,85}{T + 273,15}\right) \quad (\text{V.20})$$

Dans les modules membranaires spiralés, des chicanes perforées sont utilisées pour augmenter le coefficient de transfert de masse. Pour une conduite contenant des chicanes, le coefficient de transfert de masse, K_s , est calculé par l'équation suivante [142] :

$$Sh = 0,065Re^{0.865}Sc^{0.25} \quad (V.21)$$

$$\text{Avec : } Sh = \frac{K_s d_h}{D_s} ; Re = \frac{d_h u}{\nu} ; Sc = \frac{\nu}{D_s}$$

La vitesse moyenne d'écoulement dans un canal contenant des chicanes est exprimée par :

$$u = \frac{Q_0}{wh_{sp}\varepsilon} \quad (V.22)$$

Où : d_h , h_{sp} , ε sont les paramètres de chicane.

Le débit dans la masse, Q_0 , est donné par :

$$Q_0 = \frac{Q_A + Q_c}{2} \quad (IV.23)$$

Dans le présent travail, des modules membranaires fabriqués par Filmtec sous le nom commercial FILMTEC BW30-400 sont choisies. Les membranes sont caractérisées par leur stabilité chimique, thermique et microbiologique, ainsi que leur résistance hydraulique.

Les spécifications des modules et les dimensions des chicanes sont donnés dans le tableau V.3 [143].

Pour l'eau saumâtre, la viscosité cinématique, ν , peut être estimée par la relation suivante [144] :

$$\nu = 0,0032 + 3,0 \times 10^{-6} C + 4,0 \times 10^{-9} C^2 \quad (IV.24)$$

Le coefficient de diffusion du soluté, D_s , est évalué à $5,5 \times 10^{-6}$ m/h.

Tableau V.3 : Spécifications géométriques du module membranaire [143]

Paramètre	Valeur
Diamètre hydraulique de la conduite (mm)	0,78045
Hauteur de l'espace (mm)	0,593
Porosité	0,9
Hauteur de la membrane (m)	1
Largeur de la membrane (m)	37
Surface active de la membrane (m ²)	37
Perméabilité de référence de la membrane au solvant (m/h.bar)	19,43×10 ⁻⁴
Perméabilité de référence de la membrane au soluté (m/h)	78,55×10 ⁻⁵

Ainsi, le coefficient osmotique, b_π , peut être obtenu par :

$$b_\pi = \pi/C \quad (\text{IV.25})$$

La pression osmotique, π , est calculée par la corrélation suivante [150]:

$$\pi = \alpha C \quad (\text{IV.26})$$

où : $\alpha = 7,79 \times 10^4 \text{ Pa/kg.m}^{-3}$

Les caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau saumâtre du sud de l'Algérie sont données dans le tableau III.7 [145].

L'énergie requise pour la pressurisation de l'eau d'alimentation est déterminée par la relation suivante :

$$P_p = \frac{Q_A \Delta P}{\eta_p} \quad (\text{V.27})$$

L'énergie transférée par le DRE est calculée comme suit :

$$P_{DRE} = P_c Q_c \eta_{DRE} \quad (\text{V.28})$$

Tableau III.7 : Propriétés physico-chimiques de l'eau saumâtre du sud algérien [145]

Paramètre	Unité	Valeur
Température	(°C)	20
Turbidité	(NTU)	25
pH	(—)	6,5
Conductivité	(mS/cm)	4,2
Dureté	(mmol/L)	13,5
Na ⁺	(mg/L)	460
K ⁺	(mg/L)	45
Ca ²⁺	(mg/L)	320
Mg ²⁺	(mg/L)	135
F ⁻	(mg/L)	3
Cl ⁻	(mg/L)	1140
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	730
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	100
TDS	(mg/L)	2933

La pression de l'eau côté concentrât, P_c , est donnée par :

$$P_c = \Delta P - \Delta P_L \quad (\text{V.29})$$

La chute de pression, ΔP_L , est évaluée par la corrélation définie par Schock et Miquel [146] :

$$\Delta P_L = 9,5 \times 10^8 \left(\frac{Q_A + Q_c}{2} \right)^{1,7} \quad (\text{V.30})$$

Le débit d'alimentation pompé à l'aide de la turbine éolienne peut ainsi s'écrire :

$$Q_A = \frac{\bar{P}}{\Delta P \eta_p^{-1} - \left[(1-y) \left(\Delta P - 9,5 \times 10^8 \left(Q_A (1-y/2) \right)^{1,7} \right) \eta_{DRE} \right]} \quad (\text{V.31})$$

La relation (V.31) est une équation algébrique implicite non linéaire qui peut être résolue numériquement en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

Le débit produit par l'unité d'OI peut donc être déduit de la relation suivante :

$$Q_p = y \cdot Q_A \quad (\text{V.32})$$

Finalement, La consommation énergétique spécifique à la production d'un mètre cube d'eau douce est donnée par :

$$E = \frac{\Delta P Q_A \eta_p^{-1} - P_c Q_c \eta_{DRE}}{Q_p} \quad (\text{V.33})$$

V.3.3 Analyse exergetique du système

V.3.3.1 Introduction

L'analyse énergétique des systèmes et le calcul de leur rendement permettent de les classer. Cependant, un critère complémentaire semble plus adapté car il intègre à la fois la quantité et la qualité des énergies mises en jeu dans les systèmes : le critère exergetique.

L'analyse exergetique est basée sur l'association du premier (conservation de l'énergie) et du second principe (création de l'entropie, prise en compte des irréversibilités et de la dégradation de l'énergie) de la thermodynamique [147]. Cette analyse consiste à évaluer les flux exergetiques entre tous les sous ensembles d'un système complexe pour en déduire les rendements exergetiques. On peut ainsi chercher les sous ensembles les moins performants pour essayer ensuite d'analyser les raisons (irréversibilités) de ce manque de performance afin de les modifier pour en améliorer le rendement exergetique.

V.3.3.2 Calcul exergetique

La définition mathématique de l'exergie pour un flux de matière par unité de masse est donnée par la relation suivante [148] :

$$Ex = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (\text{V.39})$$

L'indice (0) indique l'état de référence du système considéré.

Si les variables intensives caractérisant le système sont la vitesse de vent, la température, la pression et la concentration, les différentes formes d'exergie associées sont :

a) Exergie cinétique :

L'exergie cinétique est celle disponible dans le vent qui traverse la section du rotor de la turbine éolienne. C'est la puissance de l'énergie cinétique contenue dans le flux d'air traversant la surface du rotor. Elle est donnée par [149]:

$$Ex_k = \frac{1}{2} \rho_a A V_0^3 \quad (\text{V.40})$$

b) Exergie physique :

L'exergie physique est défini comme étant la somme de l'exergie thermique et celle de pression. Elle peut être calculée par la relation suivante [150]:

$$Ex_{ph} = \int_{T_0}^T c_p \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT + \int_{P_0}^P V dP \quad (\text{V.41})$$

c) Exergie chimique :

En termes de concentration, l'exergie chimique d'une substance peut être calculée par [151] :

$$Ex_{ch} = -N_s RT \ln x_1 \quad (\text{V.42})$$

Avec : N_s : est la concentration du solvant par unité de masse de la solution :

$$N_s = \frac{\left(1000 - \sum \frac{C_i}{\rho_s}\right)}{MW_s} \quad (\text{V.43})$$

Et x_1 : est la fraction molaire du solvant :

$$x_1 = \frac{N_s}{N_s + \frac{1000}{\rho_s} \sum \left(\frac{\beta_i C_i}{MW_i}\right)} \quad (\text{V.44})$$

d) Exergie détruite :

L'exergie totale détruite et transformée en production (irréversible) d'entropie peut être évaluée à partir du bilan exergetique du système :

$$T_0 R_s = \dot{W}_u - \Delta Ex \quad (V.45)$$

\dot{W}_u : est l'exergie électrique (utile) fournie au système donnée par [152]:

$$\dot{W}_u = Q_p \Delta P \quad (V.46)$$

$\Delta Ex = \sum_i Ex_i - \sum_k Ex_k$: est la variation d'exergie entre les flux entrants et les flux sortants.

e) Rendement exergetique :

Le rendement exergetique du système est défini comme le rapport de l'ensemble des exergies sortantes sur les exergies entrantes :

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_s}{Ex_e} \quad (V.47)$$

IV.3.3.4 Évaluation du rendement exergetique du système

Dans ce travail, une approche mensuelle est utilisée pour l'évaluation du rendement exergetique de la turbine éolienne et de l'unité de dessalement. Cette approche consiste à évaluer les exergies entrante et sortante du système pour chaque mois de l'année.

a) La turbine éolienne

L'exergie en amont de la turbine est déterminée par l'équation (V.40). En aval de la turbine, l'exergie à la sortie est égale à la puissance électrique développée pour chaque mois, Celle-ci étant évaluée à partir de la courbe de puissance de l'éolienne en utilisant les vitesses moyennes mensuelles (Fig. V.4).

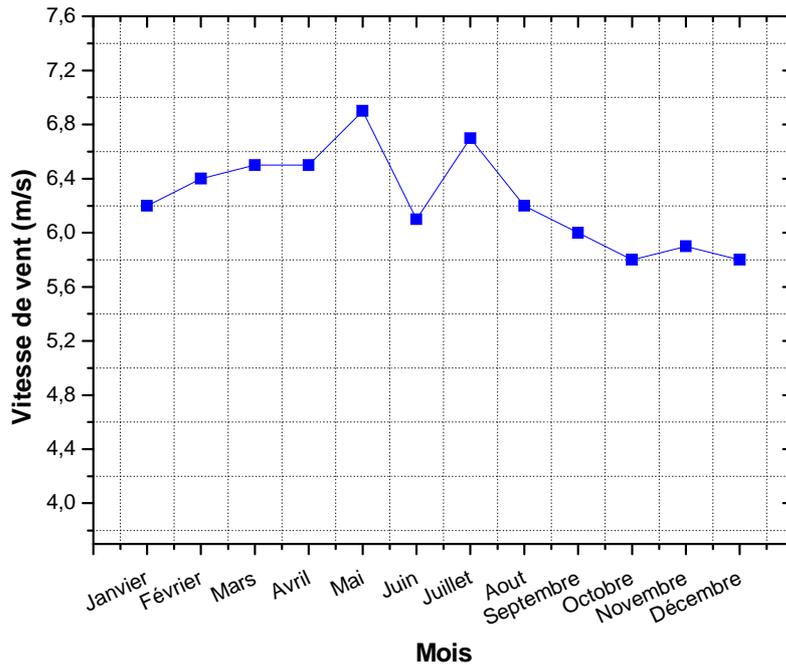


Figure V.4 : Vitesses moyennes mensuelles dans le site d'Adrar (à 10 m a.d.s)

b) L'unité d'osmose inverse :

L'eau saumâtre alimentant l'unité d'OI, à la température $T_0 = 20^\circ\text{C}$ et la pression atmosphérique $P_0 = 101,325 \text{ kPa}$, est dans ce cas l'état de référence du système. Les flux du perméat et de concentrât qui quittent l'unité de dessalement sont à la même température et pression de l'état de référence mais à des concentrations différentes. Par conséquent, les exergies entrantes et sortantes diffèrent uniquement par la différence de concentrations (exergie chimique) mis à part les débits massiques différents.

Bien que les concentrations massiques des composants chimiques constituant le perméat et le concentrât ne soient pas connues, la salinité totale sera partagée sur le sodium (Na^+) et les chlorures (Cl^-) ayant respectivement des masses molaires de 23 et 35,5 g/mol. Ceci est possible puisque la concentration de ces deux éléments est plus importante que celle des autres composants.

V.4 Résultats et discussions

V.4.1 Distribution de la vitesse du vent

Les courbes de densité de probabilité des différents sites obtenues par la loi de distribution de Weibull sont représentées sur la figure V.5. L'intervalle considéré varie de 0 à 18 m/s.

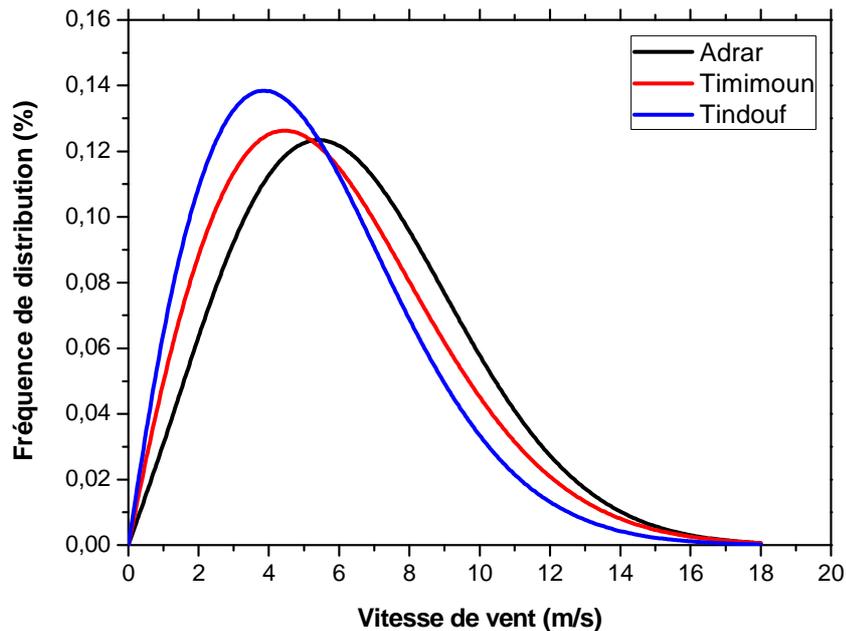


Figure V.5 : Distribution de Weibull des différents sites

Ces courbes diffèrent essentiellement par leurs modes respectifs qui passent de 4 m/s pour Tindouf vers 6 m/s pour Adrar. La courbe représentative de ce dernier site approche la forme gaussienne. De la même manière on peut voir que le régime du vent d'Adrar se prolongent jusqu'à 20 m/s tandis que pour Tindouf le régime n'excède pas 16 m/s. Cette distribution montre que les vitesses moyennes de vent élevées correspondent généralement à des grandes valeurs de facteur de forme (k). Des faibles valeurs de k impliquent que les données tendent à être distribuées sur un large intervalle de vitesse de vent.

V.4.2 Production du système

Le tableau V.4 donne les productions annuelles d'énergie électrique délivrées par la turbine éolienne ainsi que les productions nominales journalières d'eau douce dans les trois sites étudiés. On constate d'après ce tableau que la région d'Adrar avec une production énergétique annuelle de 3329 MWh présente le facteur de capacité maximal.

Les régions de Timimoun et de Tindouf produisent annuellement 2891 et 2453 MWh respectivement. Par conséquent, un facteur de capacité de 38% est obtenu à Adrar suivi par Timimoun et Tindouf (33–28%). Ces quantités d'énergie peuvent produire environ 3720 m³/j à Adrar, 3315,36 m³/j à Timimoun et 2843,52 m³/j à Tindouf.

Tableau V.4 : Productions d'énergie et d'eau douce dans les trois sites

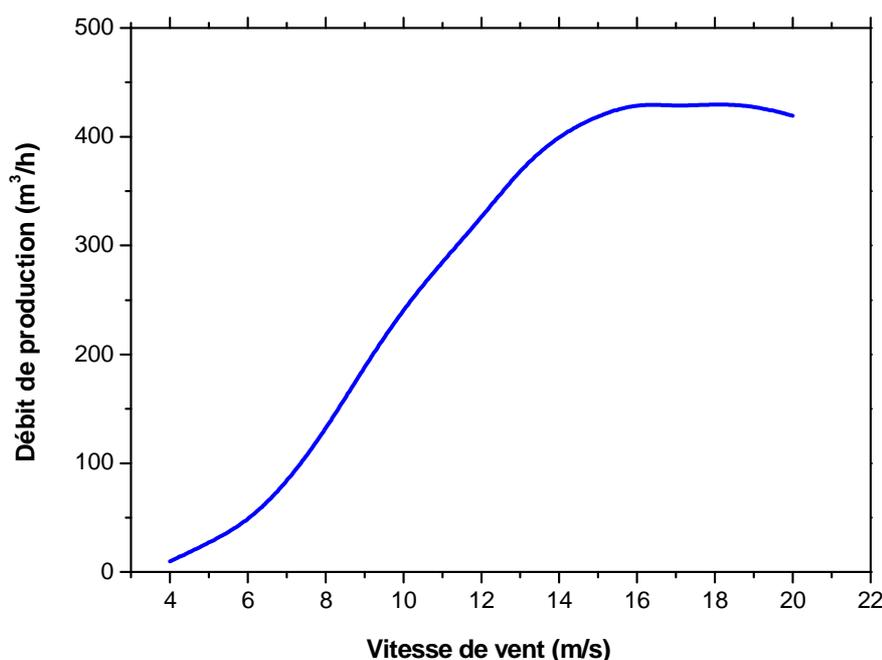
Sites	Production annuelle d'énergie électrique (MWh/an)	Facteur de capacité (%)	Production journalière d'eau douce (m ³ /j)
Adrar	3329	38	3720
Timimoun	2891	33	3315,36
Tindouf	2453	28	2843,52

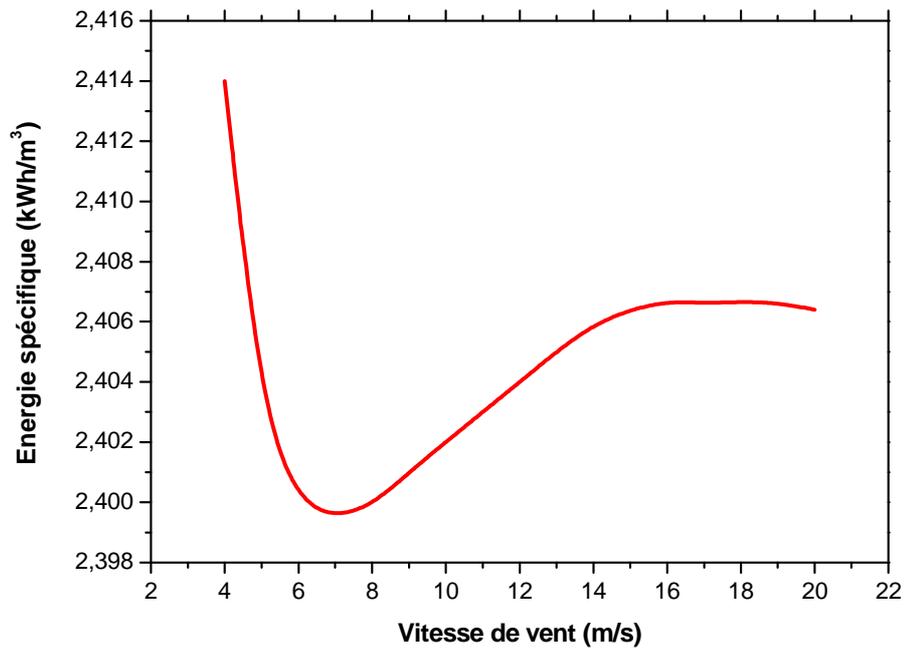
V.4.3 Analyse de sensibilité

V.4.3.1 Vitesse de vent

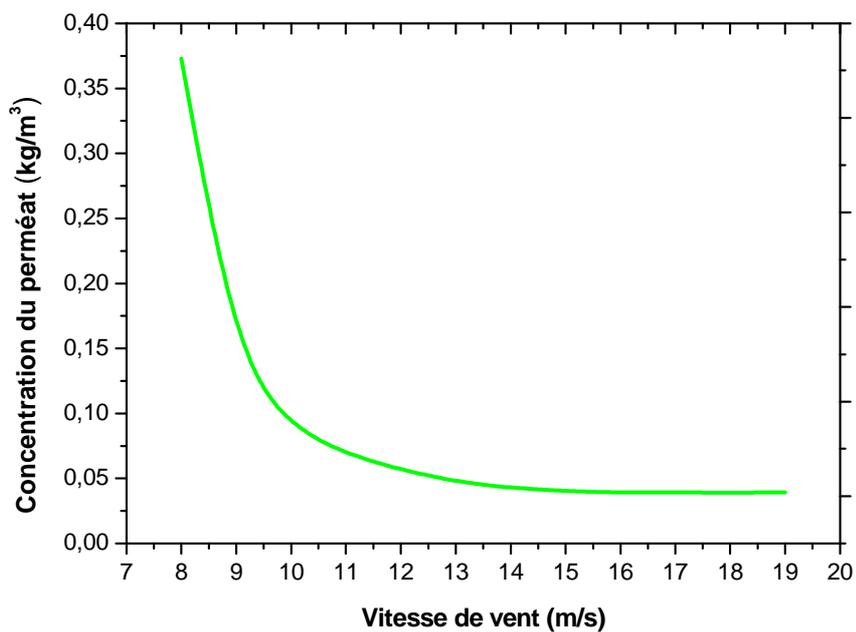
La première analyse porte sur l'établissement de la caractéristique entrée/sortie du système, c'est à dire le rapport entre la vitesse du vent et la production d'eau douce, comme le montre la figure V.6 (a). L'importance de cette caractéristique repose sur le fait qu'elle peut être utilisée dans une étude d'implantation du système. Conformément à la courbe de puissance de l'éolienne, elle donnerait le résultat attendu du système, compte tenu de la ressource dans un certain emplacement.

Une analyse statistique peut être réalisée par l'application de la probabilité de la vitesse du vent (distribution de Weibull) à un site donné pour déterminer la probabilité de production d'eau prévue à cet endroit. Pour la région d'Adrar, on remarque que le débit de production peut dépasser 200 m³/h correspondant à une vitesse de vent de 10 m/s.

**(a) Effet de la vitesse du vent sur le débit de production**



(b) Effet de la vitesse du vent sur l'énergie spécifique



(c) Effet de la vitesse du vent sur la concentration du perméat

Figure V.6 : Effet de la vitesse du vent sur la performance du système.

Conditions de modélisation : $y = 82\%$, $\eta_p = 60\%$, $\eta_{DRE} = 80\%$ (Adrar)

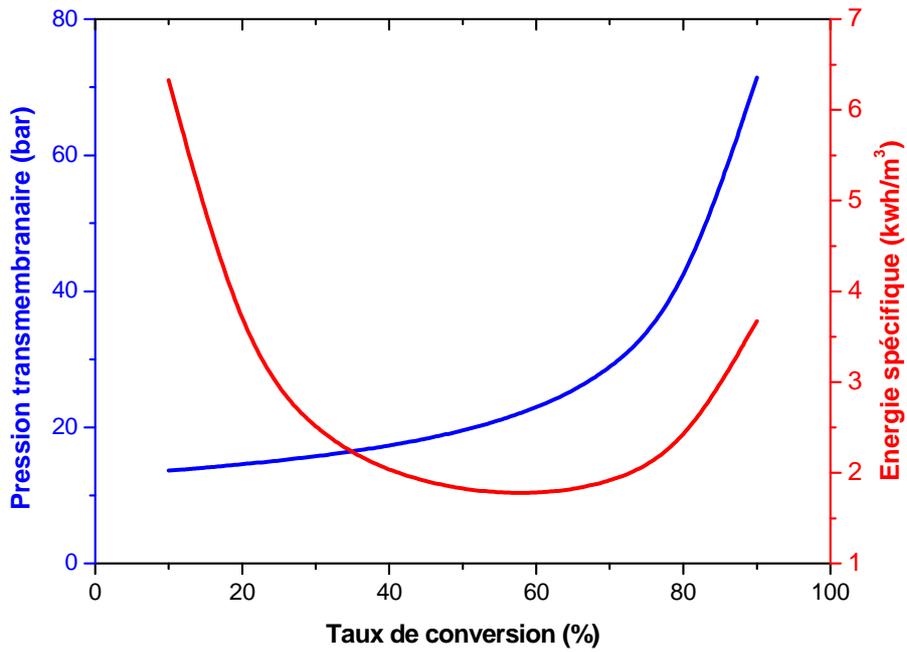
La figure V.6 (b) représente la variation de l'énergie spécifique du système en fonction de la vitesse du vent. On constate que la consommation énergétique présente une valeur globale autour de $2,4 \text{ kWh/m}^3$, étant légèrement supérieure à des faibles vitesses de vent. Néanmoins, elle est presque constante sur toute la plage de fonctionnement. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux obtenus par [93].

L'influence de la vitesse du vent sur la concentration du perméat, calculée pour un débit de production de $150 \text{ m}^3/\text{h}$, est illustrée en figure V.6 (c). Cette figure montre que la concentration en sel diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent due à l'augmentation de la pression de fonctionnement conformément aux équations V.18 et V.19. Cependant, pour des vitesses de vent élevées, la tendance de cette diminution devient relativement faible et demeure approximativement constante. La raison c'est que lorsque la pression motrice est proche de la pression osmotique, la concentration du perméat est élevée et ainsi une augmentation de la pression affecte rapidement la qualité du perméat. Quand la pression devient supérieure à la pression osmotique, la variation de la concentration du perméat devient très faible. Il faut noter que, pour des vitesses de vent inférieures à 8 m/s , la qualité de l'eau produite était insuffisante pour les besoins en eau potable et par conséquent ces vitesses n'ont pas été prises en considération dans l'analyse précédente.

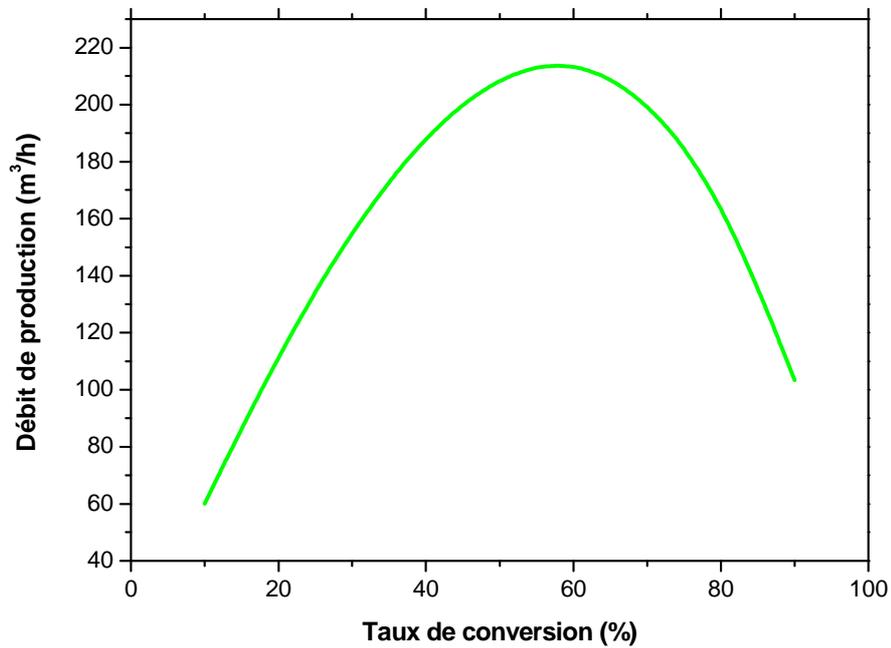
V.4.3.2 Taux de conversion

Dans la figure V.7 (a) les variations de l'énergie spécifique et de la pression transmembranaire sont présentées pour des taux de conversion allant de 10 à 90%. La pression augmente avec l'accroissement du taux de conversion indiquant que des pressions de fonctionnement élevées sont nécessaires pour obtenir des taux de conversion assez élevés.

Cependant, la consommation énergétique spécifique décroît avec l'augmentation du taux de conversion dans l'intervalle de 10 à 60% puis croît avec l'augmentation de ce taux au-delà de 60%. Ceci est dû à la dépendance de la consommation énergétique non seulement de la différence de pression à travers les membranes mais aussi du débit d'alimentation (Eq. V.33). Comme le taux de conversion augmente, la consommation totale d'énergie augmente pour obtenir une pression élevée mais moins d'eau sera pressurisée pour produire la quantité requise d'eau douce à cause des fortes pertes de charge par frottement comme le montre la figure V.7 (b). Par conséquent, l'énergie spécifique qui est la puissance totale divisée par le débit d'alimentation, a une valeur minimale pour un taux de conversion optimal. Dans les conditions de modélisation, la consommation énergétique spécifique minimale obtenue pour la région d'Adrar est de $1,754 \text{ kWh/m}^3$ pour un taux de conversion de 60%.



(a) Effet du taux de conversion sur la pression et l'énergie spécifique



(b) Effet du taux de conversion sur le débit de production

Figure V.7 : Effet du taux de conversion sur la performance du système.
Conditions de modélisation : $C_{p,d} = 260$ mg/L, $\eta_p = 60\%$, $\eta_{DRE} = 80\%$ (Adrar)

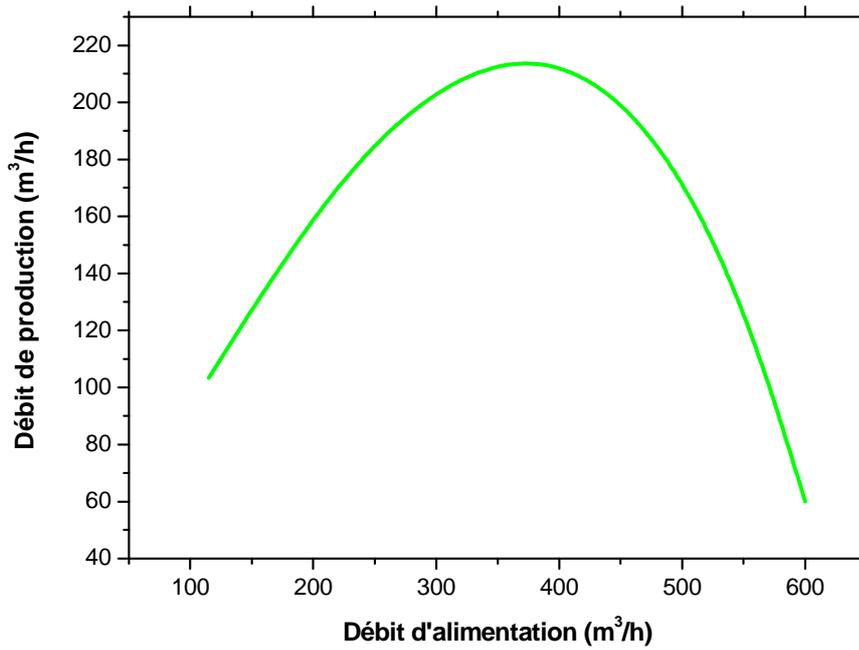
Il faut noter que, pour le dessalement de l'eau de mer par OI, un minimum d'énergie spécifique apparaît à un taux de conversion d'environ 40–50%, tandis que la pression de fonctionnement est de l'ordre de 70 bars, dépendant de la salinité de l'eau d'alimentation [153,154]. La nécessité de ces pressions élevées résulte de l'augmentation de la pression osmotique côté alimentation avec l'augmentation du taux de conversion.

Par ailleurs, une étude théorique qui porte sur l'optimisation de la consommation énergétique des systèmes de dessalement des eaux de mer par OI [155] a relevé qu'un minimum d'énergie spécifique se produit exactement à un taux de conversion égale à 50% en cas de l'absence de DRE et peut être significativement inférieur avec l'utilisation d'un DRE ayant un rendement plus de 50% (40% inférieur pour $\eta_{DRE} = 80\%$ et $\eta_p = 1$). Comme s'est démontré, l'emploi d'un DRE permet de ramener le minimum d'énergie spécifique à des taux de conversion plus bas.

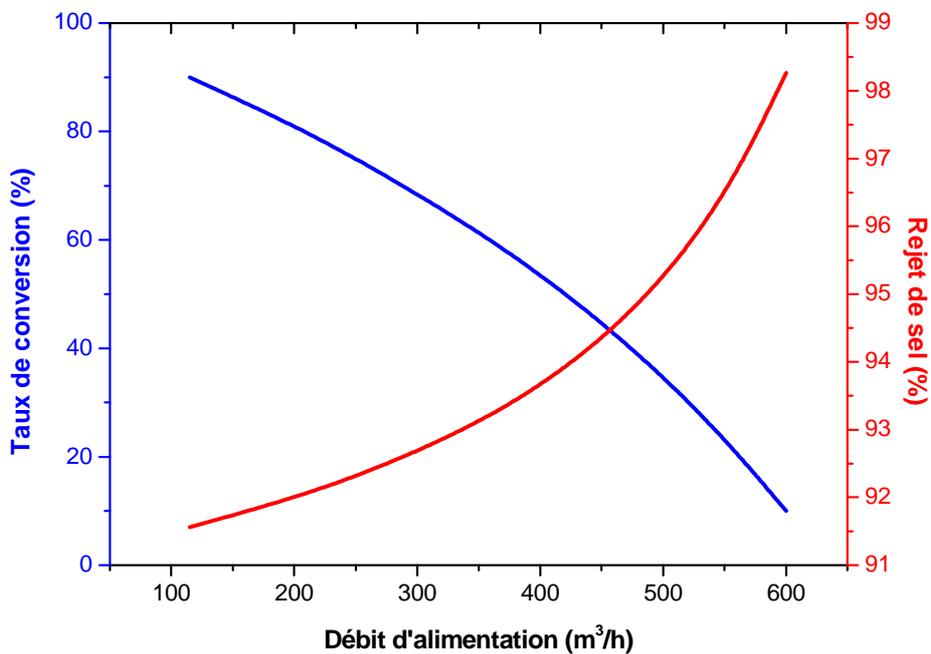
D'après une autre étude expérimentale sur la consommation énergétique des systèmes de dessalement des eaux saumâtres par OI [156], un minimum de consommation d'énergie ne peut nécessairement exister pour le dessalement des eaux saumâtres. Comme s'est expliqué, la concentration de la polarisation à travers la membrane crée une barrière pour la conversion et peut résulter à un minimum de consommation spécifique ; ce phénomène est dominant pour les eaux de mer et non pas pour les eaux saumâtres.

V.4.3.3 Débit d'alimentation

La figure V.8 (a) et (b) montre l'influence du débit d'alimentation sur la performance du système. Comme c'était prévu, l'augmentation du débit d'alimentation entraîne une diminution du taux de conversion mais augmente en même temps le débit de production et le taux de rejet de sel. Par conséquent, on peut dire que des débits d'alimentation importants conduisent à des coefficients de transfert de masse élevés. Cependant, une augmentation du débit d'alimentation au-dessus d'une certaine valeur optimale se traduit par une diminution plutôt qu'une augmentation du débit produit, ce phénomène est imprévisible. La raison pour la faible production c'est que lorsque le débit d'alimentation augmente, la concentration en sel de la saumure côté alimentation de la membrane augmente aussi. Ainsi, des concentrations en sel élevées dans le flux d'alimentation augmentent la pression osmotique réduisant la force motrice nette par effet de la polarisation de concentration et par conséquent diminuant le débit de production conformément à l'équation (V.13). Dans les conditions de modélisation, le débit de production maximal qu'on peut prédire dans la région d'Adrar est de 216,43 m³/h correspondant à un débit d'alimentation de 360,71 m³/h.



(a) Effet du débit d'alimentation sur le débit produit



(b) Effet du débit d'alimentation sur le taux de conversion et le rejet de sel

Figure V.8 : Effet du débit d'alimentation sur la performance du système.

Conditions de modélisation : $C_{p,d} = 260 \text{ mg/L}$, $\eta_p = 60\%$, $\eta_{DRE} = 80\%$ (Adrar)

V.4.3.4 Pression transmembranaire

L'effet de la pression transmembranaire sur le débit d'alimentation est montré en figure V.9 (a). On constate que les pressions de fonctionnement élevées résultent en faibles débits d'alimentation pour une puissance donnée de l'éolienne comme le montre l'équation (V.28). Par ailleurs, l'influence de la pression transmembranaire sur le taux de rejet de sel, qui est illustrée en figure V.9 (b), confirme que le rejet de sel augmente non linéairement avec le flux de perméation et la pression comme le montre l'équation (V.19). Cependant, une étude analytique menée par [157] montre qu'à des pressions de fonctionnement relativement élevées, le taux de rejet de sel diminue suite à l'augmentation rapide de la pression osmotique comme la saumure progresse le long de la conduite d'alimentation. En d'autres termes, lorsque la pression augmente au-dessus d'une certaine valeur critique, une quantité de sel va dissoudre avec l'eau s'écoulant à travers la membrane et le flux d'alimentation devient plus concentré ce qui augmente rapidement la pression osmotique.

V.4.4 Analyse exergétique

V.4.4.1 La turbine éolienne

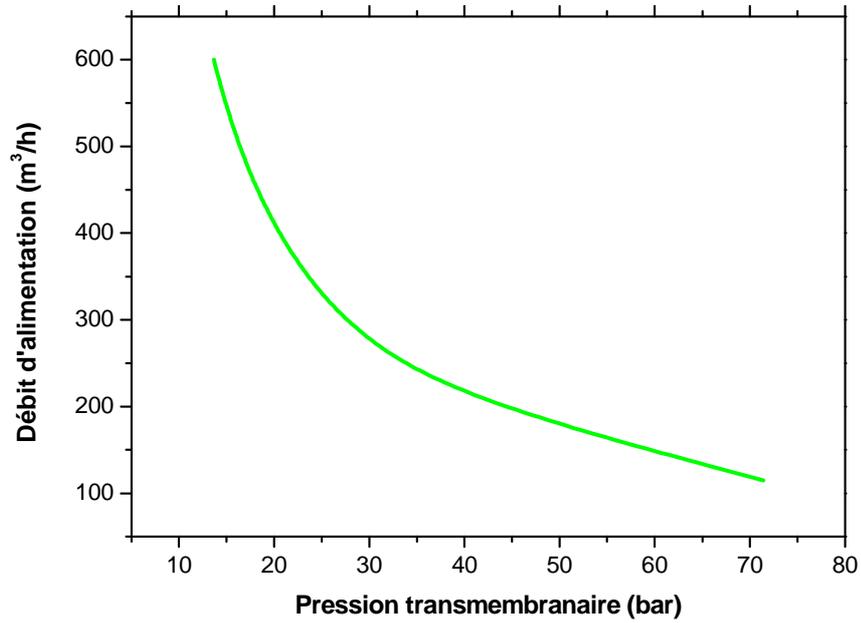
Le tableau IV.5 résume les calculs exergétiques pour la turbine éolienne pour le site d'Adrar. Le rendement exergétique moyen annuel est de l'ordre de 44,40% et il est plus important pour les mois les plus ventés de l'année (mars, avril, mai).

La destruction de l'exergie en fonction du mois est illustrée dans la figure V.10. Cette destruction est due principalement à l'énergie cinétique restante dans le vent en aval de la turbine (limite de Betz), les pertes au niveau du rotor (pertes par frottement air/rotor), les forces de traînée et les pertes au niveau de l'alternateur et des paliers.

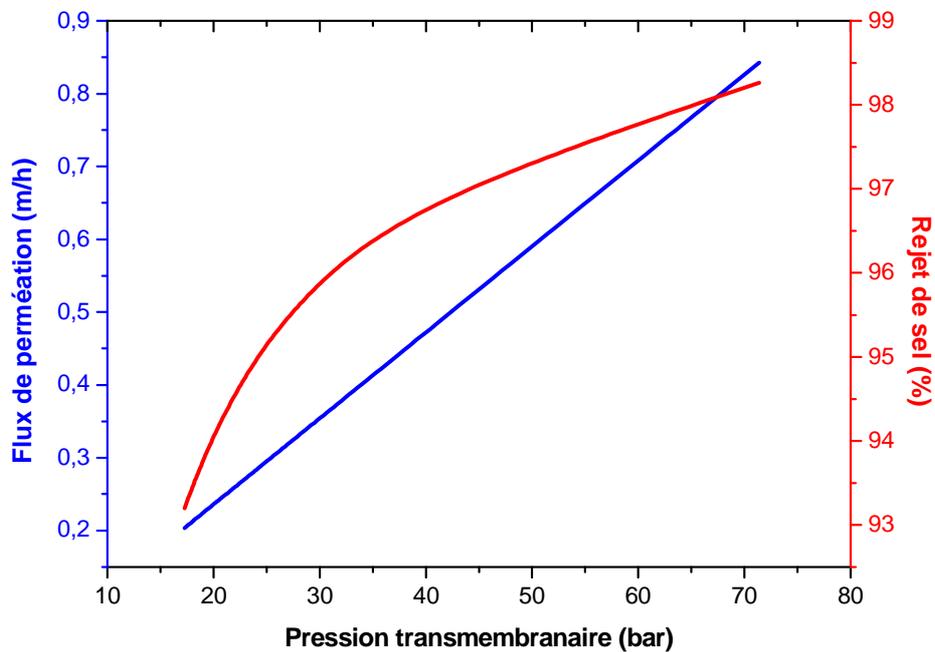
V.4.4.1 L'unité d'osmose inverse

Les calculs exergétiques pour l'unité d'OI sont regroupés dans le tableau V.6. D'après ce tableau, le rendement exergétique moyen annuel semble très faible (8,63%). Cependant, la valeur de ce rendement est plus importante que celle obtenue dans la littérature par [158,159]. Ceci est dû à l'introduction de l'échangeur de pression dans le système, ce qui confirme les grandes opportunités de récupérer l'énergie du concentrât pour améliorer les performances thermodynamiques de l'unité du dessalement par la réduction de l'énergie électrique fournie.

La destruction de l'énergie en fonction du mois est illustrée dans la figure V.11. Cette destruction est due principalement aux chutes de pression dans les modules membranaires, les vannes de régulations et les conduites d'écoulement de la saumure.



(a) Effet de la pression transmembranaire sur le débit d'alimentation



(b) Effet de la pression transmembranaire sur le flux de perméation et le rejet de sel

Figure V.9 : Effet de la pression transmembranaire sur la performance du système.

Conditions de modélisation : $C_{p,d} = 260 \text{ mg/L}$, $\eta_p = 60\%$, $\eta_{DRE} = 80\%$ (Adrar)

Tableau V.5 : Bilan exergetique sur l'éolienne (Adrar)

Mois	V (m/s)	Ex_e (kW)	Ex_s (kW)	ΔEx (kW)	η_{ex} (%)
Janvier	7,60	615,71	267,20	348,51	43,4
Février	8,34	813,65	361,60	452,05	44,4
Mars	8,55	876,67	391,00	485,67	44,6
Avril	8,44	843,27	375,60	467,67	44,5
Mai	8,65	907,80	405,00	502,80	44,6
Juin	8,24	784,73	347,60	437,13	44,3
Juillet	8,34	813,65	361,60	452,05	44,4
Aout	8,13	753,72	332,20	421,52	44,1
Septembre	8,13	753,72	332,20	421,52	44,1
Octobre	7,70	640,34	278,90	361,44	43,5
Novembre	7,50	591,73	254,33	337,40	43,0
Décembre	7,50	591,73	254,33	337,40	43,0

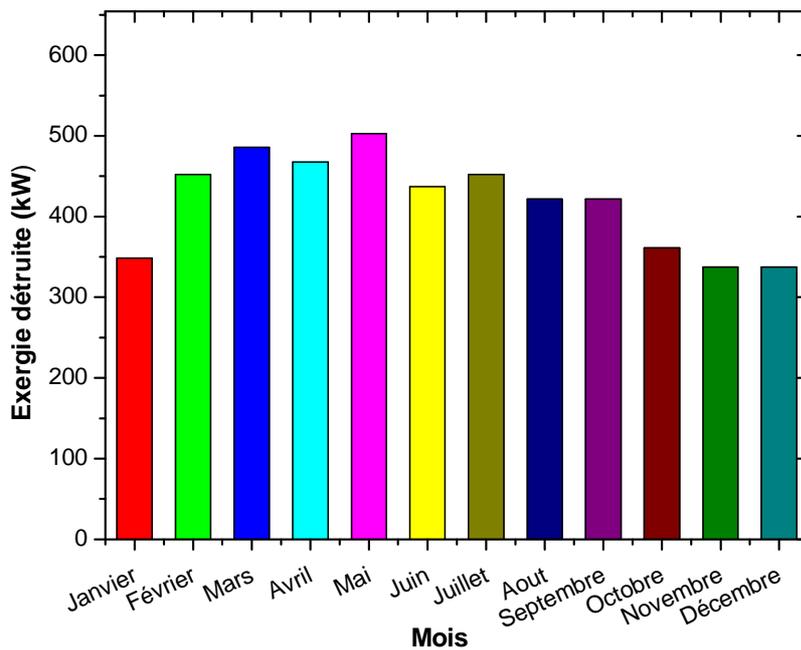


Figure V.10 : Destruction de l'exergie pour la turbine éolienne en fonction des mois (Adrar)

Tableau V.6 : Bilan exergetique sur l'unité de dessalement (Adrar)

Mois	V (m/s)	W_u (kW)	Ex_e (kW)	Ex_s (kW)	ΔEx (kW)	$R.T_0$ (kW)	η_{ex} (%)
Janvier	7,60	121,600	7,423	3,710	3,713	117,887	8,631
Février	8,34	204,117	12,4560	6,227	6,229	197,888	8,627
Mars	8,55	220,690	13,472	6,733	6,739	213,951	8,631
Avril	8,44	212,009	12,942	6,468	6,474	205,535	8,631
Mai	8,65	228,583	13,953	6,974	6,979	221,604	8,630
Juin	8,24	196,224	11,978	5,986	5,992	190,232	8,631
Juillet	8,34	204,117	12,460	6,227	6,233	197,884	8,631
Aout	8,13	187,543	11,448	5,722	5,726	181,817	8,630
Septembre	8,13	187,543	11,448	5,722	5,726	181,817	8,630
Octobre	7,70	135,520	8,272	4,134	4,138	131,382	8,630
Novembre	7,50	107,678	6,573	3,285	3,288	104,390	8,631
Décembre	7,50	107,678	6,573	3,285	3,288	104,390	8,631

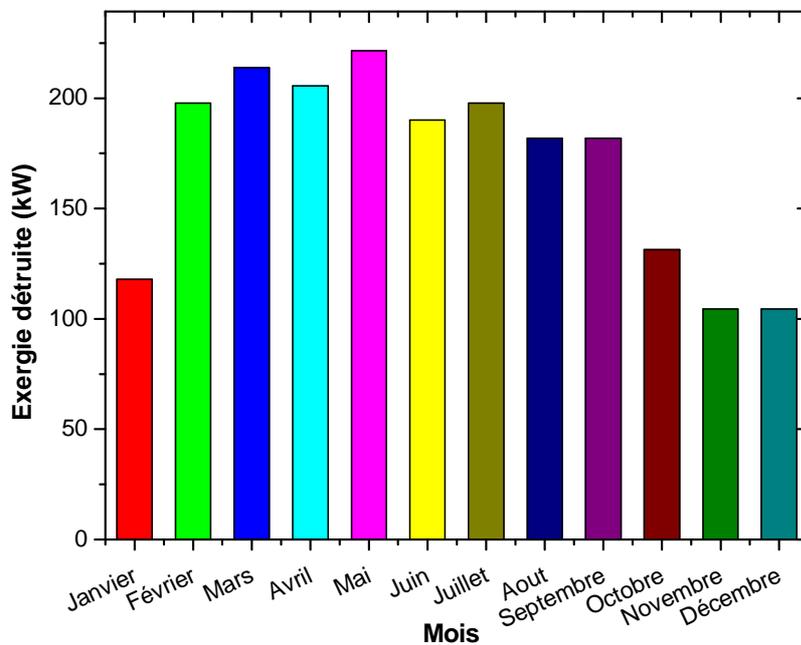


Figure V.11 : Destruction de l'exergie pour l'unité de dessalement en fonction des mois (Adrar)

CHAPITRE VI
ANALYSE ÉCONOMIQUE ET
ENVIRONNEMENTALE

CHAPITRE VI

ANALYSE ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, les intérêts économiques et environnementaux du système proposé sont analysés. Le logiciel HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) est utilisé pour la simulation et l'optimisation de la configuration choisie sur la base des critères de minimisation du coût global du système tant d'un point de vue de l'installation que de l'utilisation. Une étude de sensibilité est ainsi effectuée pour étudier l'influence de plusieurs paramètres sur les résultats de simulation. À l'aide du même logiciel, l'impact environnemental du système est évalué en termes d'émission de polluants. La région d'Adrar est considérée pour la présente analyse.

VI.2 Présentation de HOMER

VI.2.1 Introduction

HOMER est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie autonomes ou connectés au réseau. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elles soient renouvelable ou fossile.

La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory), il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. La version utilisée pour le présent travail est HOMER 2.68 beta sortie en juillet 2009. Ce logiciel est largement utilisé dans plus de 190 pays et par plus de 40000 utilisateurs [160].

VI.2.2 Principales caractéristiques

Tout d'abord, ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. En figure VI.1, est montré le modèle conceptuel de HOMER.

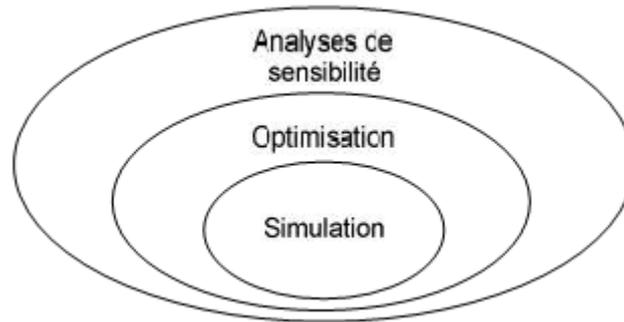


Figure VI.1 : Modèle conceptuel de HOMER

Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation.

Le logiciel permet de faire des simulations avec différents systèmes de production d'énergie :

- panneaux solaires PV,
- éoliennes,
- barrage hydroélectrique au fil de l'eau,
- biomasse,
- génératrices (diesel, essence, biogaz, combustibles alternatifs et combustibles personnalisés, co-alimentée),
- réseau électrique,
- microturbines,
- piles à combustible.

HOMER offre aussi une vaste gamme de dispositifs d'accumulation ou de récupération d'énergie :

- banque de batteries,
- volants d'inertie (flywheels),
- flow batteries,
- hydrogène.

On peut aussi entrer divers types de besoins énergétiques :

- profils de consommation journaliers avec des variations selon les saisons,
- charge différée pour le pompage d'eau ou pour la réfrigération,
- charge thermique,
- mesures d'efficacité énergétique.

HOMER peut donc simuler un large éventail de systèmes différents en plus de toutes les combinaisons possibles de systèmes hybrides.

VI.3 Présentation de la configuration choisie

Dans les régions éloignées, les systèmes de conversion éoliens peuvent être couplés à des groupes électrogènes, de manière à constituer des systèmes hybrides de production de l'électricité (éolien/diesel) [161]. Les travaux s'intéressent aux installations avec l'ajout de SER, dans le but de réduire les coûts d'opération et d'améliorer le rendement. Le tableau VI.1 illustre une comparaison des systèmes de production d'énergie utilisés dans un site isolé. Les systèmes utilisés sont constitués : d'un groupe électrogène seul, d'un système éolien/diesel ou d'un système éolien/diesel/batteries. Les résultats des travaux ont montré de meilleures performances fonctionnelles et économiques avec un système éolien/diesel/batteries. Dans cette configuration, les batteries ont la priorité par rapport au groupe électrogène pour satisfaire la demande. Quand les batteries sont déchargées, c'est le groupe électrogène qui prend la relève pour satisfaire la demande, et charger les batteries en même temps. De cette façon, le groupe électrogène peut être opéré à un niveau de charge qui résulte en une efficacité plus élevée que dans un système sans batteries : les pertes dans les batteries sont compensées par le gain dû à l'opération du groupe électrogène à un niveau de charge qui permet d'obtenir un meilleur rendement du moteur diesel.

À travers cette analyse, la troisième configuration est choisie pour la simulation. Le système étudié regroupe la turbine éolienne, un groupe électrogène, des batteries d'accumulation ainsi que le convertisseur de courant bidirectionnel (onduleur/redresseur).

Tableau VI.1 : Comparaison des résultats sur l'intégration de l'énergie éolienne dans un site isolé [161]

Paramètre	Type de système		
	Groupe électrogène seul	Éolienne – groupe électrogène	Éolienne – groupe électrogène – batteries
Rendement électrique du groupe électrogène (%)	86,45	83,5	89,0
kWh/L de carburant	3,19	3,03	3,32
Consommation totale de carburant (L)	412,23	171,48	153,16

En vue de la nature de la charge (moteur triphasé), les éléments constituant le système sont reliés entre eux par l'intermédiaire d'un bus AC. L'architecture de la configuration étudiée est présentée dans la figure VI.2.

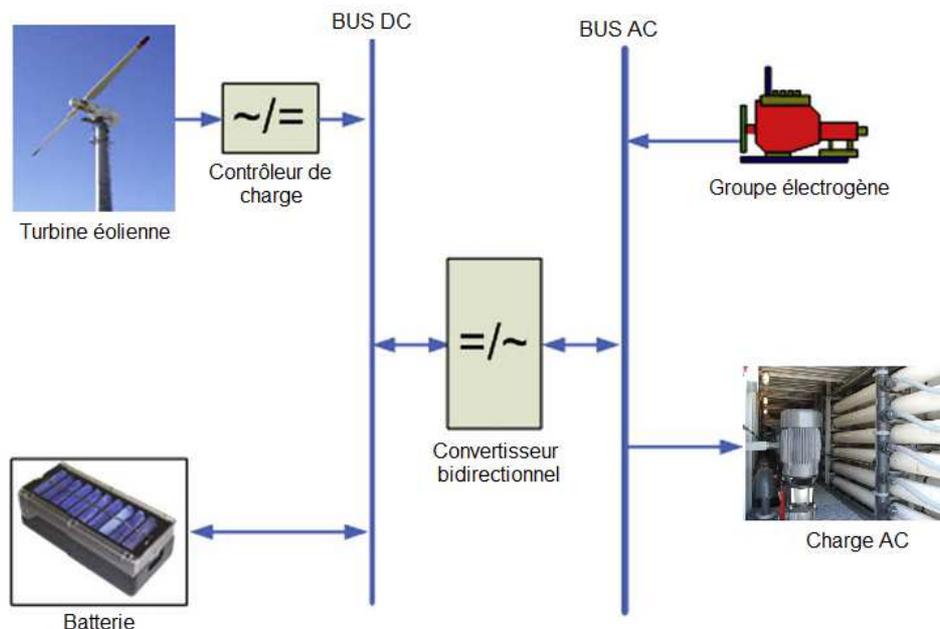


Figure VI.2 : Architecture du système hybride

VI.4 Méthodologie spécifique à la simulation

La démarche générale pour la simulation est résumée dans les étapes suivantes :

- évaluation de la demande énergétique (consommation d'énergie);
- identification des équipements nécessaires pour le système (turbine éolienne, générateur diesel, convertisseurs, batteries) dans le logiciel HOMER;
- introduction des données nécessaires dans le logiciel (gisement éolien pour le lieu désiré; prix du combustible ; données économiques) ;

- lancement du calcul dans HOMER;
- optimisation des résultats de HOMER de façon itérative pour arriver à la solution optimale pour le système étudié;
- réalisation des analyses de sensibilité

VI.4.1 Évaluation de la demande énergétique

La demande en énergie électrique de l'unité d'OI est celle nécessaire pour l'entraînement de la pompe HP. Cette charge est évaluée en fonction de la puissance éolienne disponible et donc de la vitesse instantanée du vent. Pour la région d'Adrar, la puissance moyenne annuelle délivrée par la turbine éolienne obtenue est de 3329 MWh/année soit 9120 kWh/jour. Par ailleurs, la distribution horaire journalière est déterminée à partir de la vitesse horaire du vent extrapolée en utilisant la loi de puissance développée par Justus et Mikhaeil. La puissance instantanée est ensuite estimée par interpolation des valeurs des données fournies par le constructeur de l'éolienne (courbe caractéristique).

L'évolution des moyennes annuelles de la vitesse du vent tri-horaire du site d'Adrar est représentée en figure VI.3 [162] et la distribution horaire journalière de la charge est illustrée dans la figure VI.4. Il s'agit d'une charge avec une moyenne journalière de 9120 kWh/jour et un pic de puissance instantanée de 598 kW.

VI.4.2 Identification des équipements

Sur l'environnement HOMER, il faut définir les détails de chaque élément décrivant le système étudié (options technologiques, les coûts, la taille et le nombre).

VI.4.2.1 La turbine éolienne

L'éolienne choisie est de marque AEER A1000s [138]. C'est une turbine à axe horizontale à trois pales (tripales) commandées (Fig.VI.5) qui a été spécialement développée pour une exploitation efficace du vent dans des terrains complexes. Ce type d'éolienne dispose d'une construction de boîte à vitesses robuste qui intègre l'arbre et le palier (1) permettant une plus grande fiabilité ; une génératrice à pôles commutables puissante avec un système de refroidissement par eau (2) et un mât fendu pour un ajustement simple et précis des pales assurant un rendement optimal (3). Les données et caractéristiques de l'éolienne, ont été déjà fournies dans le chapitre précédent (courbe de puissance, hauteur du mât, durée de vie). Le coût d'investissement de l'éolienne est estimé à 1900 \$/kW avec un coût de remplacement de 85%. Le coût annuel O&M est fixé à 2,5% de l'investissement [163].

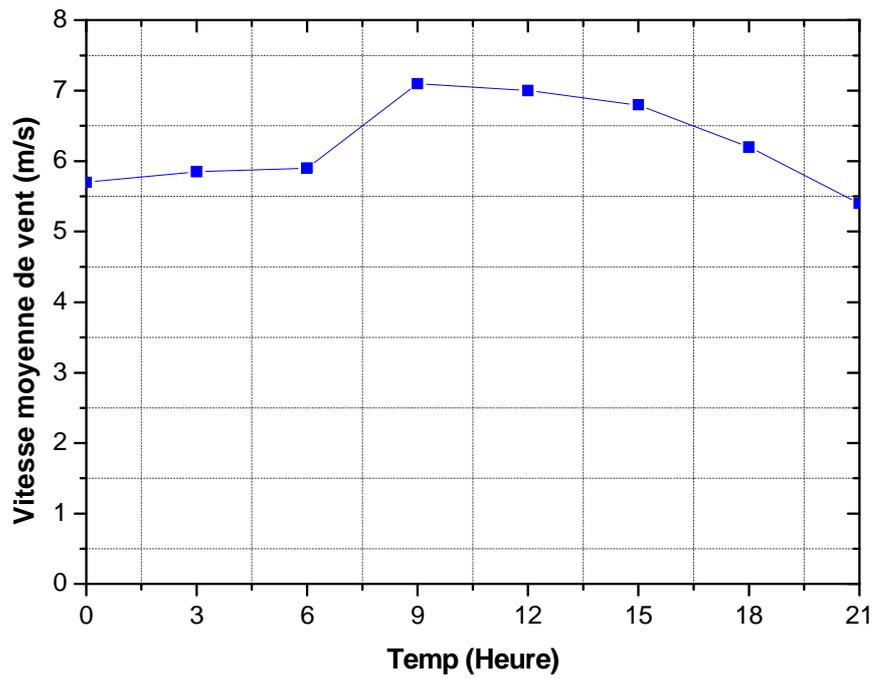


Figure VI.3 : Évolution de la vitesse moyenne horaire du vent pour le site d'Adrar (à 10 m du sol)

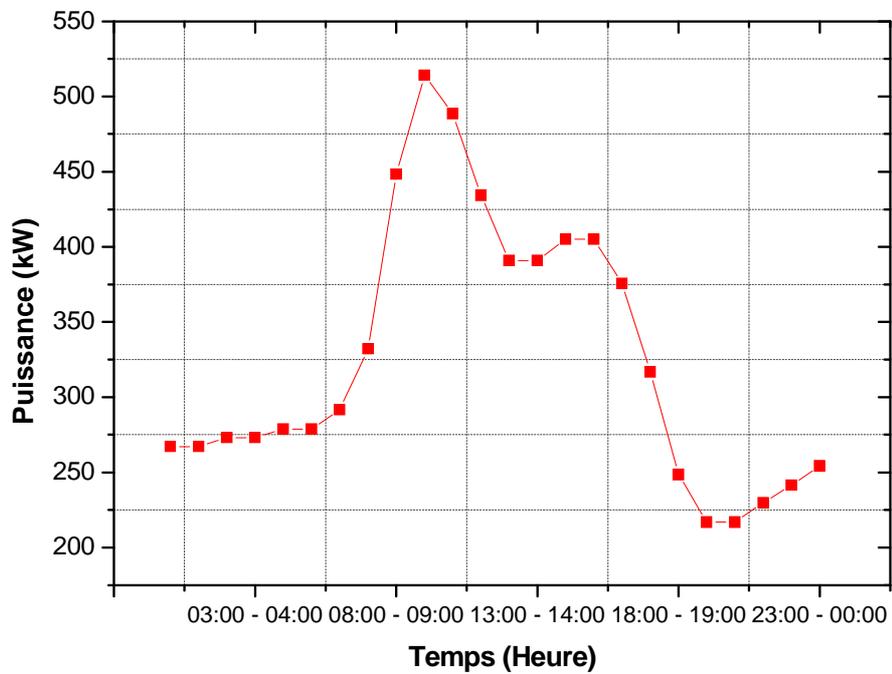


Figure VI.4 : Répartition journalière de la charge

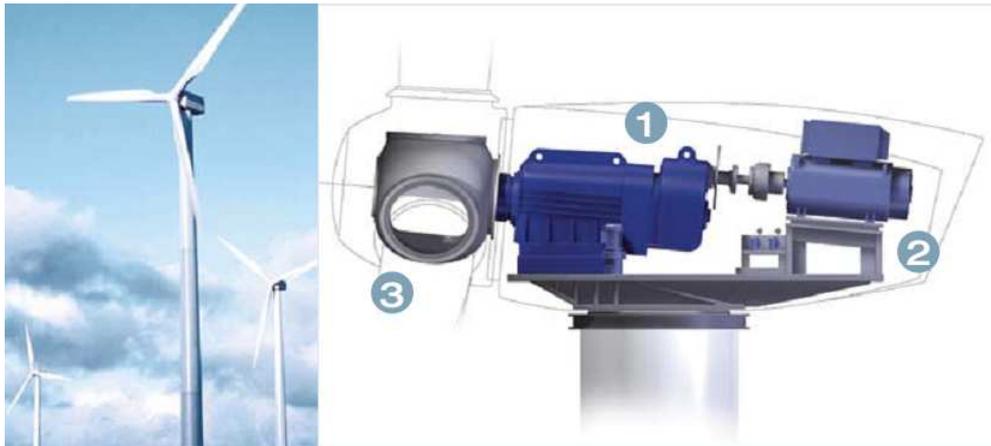


Figure VI.5 : Schéma de la turbine éolienne [138]

VI.4.2.2 Le groupe électrogène

Le groupe électrogène est appelé à fonctionner à n'importe quel moment de la journée et d'une manière optimisée, c'est-à-dire une possibilité de fonctionnement à pleine charge comme à charge partielle et selon les besoins du site. La mise en marche (ou à l'arrêt) est donc fonction de la demande et de l'état de charge des batteries. Le groupe électrogène classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (Fig.VI.6) [164]. La fréquence AC à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse sur le moteur diesel. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré. Les réseaux AC avec diesel, tout comme ceux interconnectés, fournissent pour leurs charges deux formes d'énergie : active et réactive.

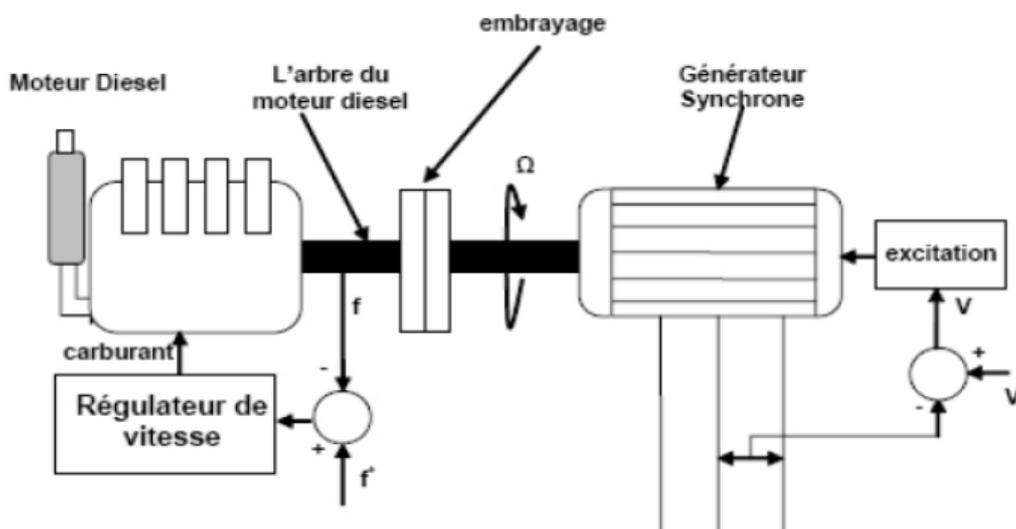


Figure VI.6 : Configuration d'un groupe électrogène [164]

Pour dimensionner le groupe électrogène qui convient au système étudié (charge réactive), il convient de multiplier la puissance instantanée maximale par un coefficient de sécurité (généralement 1,2) afin de tenir compte des puissances de démarrage de la charge [160]. La durée de vie du groupe électrogène est supposée être 15000 heures de fonctionnement. Le coût d'investissement du groupe est estimé à 875 \$/kW avec un coût de remplacement de 750 \$/kW et un coût horaire O&M de 0,25 \$/h.

VI.4.2.3 Le système de stockage (batteries)

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un site isolé car il offre une gestion plus efficace pour les ressources éoliennes disponibles et permet également de les utiliser au mieux en évitant un délestage en cas de surproduction [165].

En effet, il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les deux générateurs (turbine éolienne et groupe électrogène). Cependant l'utilisation d'un système de stockage permet de minimiser le fonctionnement du groupe électrogène et par la suite les émissions des gaz à effet de serre. L'excès de production par les deux générateurs est donc stocké dans le système de stockage. 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.

Les batteries utilisées dans cette analyse sont du type Surrette 4KS25P (Fig.VI.7) avec une capacité nominale de 1900 Ah (7,6 kWh) et une tension de 4V. Le coût d'investissement de la batterie est estimé à 1100 \$ et le coût annuel O&M est fixé à 10 \$ [163].



Figure VI.7 : Batterie Surrette 4KS25P

Bien que la tension nominale du système soit 380 V, ce dernier sera donc composé de 95 chaînes de batteries en parallèles. Le nombre de batteries nécessaires est déterminé à partir de la consommation énergétique du système et du nombre de jours d'autonomie des batteries. La capacité utile des batteries peut être évaluée par la relation suivante :

$$C_u = N_{ja} E_{elec} \quad (VI.1)$$

Avec :

C_u : la capacité utile [Wh]

N_{ja} : est le nombre de jours d'autonomie nécessaires [jours]

E_{elec} : est la consommation énergétique [Wh/j]

Le nombre de jours d'autonomie, N_{ja} , est déterminé par l'équation suivante [160]:

$$\begin{aligned} N_1 &\leq N_{ja} \leq 1,25 N_2 \\ \text{Si } N_1 &\approx N_2 \quad N_{ja} = N_1 \\ \text{Si } N_1 &\leq N_2 \quad N_{ja} = 1,25 N_2 \end{aligned} \quad (VI.2)$$

Avec :

N_1 : nombre de jours consécutifs maximal sans vent productif [jours]

N_2 : nombre de jours consécutifs de vent entre le vent productif et le vent nominal [jours]

VI.4.2.4 Le convertisseur (bidirectionnel)

Le convertisseur considéré est bidirectionnel (Fig.VI.6), il est constitué de deux parties : partie onduleur (entrée AC, sortie DC) et la partie redresseur (entrée DC, sortie AC).



Figure VI.8 : Convertisseur bidirectionnel

Pour dimensionner l'onduleur/redresseur, il suffit de multiplier la puissance instantanée maximale par un coefficient de 1,25 [160].

Le convertisseur bidirectionnel utilisé dans cette analyse a un rendement de 90% et une durée de vie de 15 ans. Le coût d'investissement est estimé à 730 \$/kW et le coût O&M est évalué à 1% de l'investissement par année [163].

VI.4.3 Introduction des données

VI.4.3.1 Potentiel éolien

Les vitesses moyennes mensuelles ainsi que les paramètres de distribution de Weibull pour le site d'Adrar ont été déjà fournies dans le chapitre précédent. Les représentations horaires de la vitesse moyenne pour chaque mois sont données en annexe (B).

VI.4.3.2 Prix du combustible

Le combustible à utiliser pour le groupe électrogène est le fuel (moteur diesel). Les propriétés de ce combustible sont résumées dans le tableau VI.2.

Tableau VI.2 : Caractéristiques du combustible

Propriété	Valeur	Unité
Prix	0,2	(\$/L)
PCI	43,2	(MJ/kg)
Masse volumique	820	(kg/m ³)
Pourcentage carbone	88	(%)
Pourcentage Soufre	0,33	(%)

VI.4.3.3 Données économiques

La simulation est effectuée avec un taux d'intérêt annuel de 8% et une durée de vie du projet de 25 ans. L'inflation est négligée et le terrain est offert par l'état.

VI.4.4 Simulation et choix de la configuration optimale

VI.4.4.1 Analyse économique

L'analyse économique sur l'environnement HOMER permet d'obtenir la configuration optimale du système étudié sur le domaine qui offre des valeurs économiques comparables : le coût d'investissement, le coût d'opération, le coût net actualisé et le coût spécifique de l'énergie électrique. La simulation du système a fait ressortir deux configurations possibles dont les détails sont donnés dans le tableau VI.3.

Tableau VI.3 : Détails des résultats d'optimisation

Paramètre	Première solution	Deuxième solution
Coût net actualisé (\$)	8826915	18909120
Coût d'investissement (\$)	4267225	2439700
Coût d'opération (\$/an)	427146	1542835
Coût spécifique de l'énergie (\$/kWh)	0,248	0,532
Coût du fuel consommé (\$/L)	50420	158436
Consommation annuelle du fuel (L/an)	252099	792178
Fraction de l'énergie renouvelable (%)	84	69
Excès d'énergie électrique (%)	18,9	40,5
Rendement électrique moyen du groupe électrogène (%)	29	22,1

La configuration optimale, classée en premier, est celle dont tous les composants fonctionnent simultanément. En comparaison avec la deuxième solution qui utilise uniquement la turbine éolienne et le groupe électrogène, la configuration optimale dont le coût d'investissement le plus élevé avec une valeur de 4267225 \$ présente un coût d'opération nettement plus inférieur de l'ordre de 427146 \$/an. Ceci est dû principalement à la baisse de la consommation du combustible fuel d'environ 540000 L.

Le coût d'investissement élevé de la turbine éolienne et des batteries est compensé donc par le faible coût d'opération. Par ailleurs, il est intéressant de mentionner que le coût du kWh produit par la configuration optimale évalué à 0,248 \$/kWh est plus économique que celui du système conventionnel (réseau électrique) si le prix du kWh produit par ce dernier est fixé à 0,4 \$/kWh [166].

VI.4.4.2 Configuration optimale

La configuration optimale regroupe la turbine éolienne, le groupe électrogène avec une capacité de 616,8 kW, 1235 batteries (13 chaînes en parallèles) et le convertisseur bidirectionnel avec une puissance de 642,5 kW. Les détails techniques et économiques de cette configuration sont les suivants :

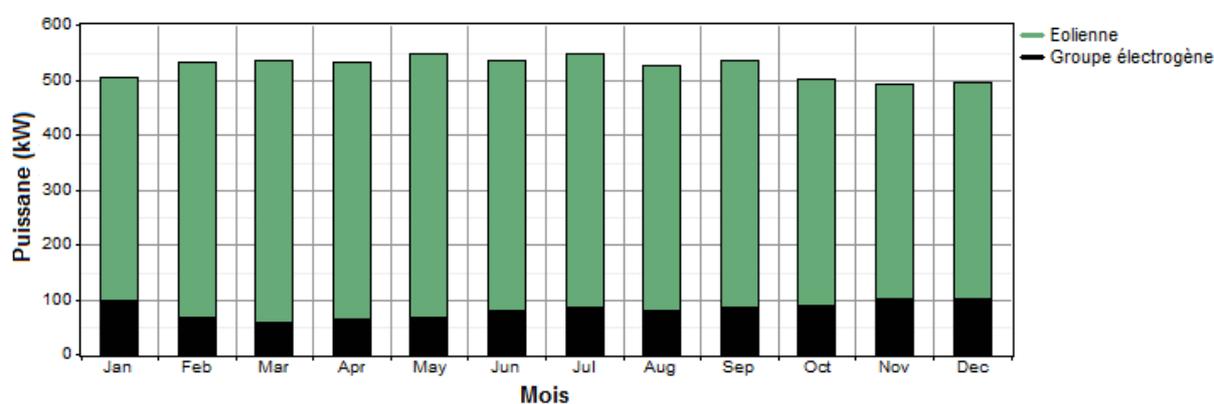
a) Production d'énergie électrique

La production annuelle d'énergie est montrée dans le tableau VI.4. On remarque d'après ce tableau que 84% de l'énergie produite est fournie par la turbine éolienne, le reste étant assuré par la source d'énergie conventionnelle (fuel).

Tableau VI.4 : Énergie annuelle produite

Composant	Production (kWh/an)	Fraction (%)
Turbine éolienne	3870079	84
Groupe électrogène	718251	16
Total	4588331	100

La figure VI.9 donne la puissance moyenne annuelle délivrée pour chaque générateur ainsi que la puissance totale fournie pour chaque mois. On constate que les énergies mises en jeu dans le système présentent un caractère continu de disponibilité de l'énergie produite durant toute l'année ce qui très satisfaisant pour l'atténuation de la part louée au stockage.

**Figure VI.9 : Production moyenne mensuelle de l'énergie électrique****a) Turbine éolienne**

Les paramètres de fonctionnement de la turbine éolienne sont résumés dans le tableau VI.5. Comme c'est montré, l'éolienne fonctionne pratiquement durant toute l'année avec un taux de pénétration élevé de 116%. La distribution des puissances journalières moyenne pour chaque mois est donnée en annexe (C).

Tableau VI.5 : Paramètres de fonctionnement de l'éolienne

Paramètre	Valeur	Unité
Puissance moyenne délivrée	442	kW
Puissance maximale délivrée	1011	kW
Taux de pénétration du vent	116	%
Durée de fonctionnement	8007	hr/yr
Coût spécifique de l'énergie	0,0583	\$/kWh

a) Groupe électrogène

Les paramètres de fonctionnement du groupe électrogène sont regroupés dans le tableau VI.6. La durée de fonctionnement du groupe est faible (environ 1/6 de l'année) avec un rendement électrique moyen de 29%. Les puissances journalières moyennes délivrées pour chaque mois sont données en annexe (D).

Tableau VI.6 : Paramètres de fonctionnement du groupe électrogène

Paramètre	Valeur	Unité
Durée de fonctionnement	1470	hr/an
Rendement électrique moyen	29	%
Nombre de démarrages	132	démarrages/an
Durée de vie opérationnelle	10,2	An
Facteur de puissance (état de charge moyen annuel)	13,3	%
Puissance moyenne délivrée	489	kW
Puissance maximale délivrée	617	kW
Coût spécifique de l'énergie	0,05	\$/kWh
Consommation de combustible	252099	L/an
Consommation spécifique du combustible	0,351	L/kWh

a) Batteries

Les paramètres de fonctionnement des batteries sont récapitulés dans le tableau V.6. L'état de charge mensuelle des batteries est illustré dans la figure V.10 et le profil de distribution journalière moyenne de la charge est donné en annexe (E).

Par ailleurs, on notera l'importance de la réduction de la période d'intervention des batteries qui est devenue restreinte seulement aux mois où le potentiel éolien est fort. En effet, l'énergie électrique produite par les batteries serait plus importante si le système fonctionnait avec une seule source.

Tableau VI.7 : Paramètres de fonctionnement des batteries

Paramètre	Valeur	Unité
Capacité nominale	9386	kWh
Capacité nominale utilisable	5632	kWh
Autonomie	14,8	Hr
Coût spécifique moyen	0,018	\$/kWh
Energie d'entrée	1006196	kWh/an
Energie de sortie	807440	kWh/an
Durée de vie prévue	12,0	année

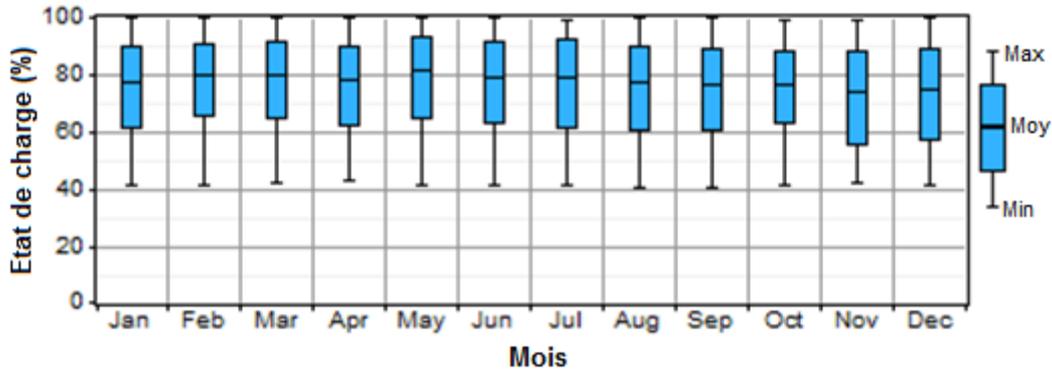


Figure V.10 : État de charge mensuelle des batteries

b) Convertisseur bidirectionnel

Le fonctionnement de la partie onduleur du convertisseur bidirectionnel est lié à la demande sur l'énergie stockée ; l'étude de son fonctionnement permet de prévoir les périodes de décharge des batteries. Le fonctionnement de la partie redresseur est lié à l'état de charge des batteries ; l'analyse de son fonctionnement est très importante car il permet de prévoir les périodes de recharge des batteries ainsi que les générateurs utilisés pour cette opération.

Les paramètres de fonctionnement de chaque partie du convertisseur sont donnés dans le tableau V.8. À partir de ce tableau, on constate que tous les paramètres de fonctionnement du redresseur sont légèrement supérieurs à ceux de l'onduleur car le redresseur fournit l'énergie nécessaire pour la recharge des batteries plus les pertes au niveau de ces dernières et au niveau de l'onduleur.

La distribution journalière moyenne de la puissance délivrée par l'onduleur pour chaque mois est donnée en annexe (F) et celle fournie par le redresseur en annexe (G).

c) Répartition des coûts du système

Le tableau VI.9 regroupe les coûts de chaque élément du système. D'après ces résultats, le coût total estimé du système est de 8826913 \$. Durant la durée de vie du projet, la turbine éolienne ne sera pas remplacée, le groupe électrogène sera remplacé trois fois avec une récupération en dernière année de 37151 \$. Pour les batteries, il ya deux remplacement avec une récupération de 165304 \$ et un seul pour le convertisseur avec une récupération de 22829 \$.

Par ailleurs, la répartition des coûts est montrée en figure VI.11. On remarque que le groupe électrogène présente le coût net actualisé le plus élevé et ceci est dû au prix élevé du combustible et aux coûts O&M.

Tableau VI.8 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur

Paramètre	Onduleur	Redresseur	Unité
Puissance moyenne fournie	83	115	kW
Puissance maximale fournie	568	333	kW
Facteur de puissance	12,9	17,9	%
Durée de fonctionnement	3176	5584	hrs/an
Energie d'entrée	807440	1118010	kWh/yr
Energie de sortie	726697	1006196	kWh/yr
Pertes d'énergie	80744	111814	kWh/yr

Tableau VI.9 : Coûts du système

Composant	Investissements (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Récupération (\$)	Total (\$)
Turbine éolienne	1900000	0	507052	0	0	2407052
Groupe électrogène	539700	307,115	2419693	538219	-37151	3767577
Batteries	1358500	685194	131833	0	-165304	2010223
Convertisseur	469025	147856	48010	0	-22829	642062
Système	4267225	1140165	3106588	538219	-225284	8826913

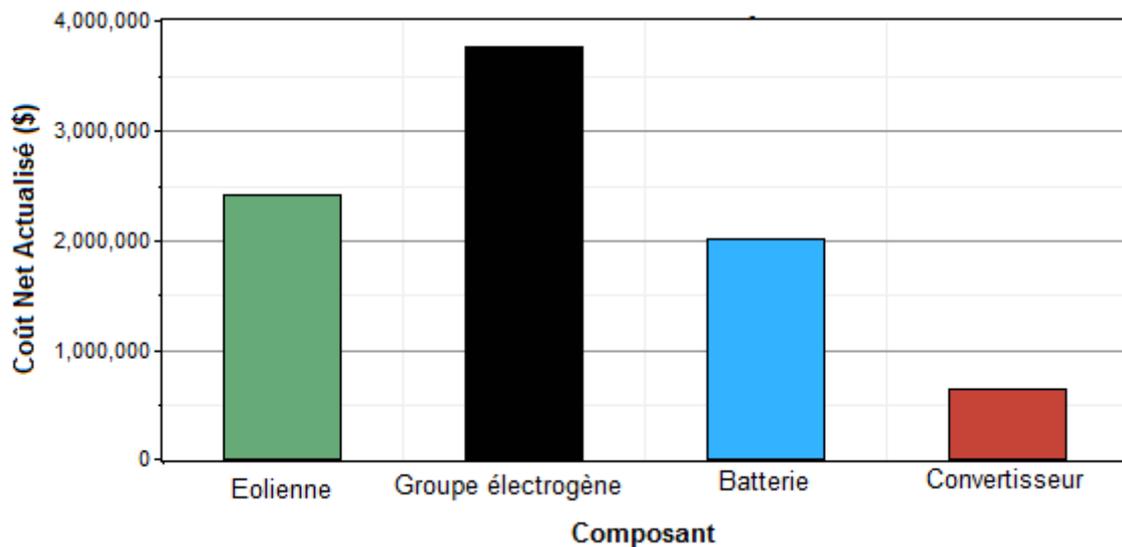


Figure VI.11 : Répartition des coûts du système

VI.4.5 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité sur le logiciel HOMER permet d'identifier l'influence d'un ou plusieurs paramètres sur les résultats de simulation. Cette analyse permet aussi de prévoir l'installation du même système sur un autre site.

Parmi les résultats, le coût spécifique de l'énergie et le coût net actualisé peuvent être des bons indices pour valider le système. Le pourcentage d'excès d'énergie permet aussi de déduire si le système a bien été optimisé. La configuration optimale du système dépend essentiellement des paramètres de sensibilité suivants :

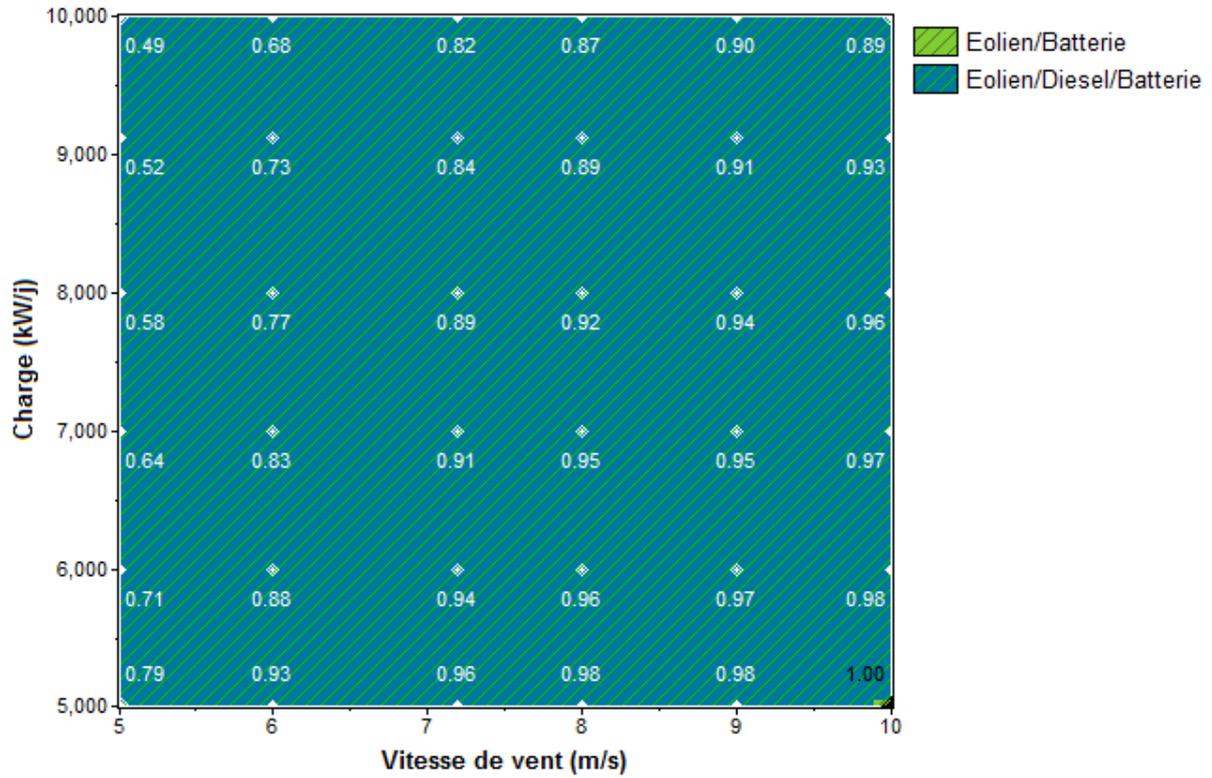
- la consommation énergétique journalière (besoin en eau potable).
- la vitesse moyenne du vent (gisement éolien).
- le prix du fuel y compris le coût du transport.
- le coût d'achat de la turbine éolienne qui décroît suite aux progrès technologiques et la réduction du coût due à l'expansion du marché des éoliennes et l'augmentation de la production.

Les valeurs utilisées dans la simulation sont résumées dans le tableau VI.10. La figure VI.12 (a), (b) et (c) donne les résultats de simulation pour des vitesses de vent qui varient de 5 à 10 m/s et une charge moyenne allant de 5000 à 10000 kWh/j. Le coût de la turbine éolienne est pris égal à 80% du coût d'investissement actuel et le prix du combustible est fixé à 0,2, 0,6 et 1,2 \$/L respectivement. La carte d'analyse étant superposée par le taux de pénétration du vent. Comme le montre la figure, l'implantation de la turbine éolienne est avantageuse pour toutes les plages de variation des vitesses et de la charge et ce indépendamment du prix du fuel. Le groupe électrogène est déclassé pour des vitesses de vent supérieures à 9 m/s et des charges inférieures à 6000 kWh/j et ce pour des valeurs croissantes du prix du combustible.

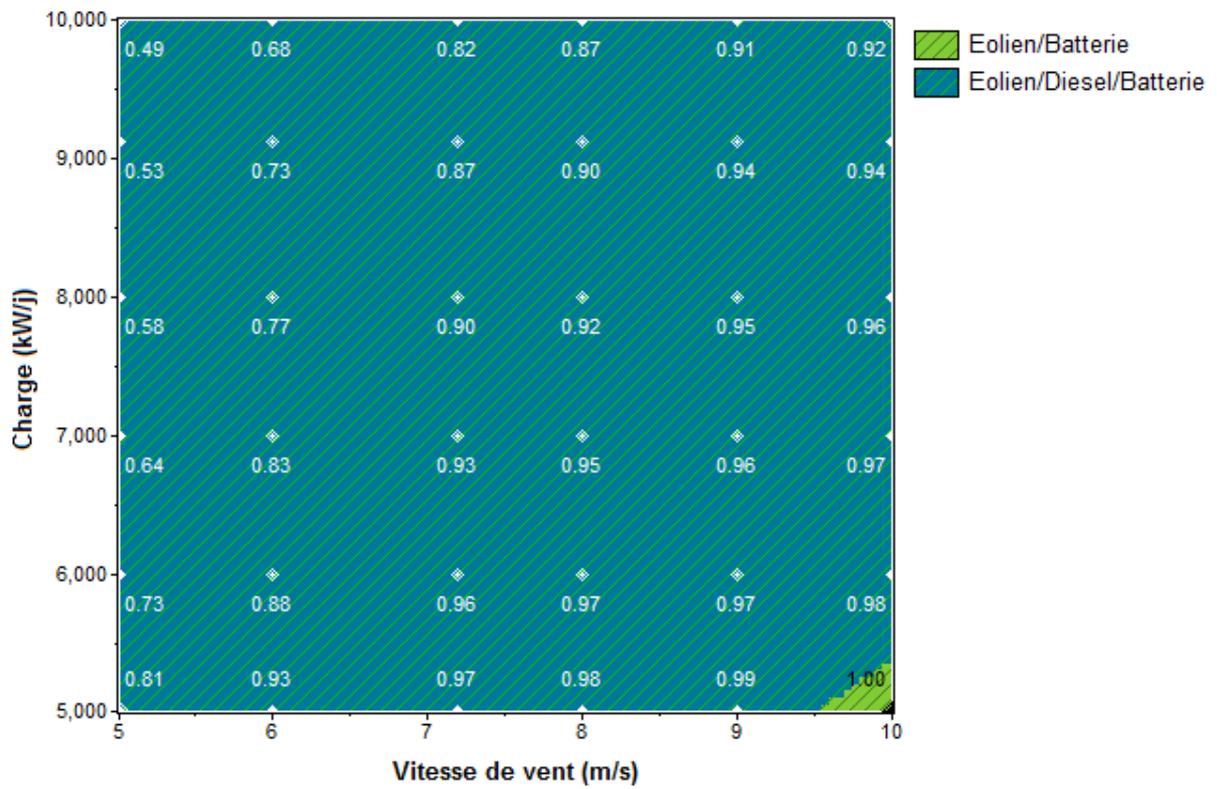
La figure VI.13 donne la production de la turbine éolienne pour différentes valeurs de vitesse et de charge. Celle-ci étant proportionnelle à la vitesse vent et indépendante de la charge. La figure VI.14 donne la production du groupe électrogène pour des prix de combustible de 0,2 et 1,2 \$/L. Celle-ci étant inversement proportionnelle avec le prix du fuel.

Tableau VI.10 : Variables de sensibilité utilisées dans la simulation

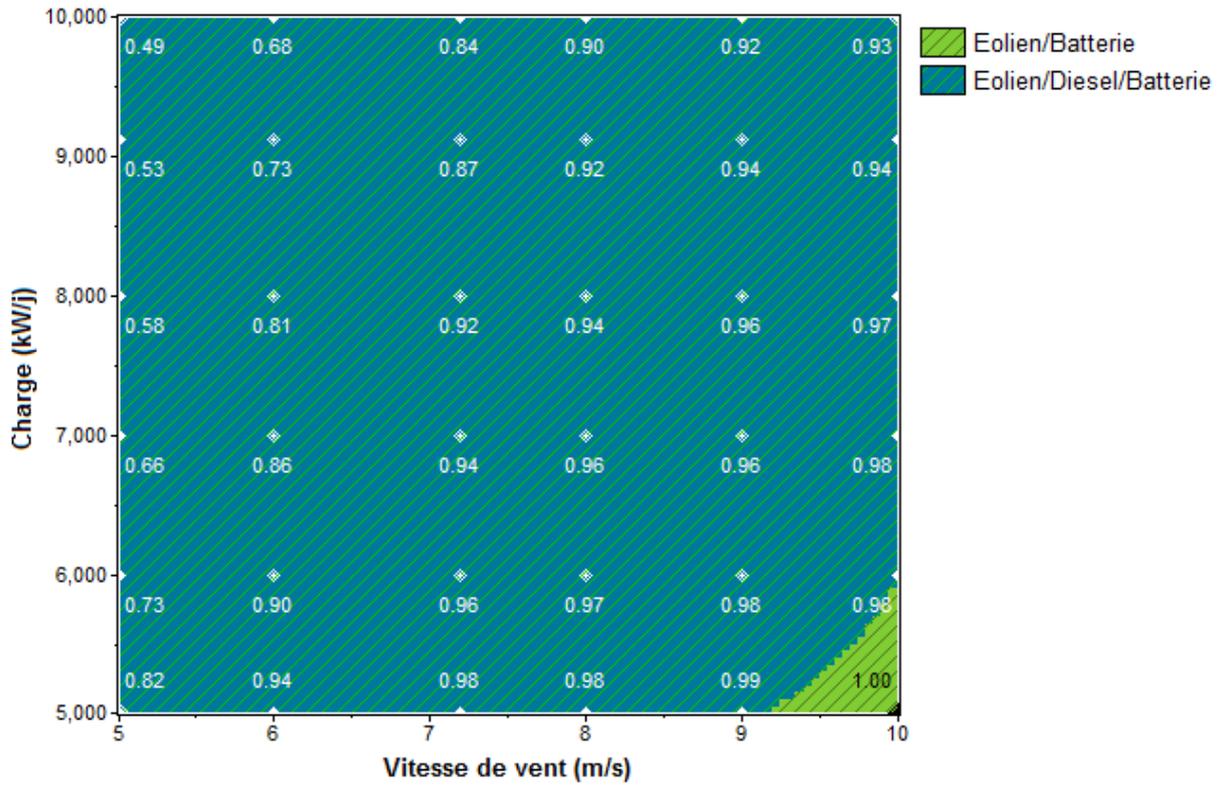
Charge moyenne (kWh/j)	Vitesse moyenne annuelle (m/s)	Prix du combustible (\$/L)	Facteur de réduction du coût de l'éolienne (-)
5000	5	0,2	1,0
6000	6	0,4	0,8
7000	7,2	0,6	0,6
8000	8	0,8	0,5
9120	9	1,0	0,4
10000	10	1,2	0,3



(a) Configuration optimale pour un prix de fuel fixé à 0,2 \$/L

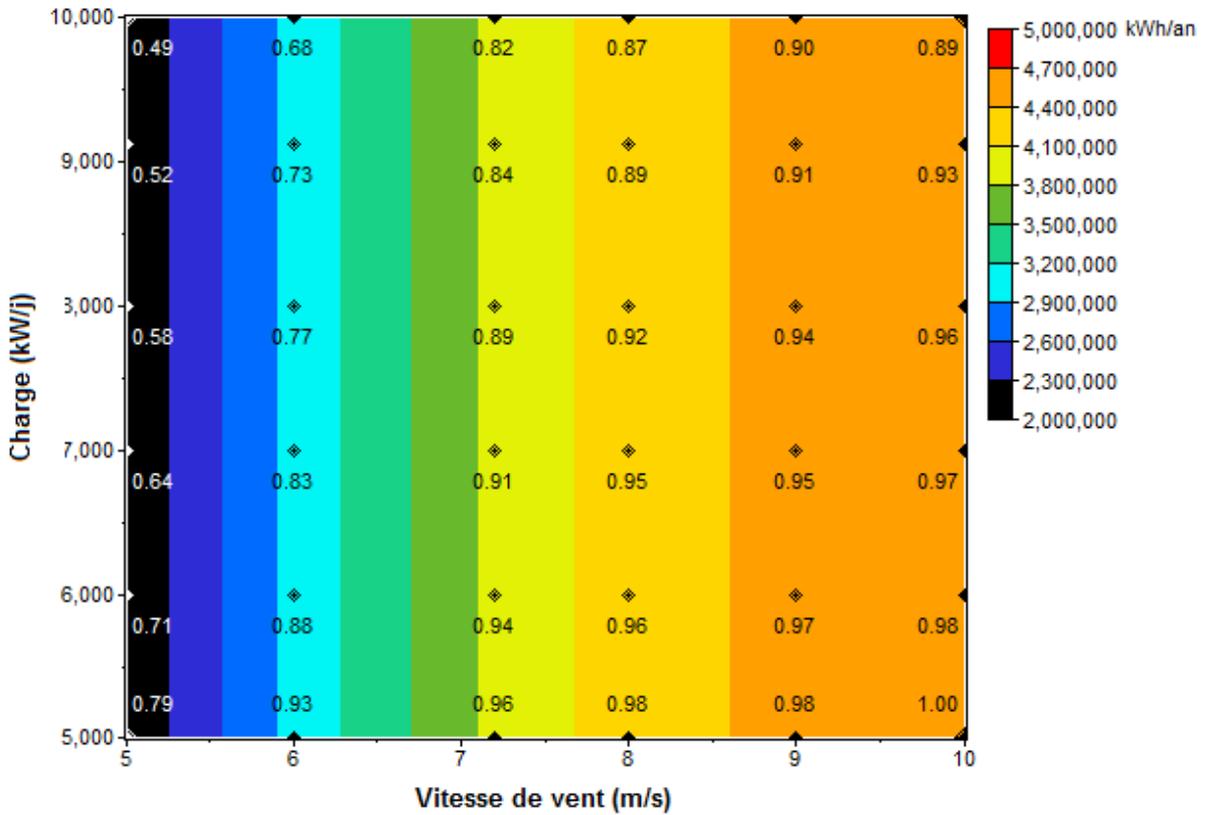


(b) Configuration optimale pour un prix de fuel fixé à 0,6 \$/L

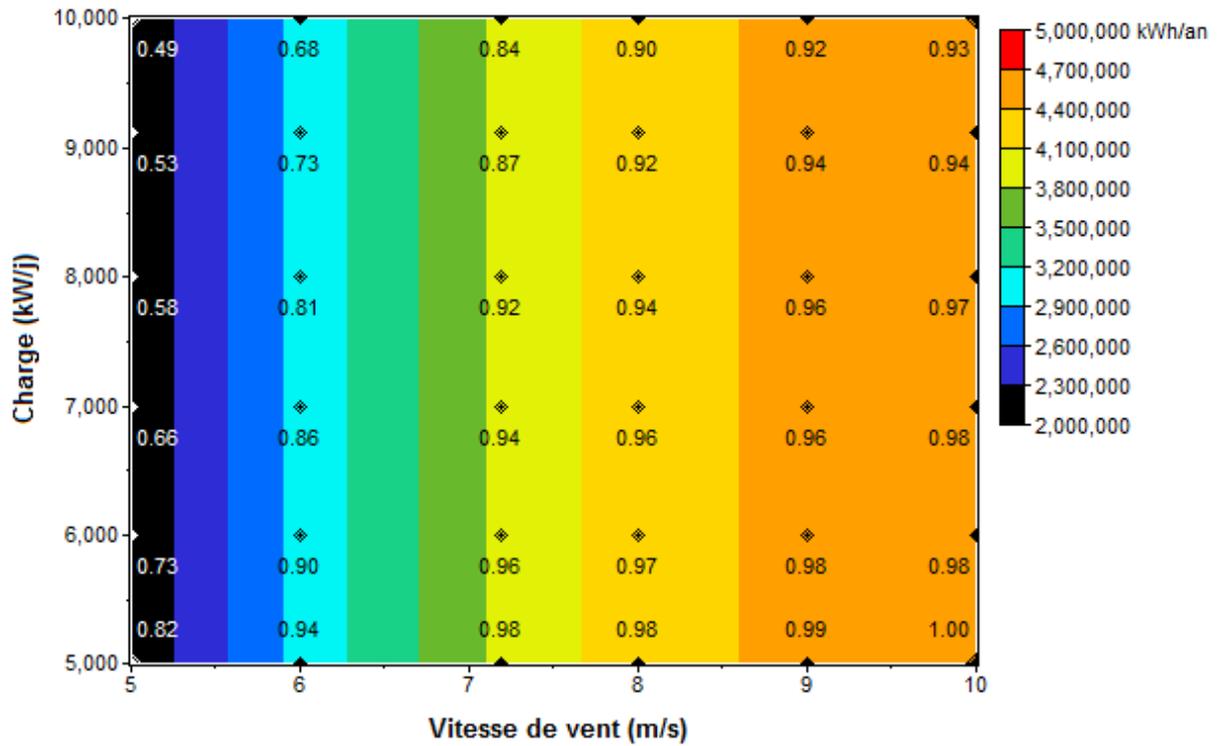


(c) Configuration optimale pour un prix de fuel fixé à 1,2 \$/L

Figure VI.12 : Configurations possibles en fonction du prix de fuel (Adrar)

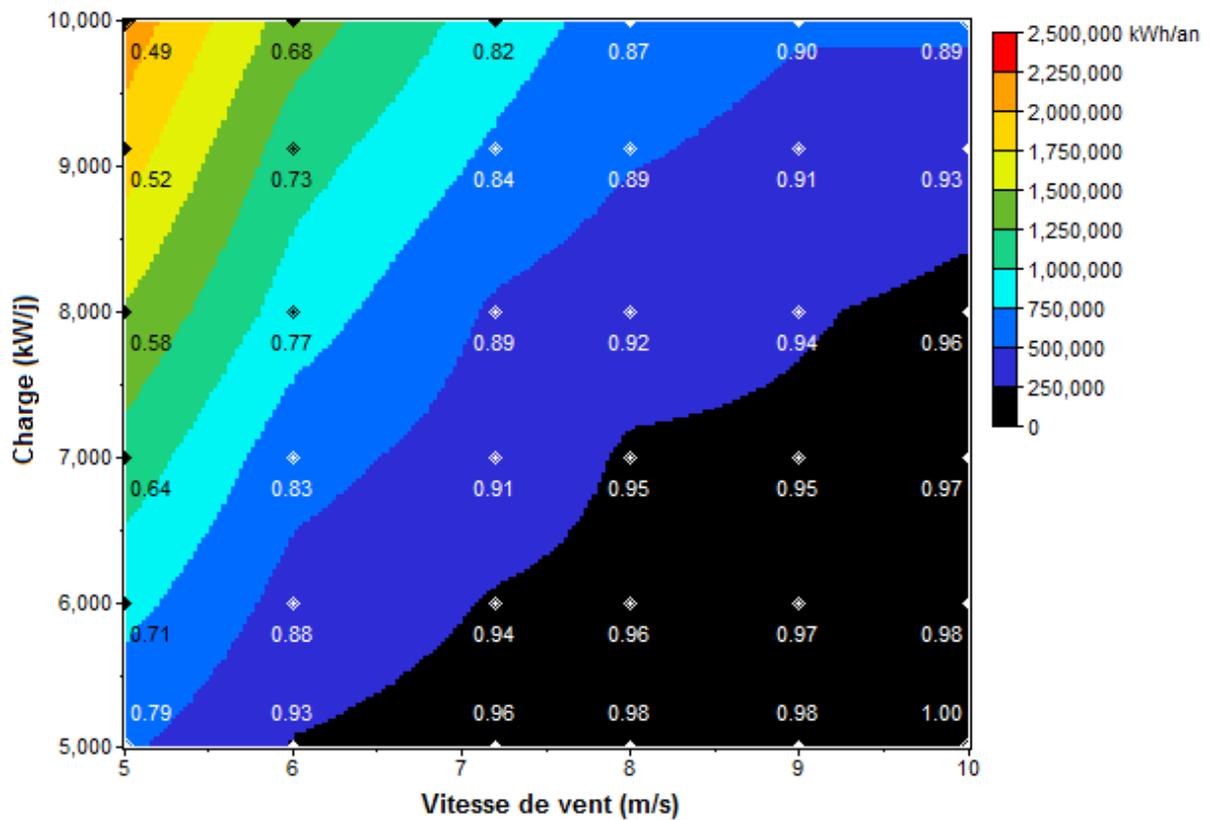


(a) Production de l'éolienne pour un prix de fuel fixé à 0,2 \$/L

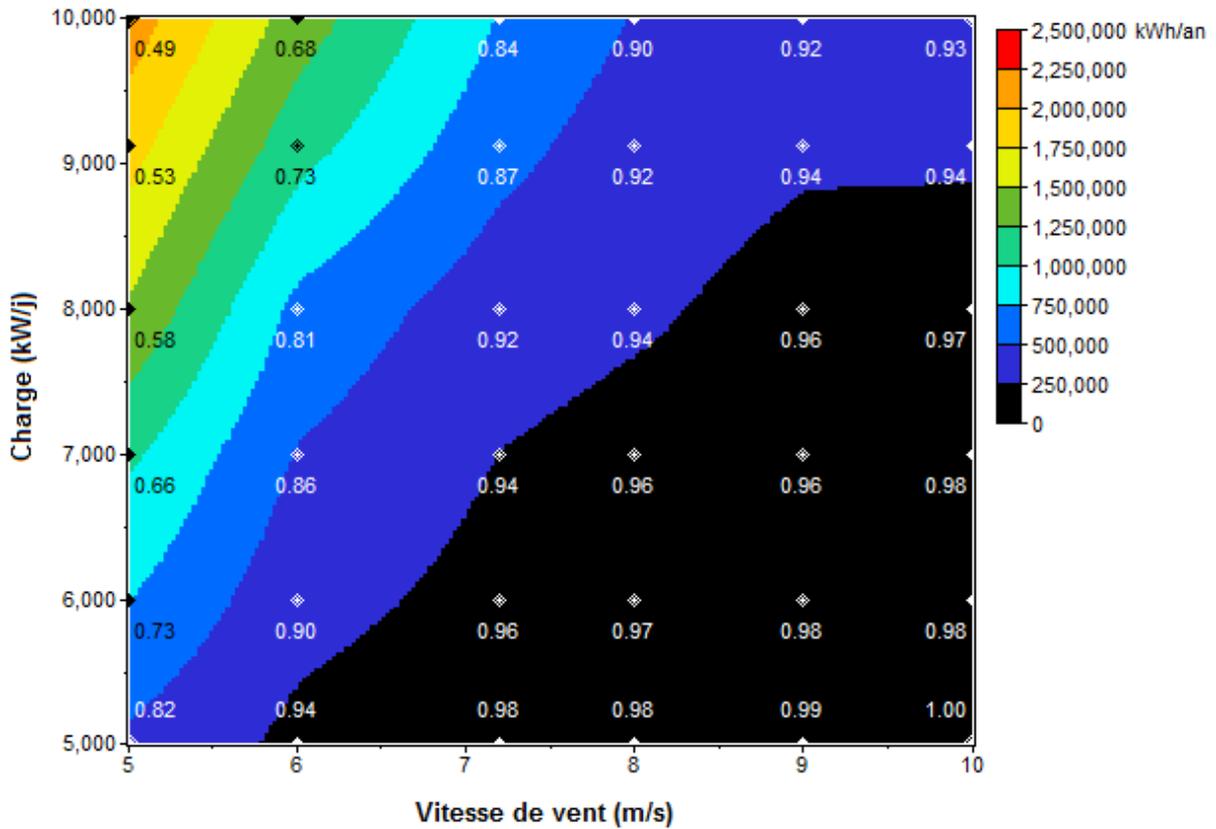


(b) Production de l'éolienne pour un prix de fuel fixé à 1,2 \$/L

Figure VI.13 : Production de la turbine éolienne en fonction du prix de fuel (Adrar)



(a) Production du groupe électrogène pour un prix de fuel fixé à 0,2 \$/L



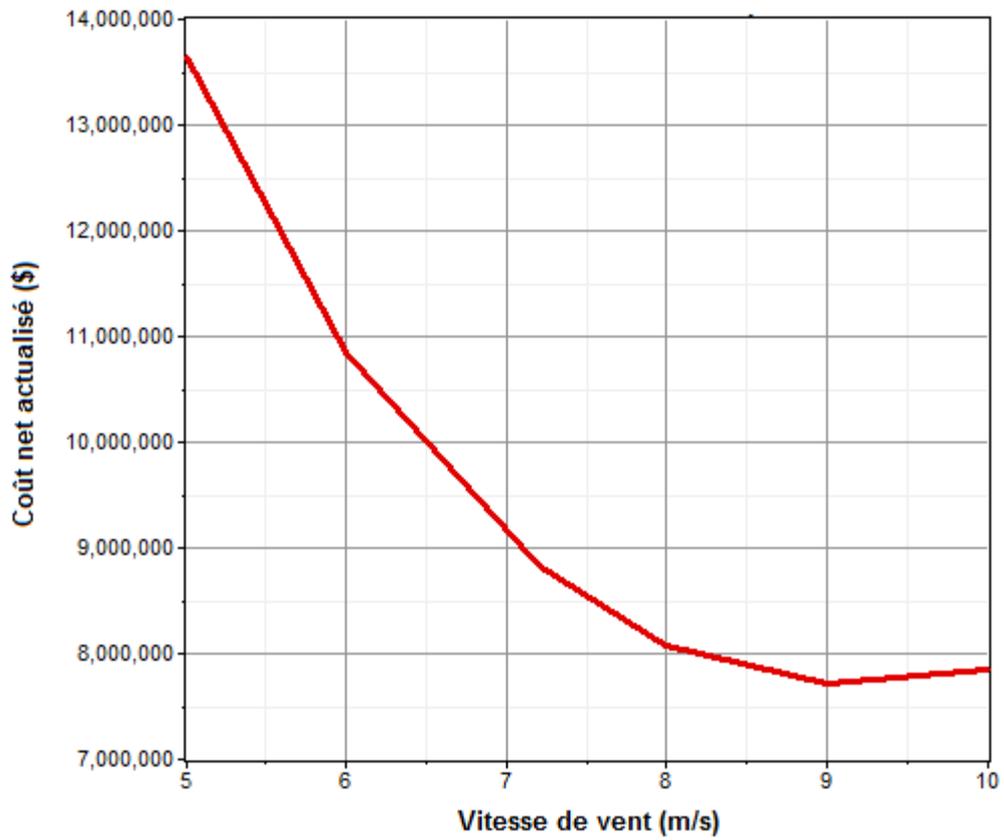
(b) Production du groupe électrogène pour un prix de fuel fixé à 0,2 \$/L

Figure VI.14 : Production du groupe électrogène en fonction du prix du fuel (Adrar)

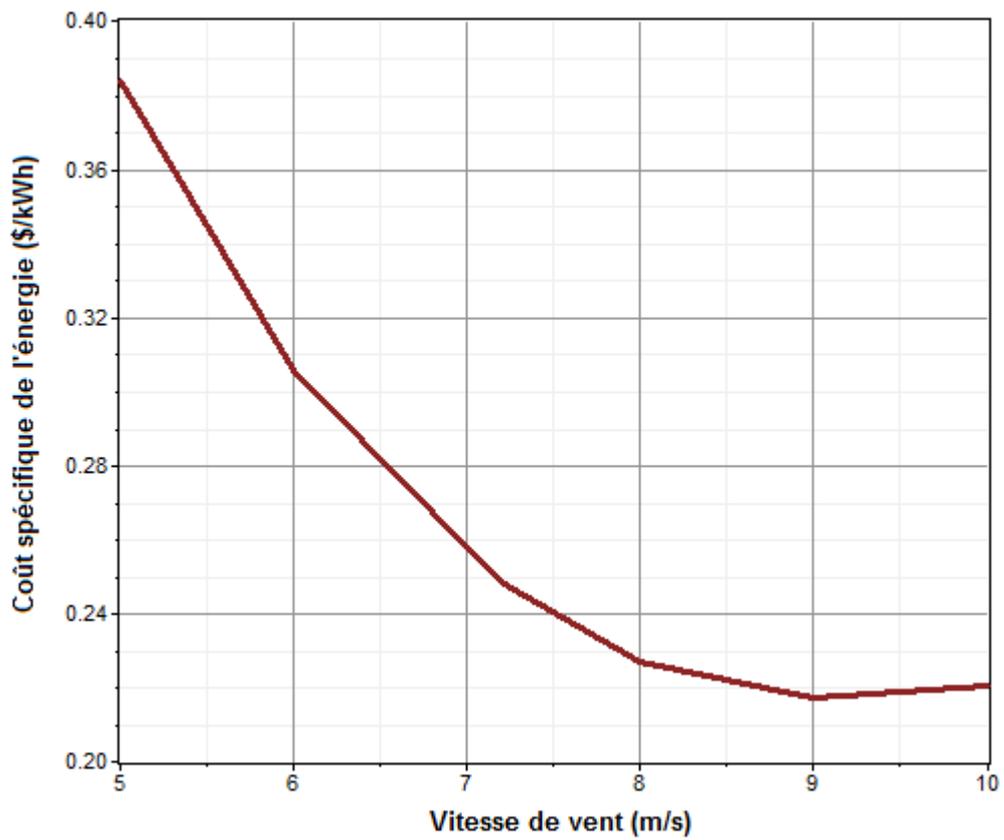
La figure VI.15 montre l'influence de la vitesse moyenne du vent sur la performance du système étudié. Il est évident que l'augmentation de la vitesse du vent réduit la dépendance du système au groupe électrogène. Ainsi, le pourcentage d'excès en énergie électrique devient plus important avec l'augmentation du régime du vent. Cependant, pour des vitesses de vents supérieures à 9 m/s il y a une diminution de l'excès en énergie accompagnée par une légère augmentation de la valeur des paramètres du coût suite à l'exclusion du groupe électrogène.

Les résultats économiques pour différentes valeurs de charge sont présentés en figure VI.16. Comme c'était prévu, le coût net actualisé décroît pour les faibles charges et augmente le cas contraire. Cependant, le coût spécifique de l'énergie diminue pour les grandes charges. Ceci s'explique du fait que le coût d'énergie est relatif à l'énergie produite utilisée et non à la production énergétique totale. Bien que la pompe HP soit alimentée par une seule turbine éolienne, le pourcentage d'excès en énergie électrique est faible lorsque la charge est élevée et par la suite le coût spécifique de l'énergie se voit réduit (Fig. VI.16 c).

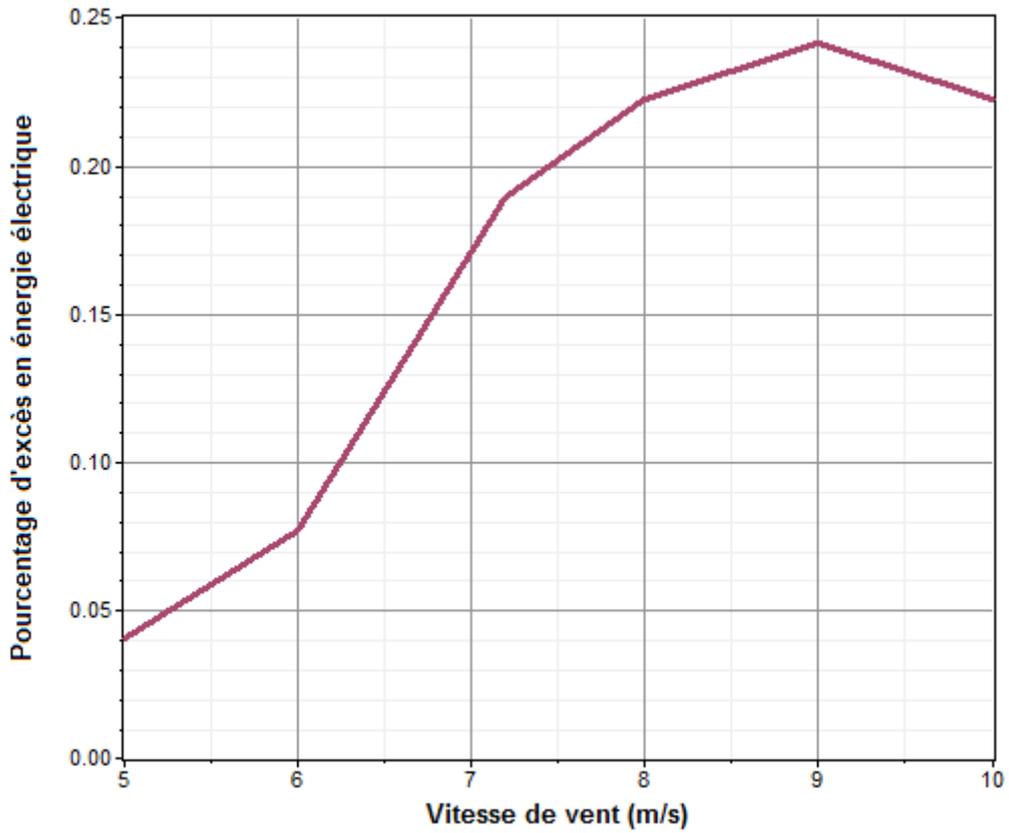
Par ailleurs, On peut voir que le système hybride est capable de répondre à la demande énergétique en forte période.



(a) Effet de la vitesse du vent sur le coût net actualisé

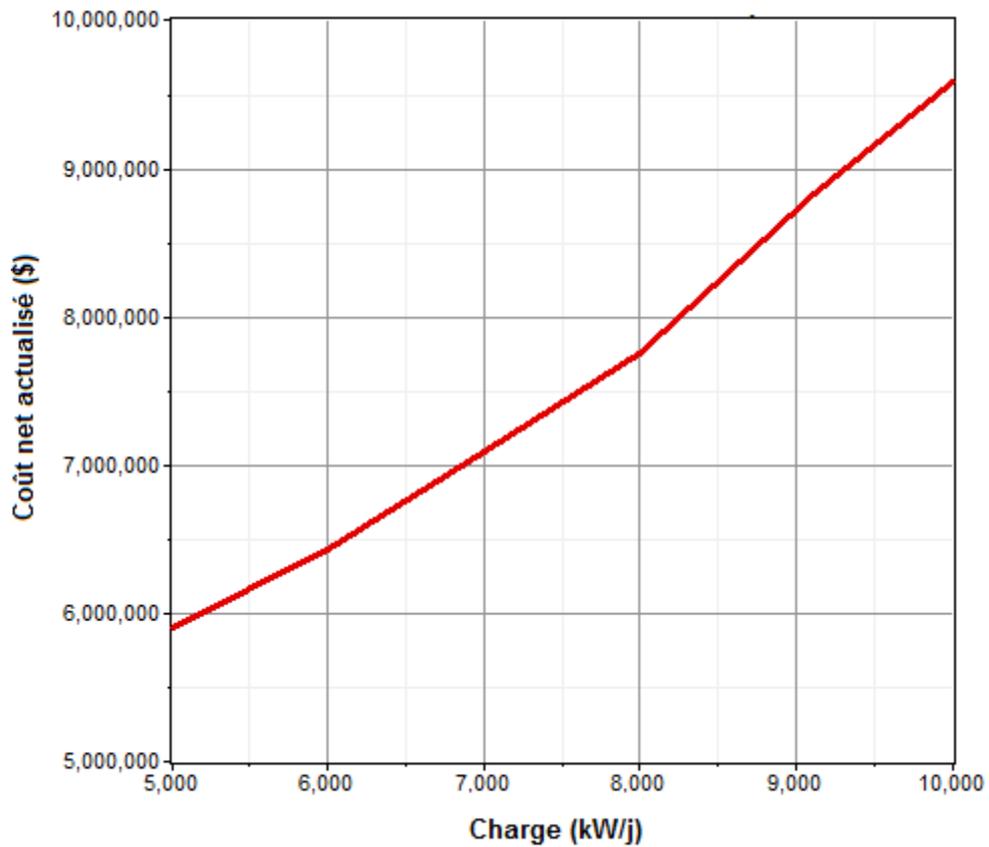


(b) Effet de la vitesse du vent sur le coût spécifique de l'énergie

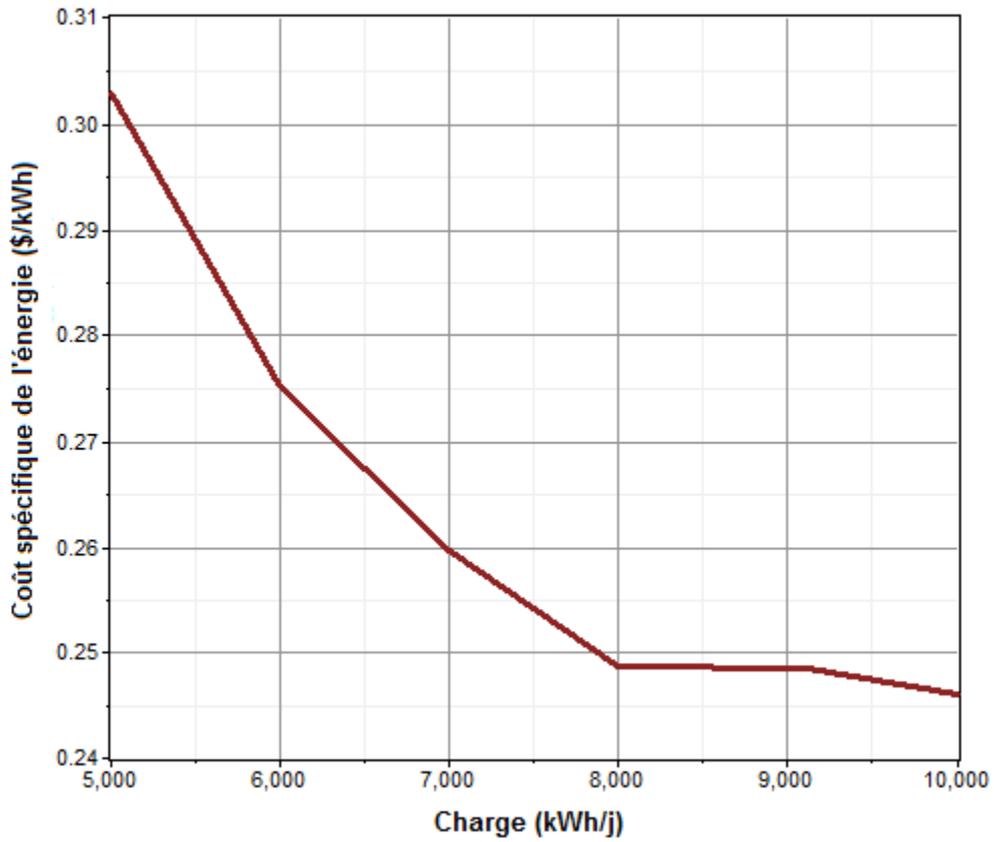


(c) Effet de la vitesse du vent sur le pourcentage d'excès en énergie électrique

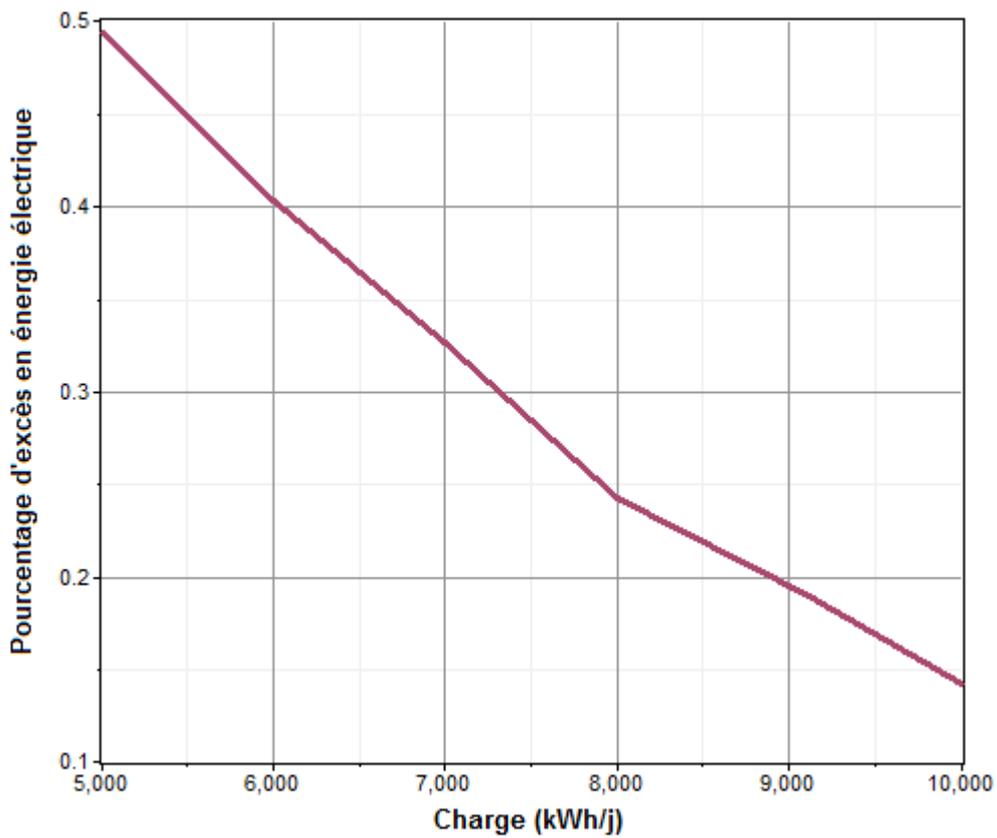
Figure VI.15 : Influence de la variation de la vitesse du vent (Adrar)



(a) Effet de la charge sur le coût net actualisé



(b) Effet de la charge sur le coût spécifique de l'énergie



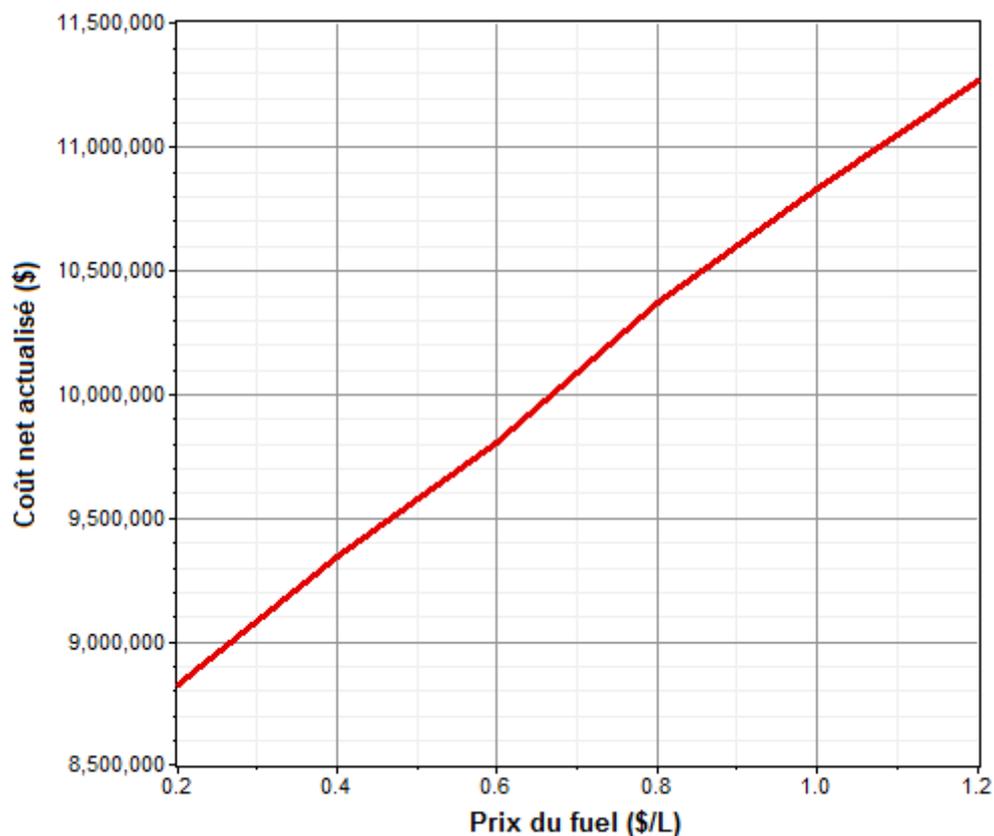
(c) Effet de la charge sur le coût net actualisé

Figure VI.16 : Influence de la variation de la charge (Adrar)

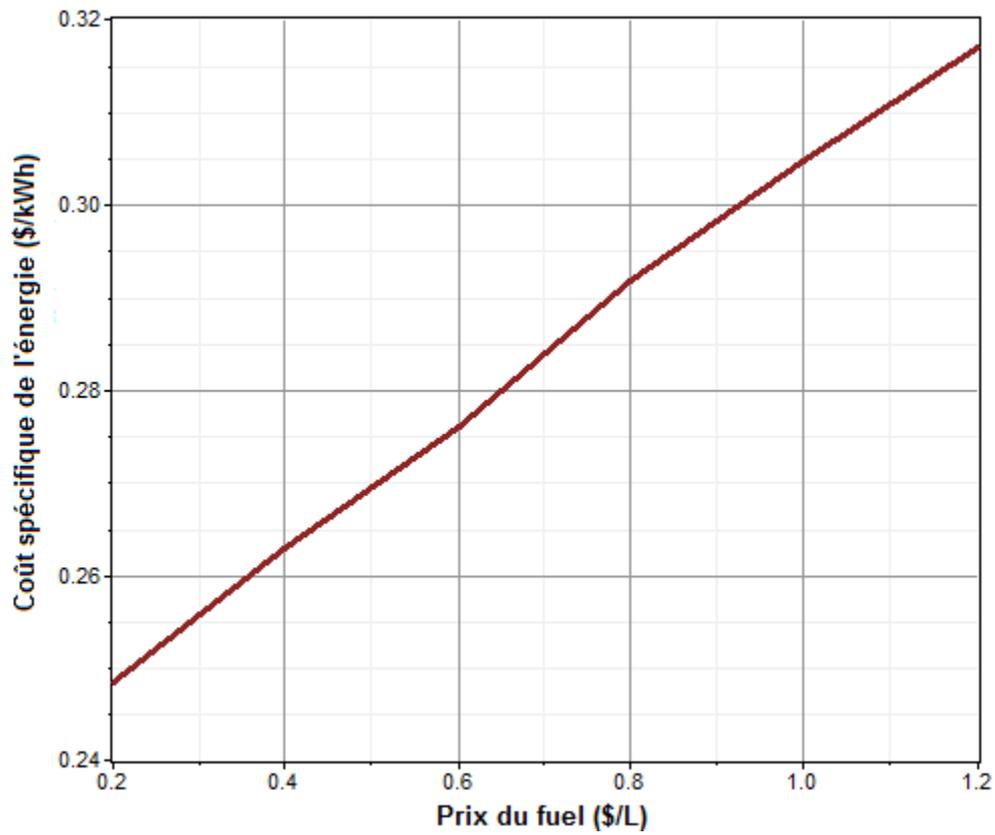
La figure VI.17 montre l'effet du prix du combustible sur la performance du système. On constate que le prix du fuel a une influence capitale sur le fonctionnement du système dès qu'une légère augmentation du prix entraîne un accroissement important du coût net actualisé et du coût spécifique de l'énergie. Le nombre de batteries utilisées se voit ainsi augmenter pour compenser la production énergétique du système.

La figure VI.18 illustre l'influence du facteur de réduction du coût de la turbine éolienne sur la performance du système. On remarque que la chute du coût d'investissement de l'éolienne résulte en une importante économie du coût du système ce qui confirme les perspectives prometteuses loués à l'utilisation des turbines éoliennes comme source de production d'énergie.

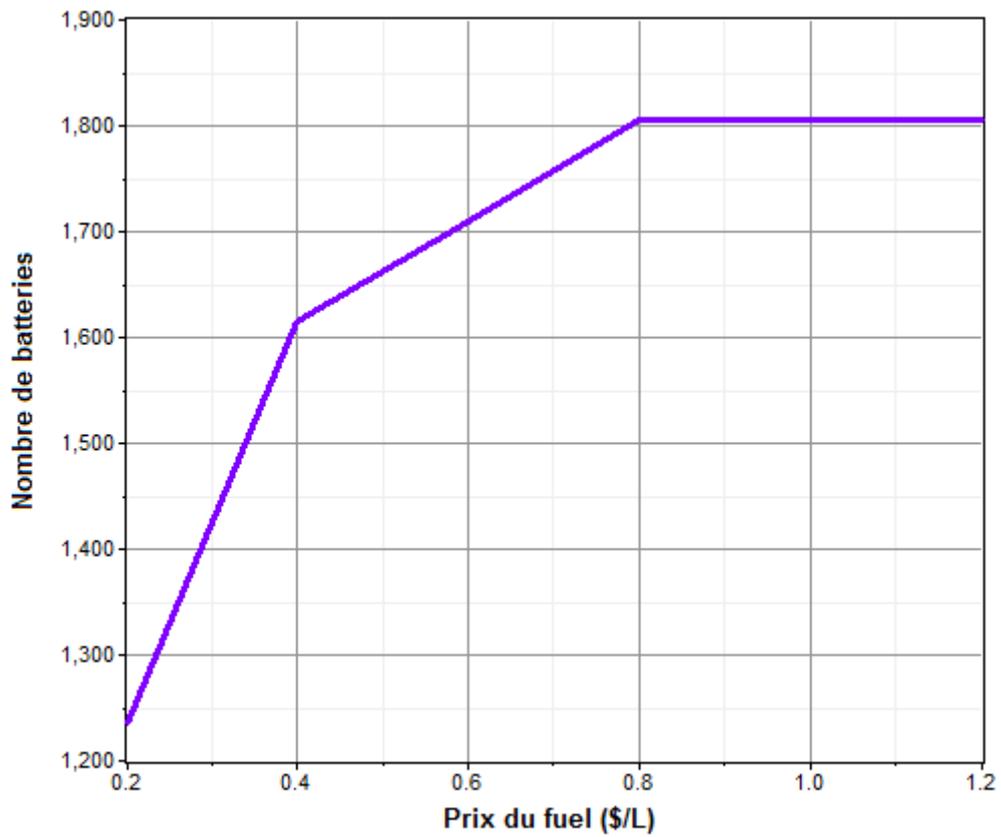
La figure VI.19 regroupe l'influence conjuguée des paramètres de sensibilité sur la performance de la configuration optimale. Comme le montre la figure, la vitesse moyenne du vent et le prix du combustible, ont l'impact direct le plus important sur le coût spécifique de l'énergie produite. En effet, une augmentation de la vitesse du vent de 10% par rapport à la valeur actuelle entraîne une diminution du coût spécifique de l'énergie de 0,015 \$/kWh et un accroissement du prix du combustible de 25% augmentera ce coût de 0,02 \$/kWh.



(a) Effet du prix du fuel sur le coût net actualisé

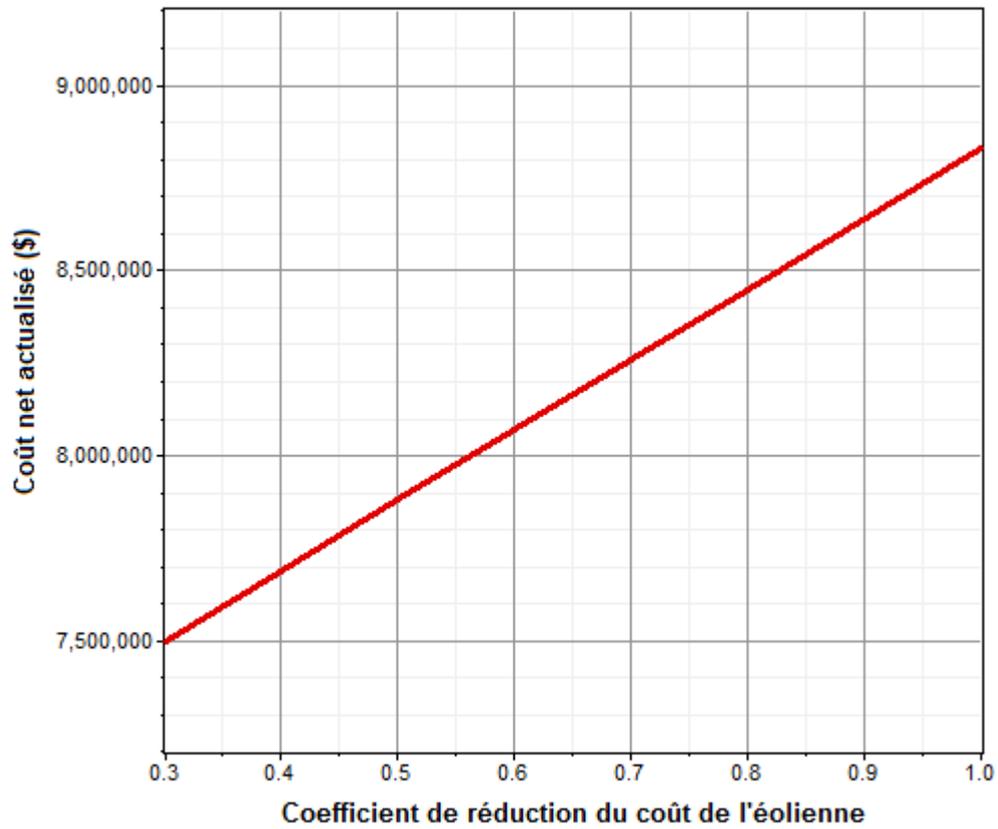


(b) Effet du prix du fuel sur le coût spécifique de l'énergie

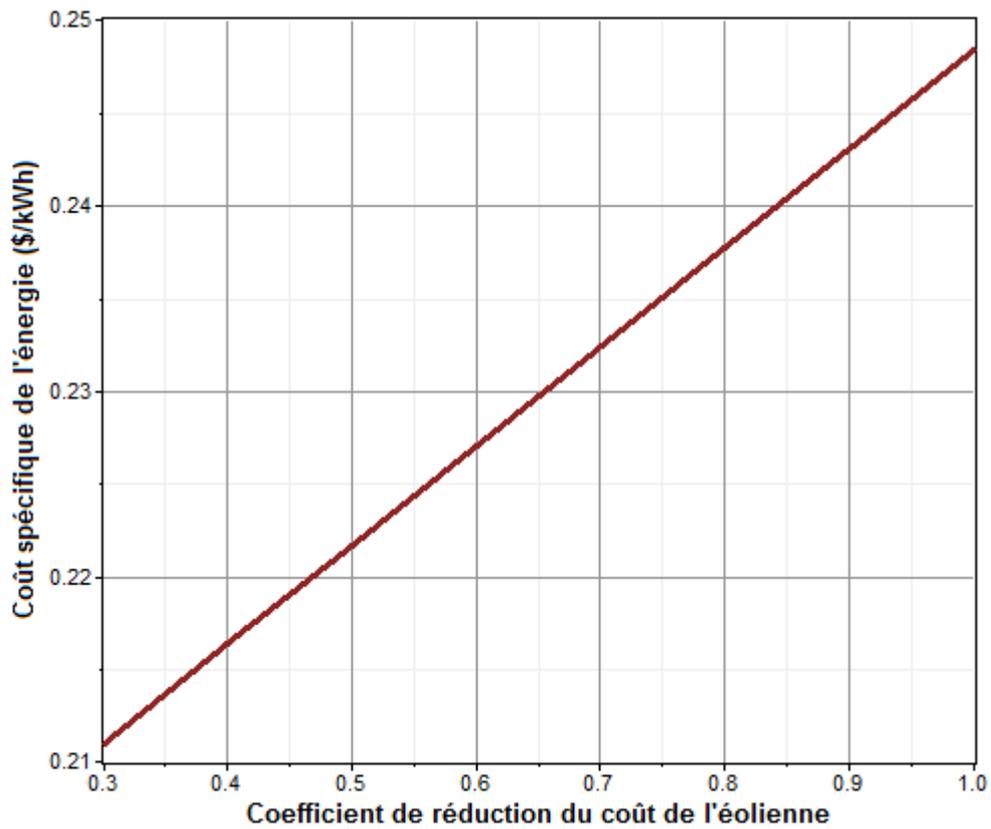


(c) Effet du prix du fuel sur le nombre optimal des batteries

Figure VI.17 : Influence de la variation du prix du combustible (Adrar)



(a) Effet de la réduction du coût de l'éolienne sur le coût net actualisé



(b) Effet de la réduction du coût de l'éolienne sur le coût spécifique de l'énergie

Figure VI.18 : Influence de la réduction du coût d'investissement de l'éolienne

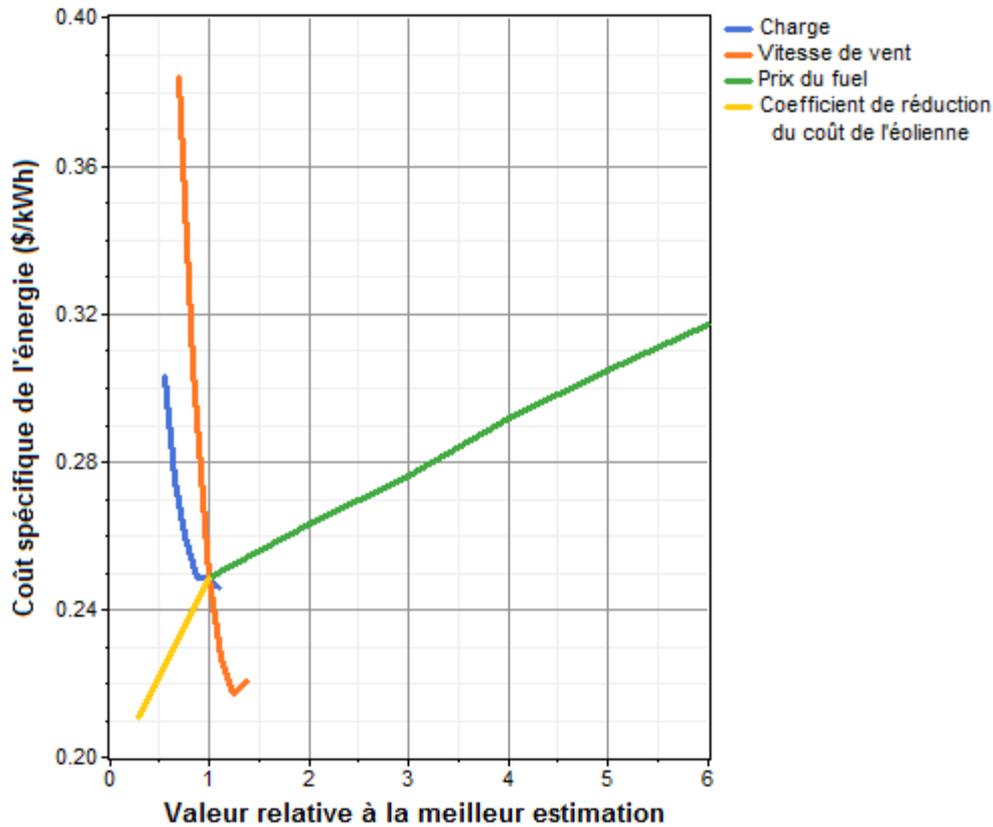


Figure VI.19 : Effet conjugué des paramètres de sensibilité sur le coût de l'énergie

VI.5 Étude économique du dessalement

VI.5.1 Introduction

Le coût de l'eau dessalée par un système d'OI dépend d'un nombre important de paramètres à savoir : la pression de fonctionnement, le taux de conversion du système, la température d'alimentation, la pression osmotique, la pression côté perméat, la perte de charge à travers les modules, le taux de rejet de sels, la qualité exigée sur la production, la taille (capacité) du système, le procédé d'OI, le nombre d'étages, la disposition, le nombre de modules, la quantité d'énergie consommée par le système, le type des modules utilisés, leurs performances et leur prix, le coût de l'énergie, etc.

Plusieurs modèles ont été développés pour estimer le coût de l'eau dessalée par OI [167]. Dans cette étude, une approche du coût moyen actualisé est utilisée pour la faisabilité économique. Cette méthode tient en compte tous les coûts d'investissement, les coûts O&M de l'unité de dessalement. Avec ces estimations de coûts s'ajoutent les valeurs appropriées pour le taux d'intérêt, la durée de vie technique et la capacité de production de l'unité.

VI.5.2 Coût moyen actualisé de l'eau produite

Le coût moyen actualisé de l'eau dessalée est calculé en fonction du débit d'eau produit par le système et selon l'équivalence entre la production énergétique annuelle de la turbine éolienne et la consommation énergétique annuelle de l'unité de dessalement comme suit [168] :

$$C_{eau} = \frac{C_{inv} \cdot A(n) + C_{aom} + C_{kWh} (C_{aec} - P_{elec})}{Q_p} \quad (VI.3)$$

$$\text{Où : } C_{aec} = P_{elec} ; A(n) = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1}$$

Les coûts d'investissement ainsi que les coûts O&M de l'unité d'OI sont donnés dans le tableau VI.11 [169].

Tableau VI.11 : Coûts d'investissement, d'opération et de maintenance de l'unité de dessalement [169]

Coûts d'investissement [\$/ (m ³ /j)]	Coûts O&M [\$/ (m ³ /an)]
735	0,14

VI.5.3 Profitabilité

La profitabilité du dessalement peut être exprimée en termes de l'indice de profitabilité ou taux de rentabilité défini comme le rapport entre le coût net actualisé et le coût d'investissement de l'unité de dessalement [118]. Des valeurs positives de l'indice de profitabilité indiquent que le projet est rentable tandis que des valeurs négatives indiquent que les coûts globaux actualisés sont plus élevés que le prix spécifique estimé de l'eau dessalée.

$$C_{Net} = \frac{8760 \times PRE \times Q_p - C_{aom}}{A(n)} - C_{inv} \quad (VI.4)$$

$$IP = \frac{C_{Net}}{C_{inv}} \quad (VI.5)$$

Dans la présente étude, le prix de vente estimé pour l'eau dessalée, PRE, est 0,82 \$/m³ [10].

VI.5.4 Résultats et discussions

Les résultats des coûts moyens actualisés de l'eau produite dans les trois sites étudiés sont illustrés dans la figure VI.18. Les valeurs obtenues sont 0,66 \$/m³ à Adrar, 0,70 \$/m³ à Timimoun et 0,75 \$/m³ à Tindouf. Le site d'Adrar présente le coût spécifique le plus faible dû à la production annuelle d'énergie électrique élevée.

L'évaluation du coût net actualisé pour le système étudié est donnée dans le tableau VI.12 pour les différents sites. Les valeurs obtenues sont 2206181 \$, 1525018 \$ et 715200,1 \$ à Adrar, Timimoun et Tindouf respectivement avec un taux de rentabilité de 0,32, 0,23 et 0,11. Les délais de récupération du capital investi (ou temps de retour sur l'investissement) sont 9 ans à Adrar, 10 ans à Timimoun et 12 ans à Tindouf comme c'est montrée dans la figure VI.19.

La figure VI.20 présente la variation de l'indice de profitabilité en fonction du prix spécifique estimé de l'eau dessalée pour les sites retenus. L'allure des courbes obtenues est linéaire conformément aux équations (VI.5) et (VI.6). La pente de la courbe dépend du coût d'investissement, des paramètres financiers (durée de vie, taux d'intérêt) et de la capacité de l'unité de dessalement. Des pentes élevées impliquent un investissement plus rentable dès qu'un léger accroissement du prix de vente de l'eau dessalée conduit à une augmentation substantielle de l'indice de profitabilité et par conséquent le coût net actualisé. Adrar est toujours considéré le meilleur site.

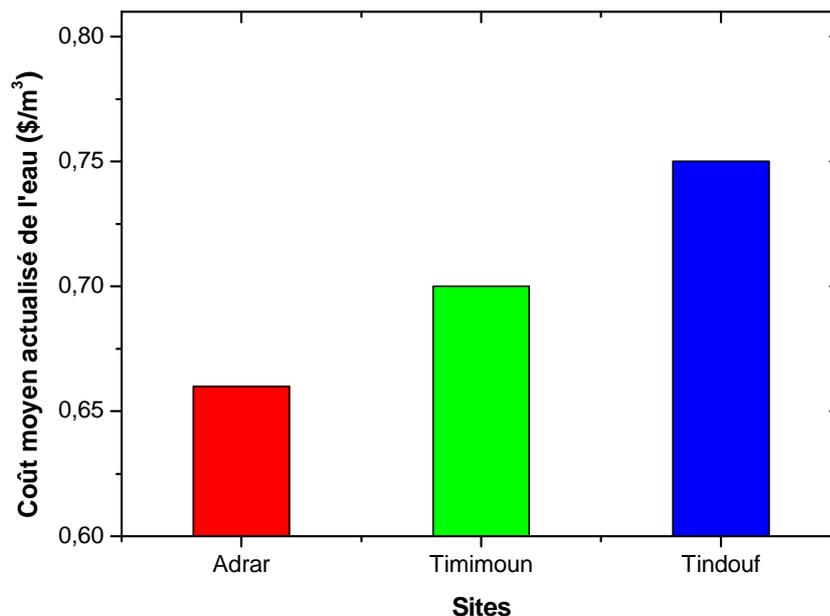


Figure VI.20 : Coûts moyens actualisés de l'eau dessalée pour les trois sites

Tableau VI.12 : Indicateurs de rentabilité économique

Sites	Coût net actualisé (\$)	Indice de profitabilité (-)
Adrar	2206181	0,32
Timimoun	1525018	0,23
Tindouf	715200,1	0,11

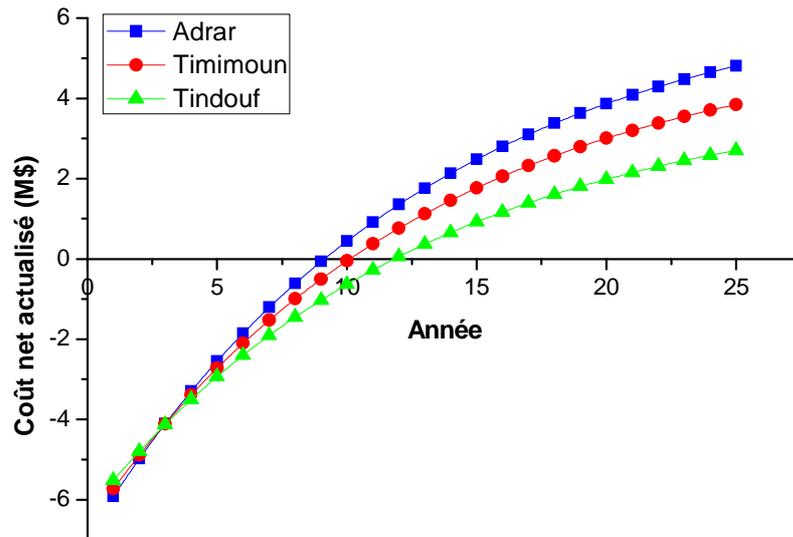


Figure VI.21 : Évaluation du coût net actualisé pour les trois sites

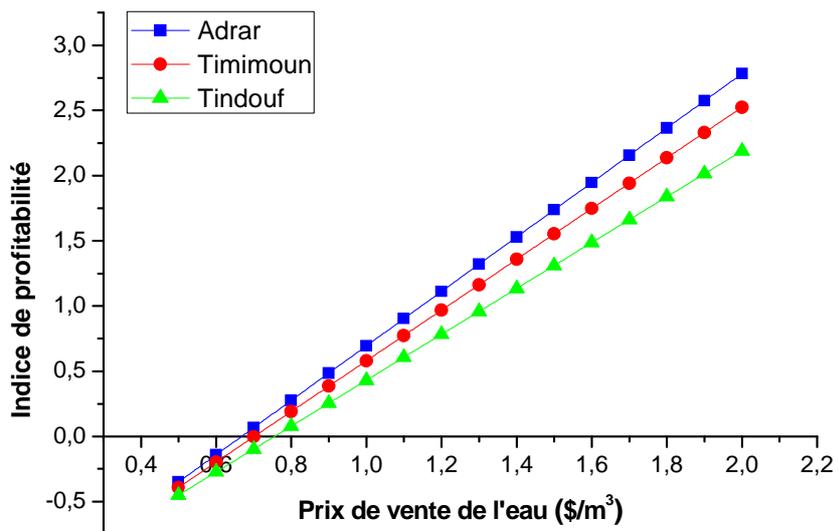


Figure VI.22 : Variation de l'indice de profitabilité en fonction du prix de vente de l'eau

VI.6 Analyse environnementale

VI.6.1 Origine et types des émissions et rejets

VI.6.1.1 Emissions atmosphériques

Les unités de dessalement étant essentiellement alimentées par des énergies fossiles, elles génèrent donc directement ou indirectement des polluants atmosphériques incluant le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures non brûlés (UHC), les particules solides (PM), le dioxyde de soufre (SO_x) et les oxydes d'azote (NO_x).

VI.6.1.2 Rejets chimiques

Toutes les unités de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ou le post-traitement de l'eau produite et pour le nettoyage des membranes d'OI. La plupart de ces produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, antitartres, anti-salissures, et ils finissent par modifier relativement la composition de la saumure concentrée. En plus des rejets de métaux lourds provenant de la corrosion du circuit peuvent influencée aussi sur la composition de la saumure concentrée.

VI.6.1.3 Rejets saumures

Les unités de dessalement rejettent en fait la même charge de sels de l'eau à traiter qu'elles ont reçues, mais dans un volume d'eau moindre, donc plus concentré allant jusqu'à deux fois la concentration initiale dans le cas de l'OI.

Ces saumures ont un impact négatif sur l'environnement, particulièrement lorsqu'elles sont déversées dans des écosystèmes sensibles. Si les saumures sont rejetées dans des étangs de sels, le risque de pollution des eaux souterraines demeure si l'étang n'est pas étanche.

VI.6.2 Évaluation de l'impact environnemental

Plusieurs études effectuées ont évaluées les impacts environnementaux des unités de dessalement par OI en analysant leur cycle de vie. Les résultats de ces études ont confirmés que l'énergie électrique consommée par le procédé de dessalement est responsable de plus de 90% de l'ensemble des impacts des unités alimentés par des combustibles fossiles [170,171,172]. Par comparaison avec les SER, les impacts sur l'environnement de la production d'énergie à partir d'une centrale électrique à charbon peuvent être dix fois plus supérieures [173,174]. Ces résultats montrent l'intérêt des énergies renouvelables comme une solution primordiale pour la réduction de l'impact environnemental du dessalement.

Cependant, il n'y a pas, jusqu'à présent, des méthodes suffisamment développées qui permettent d'évaluer les rejets liquides résultant des unités de dessalement. Quelques études ont décrit qualitativement les impacts potentiels résultant des rejets de saumures [175,176], mais même sur des études de cas réels, ces impacts (l'écotoxicité et l'eutrophisation par exemple) ne sont pas bien quantifiés. Si l'amplitude des impacts ne peut être évaluée, ces derniers vont toutefois dépendre des débits rejetés et donc sur du taux de conversion de l'unité de dessalement. L'intérêt d'adopter des taux de conversion le plus élevé possible permet non seulement de diminuer le volume des saumures rejetés mais aussi de réduire l'espace et le coût de construction des étangs d'évaporation prévus à cet effet.

L'analyse environnementale du système étudié sur l'environnement HOMER permet d'évaluer les émissions des polluants atmosphériques. Le tableau VI.13 résume la quantité totale d'émission des polluants dans le cas de la configuration optimale et le cas d'un système classique (groupe électrogène seul).

D'après ce tableau, il est possible de réduire significativement la consommation de fuel et par conséquent les émissions des polluants par l'incorporation de la turbine éolienne. Selon les résultats obtenus, les émissions des polluants peuvent être réduites d'environ 83 % par comparaison avec le groupe électrogène seul, en particulier les émissions du CO₂ et des CO responsables de l'effet de serre.

Les figures VI.21 et VI.22 représentent les émissions de CO₂ et de CO en fonction de la vitesse moyenne du vent et du prix de combustible. Il est évident que la configuration du système hybride devient plus faisable pour des vitesses de vent et des prix de fuel élevés.

Tableau VI.13 : Emission des polluants atmosphériques

Polluant	Émissions (kg/an)	
	Groupe électrogène seul	Configuration optimale
CO ₂	3861536	663859
CO	9532	1639
UHC	1056	182
PM	719	124
SO _x	7755	1333
NO _x	85052	14622

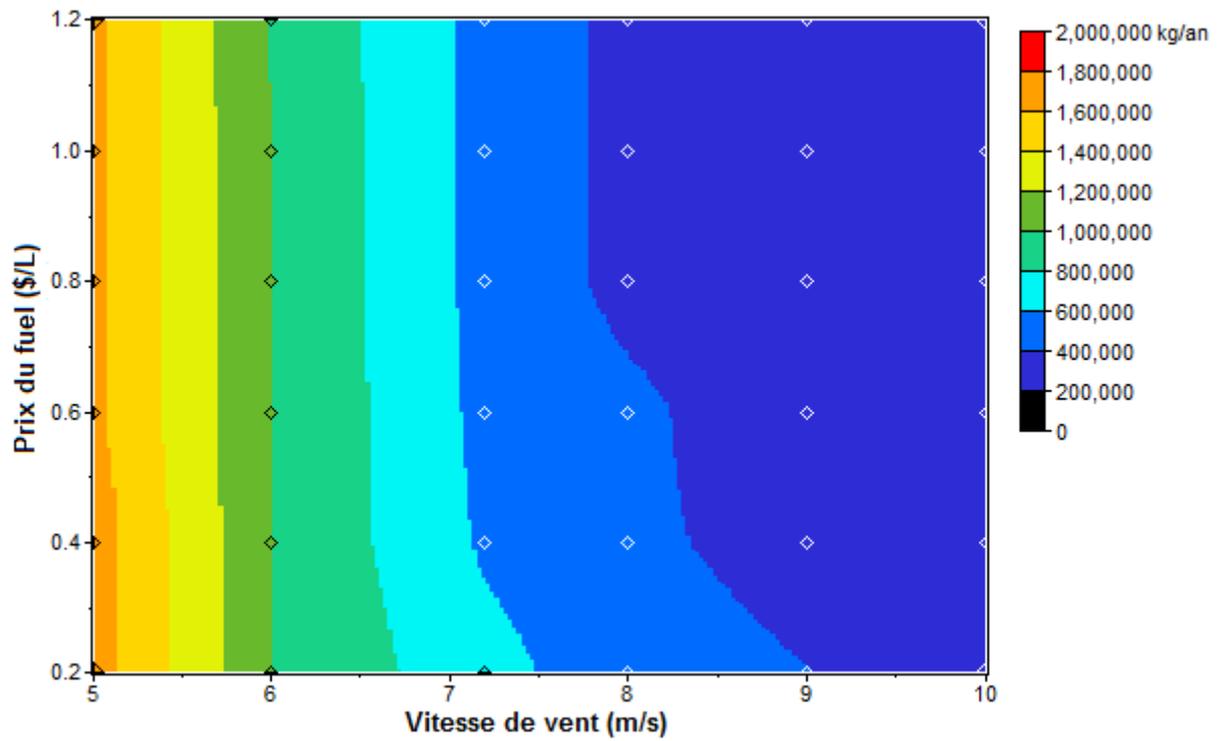


Figure VI.23 : Emissions de CO₂ pour différents régimes

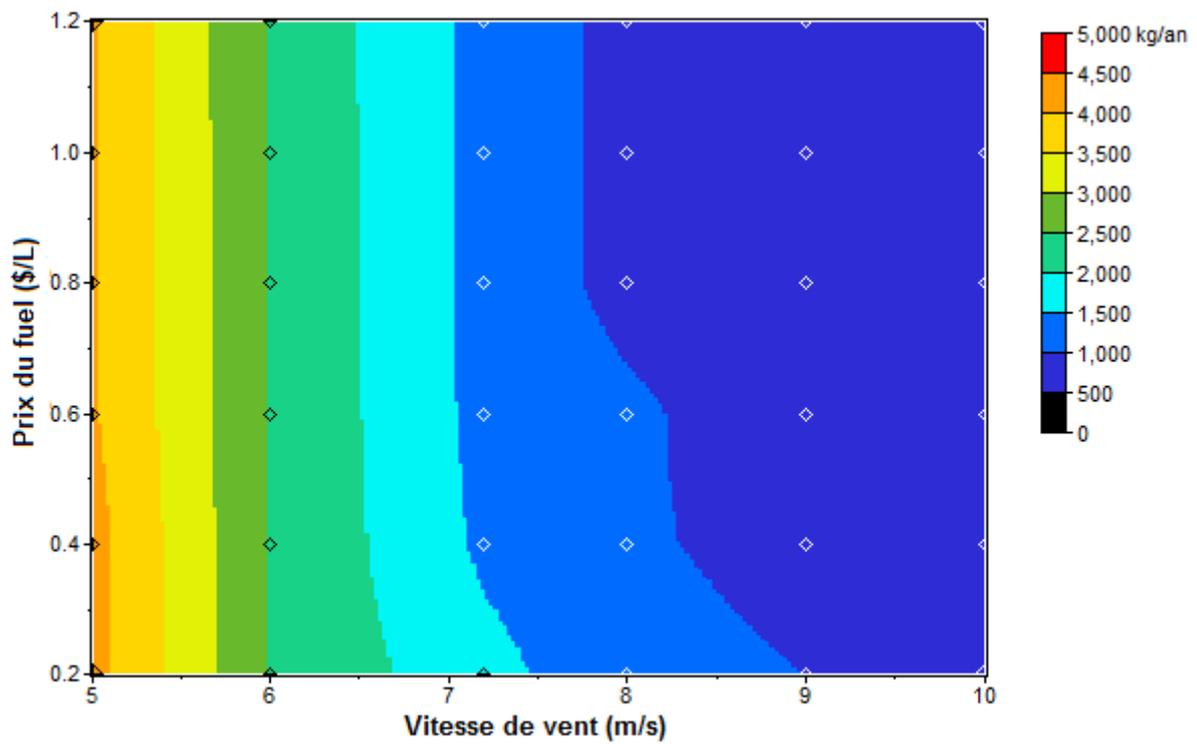


Figure VI.24 : Emissions de CO pour différents régimes

CONCLUSIONS ET RECOMMENDATIONS

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce travail de recherche a mis en évidence l'intérêt énergétique, économique et environnemental de l'utilisation de l'énergie éolienne pour le dessalement des eaux saumâtres dans trois sites isolés dans la région du Sud-ouest de l'Algérie. Avec une popularité dispersée de cette région, il y a un vaste terrain pouvant être exploité pour l'implantation des fermes éoliennes qui peuvent fournir une source durable de l'énergie pour les unités de dessalement. Il existe aussi un intérêt social car ces régions sont généralement marquées par une faible densité de population, ce qui rend l'extension des réseaux d'énergie non rentables.

Les résultats de la modélisation peuvent être résumés comme suit :

- Les productions annuelles d'énergie électrique obtenues par une turbine éolienne d'une puissance nominale de 1000 kW à Adrar, Timimoun et Tindouf sont respectivement 3329, 2891 et 2453 MWh. Les facteurs de capacité trouvés aux trois sites sont 38, 33 et 28% correspondant aux productions journalières d'eau potable de 3720, 3315,36 et 2843,52 m³/j.
- Avec une salinité d'eau d'alimentation d'environ 3000 mg/L, une vitesse moyenne de vent de 8 m/s ou plus est nécessaire pour produire une qualité d'eau suffisante (≤ 500 mg/L) pour un débit de production de 150 m³/h (3600 m³/j) dans le site d'Adrar.
- Le taux de conversion doit être optimisé pour une consommation énergétique réduite et un flux de perméation élevé. Sur la base des résultats de modélisation, la consommation énergétique spécifique obtenue dans la région d'Adrar est de 1,754 kWh/m³ pour un taux de conversion optimal d'environ 60% correspondant à un débit maximal de production de 216,43 m³/h.
- L'augmentation du débit d'alimentation au-dessus d'une certaine valeur optimale se traduira par une diminution de la production de l'eau produite suite à la réduction de la différence nette de pression due à l'augmentation de la pression osmotique par effet de polarisation de concentration.
- L'augmentation de la pression de fonctionnement conduit à l'accroissement du flux de perméation et du taux de rejet de sel. Cependant, l'augmentation de la pression au-dessus d'une certaine valeur maximale risque de causer une dégradation de la qualité de l'eau produite et un colmatage des membranes.

- L'analyse exergetique du système a démontré que le générateur éolien semble très adapté pour la région d'étude avec un rendement moyen annuel de 44,4% pour le site d'Adrar. Par ailleurs, le rendement exergetique de l'unité d'OI est faible (8,63%) et par conséquent d'importantes opportunités sont nécessaires pour l'amélioration de l'efficacité thermodynamique de l'unité de dessalement.

Par ailleurs, les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'analyse économique et environnementale du système étudié :

- L'étude de faisabilité économique confirme que le couplage des unités de dessalement par OI avec des systèmes de conversion éoliens autonomes présente une solution prometteuse pour répondre aux besoins d'énergie et en eau potable aux populations rurales qui habitent les régions isolées du sud algérien.
- L'utilisation d'un système de stockage et d'un groupe électrogène permet de mieux exploiter le potentiel éolien en termes de coût et de disponibilité, étant entendu que le bilan écologique est supposé a priori favorable.
- L'étude de comparaison entre le système hybride et le système classique (groupe électrogène seul) a révélé que même si le générateur diesel seul présente le coût d'investissement le plus faible, il en résulte des coûts nets actualisés les plus élevés de l'ensemble du projet. En outre, le générateur diesel émet plus de polluant dans l'atmosphère et fonctionne à un faible rendement (22,1%).
- Les systèmes hybrides utilisant des générateurs éoliens offrent une meilleure faisabilité économique, des émissions réduites et le groupe électrogène fonctionne à un rendement plus élevé (29%) ce qui assure une durée de fonctionnement plus longue.
- Le système hybride étudié est plus économique que le système conventionnel si le prix du kWh produit par ce dernier est fixé à 0,4 \$/kWh. Cependant, le coût net actualisé a été calculé pour une durée de vie du projet de 25 ans et un taux d'intérêt de 8%.
- L'analyse de sensibilité a confirmé que l'incorporation de la turbine éolienne est avantageuse dans tous les régimes d'analyse. Pour une charge journalière de l'ordre de 5000 kWh/j et des vitesses de vent supérieures à 9 m/s, l'exclusion du groupe électrogène s'avère bénéfique puisque les systèmes de stockage d'énergie (batteries) et les convertisseurs peuvent fournir de l'énergie électrique nettement moins coûteuse qui compensera les coûts d'investissement de ces dispositifs.

- Les coûts moyens actualisés de l'eau dessalée obtenus pour les trois sites sont respectivement 0,66 \$/m³ à Adrar, 0,70 \$/m³ à Timimoun et 0,75 \$/m³ à Tindouf. Les délais de récupération du capital investi sont très attractifs ayant pour valeurs 9, 10 et 12 ans à Adrar, Timimoun et Tindouf respectivement si le prix de vente de l'eau dessalée est estimée à 0,82 \$/m³.
- L'utilisation de l'indice de profitabilité peut fournir un outil de comparaison entre le prix de vente prévu de l'eau dessalée et les coûts actuels de consommation d'eau. Cette comparaison constitue l'un des critères possibles afin de choisir la meilleure option pour couvrir les besoins en eau d'une région spécifique. Les meilleures options sont celles avec un faible coût moyen actualisé et pour lesquelles une augmentation du prix de vente de l'eau produite conduit à un accroissement élevé de l'indice de profitabilité prévu.

Ainsi, une validation plus représentative du système ne sera possible qu'après des essais expérimentaux de prototypes qui fourniront une meilleure compréhension du système, en tenant compte notamment aux fluctuations présentes dans un système alimentée par une source intermittente extrêmement variable et imprédictible, tel que le vent.

Enfin et pour conclure, il est recommandé de :

- Combiner l'OI avec d'autres procédés de dessalement comme la distillation thermique dans une centrale hybride pour accroître davantage l'efficacité énergétique du système. Cette combinaison permettra une utilisation optimale de l'énergie et une réduction du coût de production tout en préservant la durée de vie des membranes.
- Combiner d'autres sources d'énergie avec l'éolienne tels que les panneaux solaires PV afin d'optimiser au maximum le système aussi bien du point de vue technique qu'économique.
- Utiliser des systèmes de stockage plus efficaces pour diminuer au maximum les niveaux de pertes d'énergie. Le stockage sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène par exemple occupe une place intéressante dans ce positionnement.
- Intégrer la technique de dessalement par énergie éolienne comme option dans le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique algérien ainsi que dans cadre de la planification des ressources en eau.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] 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.
- [2] www.mre.gov.dz (Site du Ministère des Ressources en Eau).
- [3] C. Larue, A. Libermann, "L'eau : une ressource en péril", Les dossiers des Yeux du Monde – Numéro 1 – Janvier 2014.
- [4] A. Maurel, "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce", 2^{ème} édition, Lavoisier Tec&Doc, 2006.
- [5] Rapport d'information déposé en application de l'article 145 du Règlement par la Commission des Affaires étrangères en conclusion des travaux d'une mission d'information constituée le 5 octobre 2010 sur « La géopolitique de l'eau ».
- [6] B. Mouhouche, "Maîtrise de la pratique de l'aridoculture comme palliatif au manque d'eau en Algérie", 9^{ème} 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.
- [7] A. Kettab, "Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision". Desalination 136 (2001) 25–33.
- [8] F. Galland, "Géopolitique du dessalement", Notes de la FRS n°18, 2008.
- [9] Desalination markets 2005–2015, "a global assessment & forecast", Global Water Intelligence, 2005.
- [10] D. Zouini, "Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse: Une solution pour l'alimentation en eau des villes côtières de l'Algérie", Revue HTE, No. 142 (2009) 78–86.

- [11] H. Boyé, "Dessalement de l'eau de mer : une ressource alternative". PCM, no 1/09 – Octobre 2009.
- [12] GWI DesalData: www.desaldata.com, Desalination Markets 2010, Desalination Finance, 2011.
- [13] J.E. Miller, "Review of Water Resources and Desalination Technologies", Sandia National Laboratories Report, SAND 2003-0800, Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- [14] M. Elimelech, "Seawater Desalination", 2012 NWRI Clarke Prize Conference, Newport Beach, California, 2 Novembre 2012.
- [15] V. Bonnélye, "Dessalement des eaux : les récentes évolutions techniques et le développement des applications en production d'eau potable", Revue HTE, No. 142 (2009) 72–77.
- [16] E. Fievez, V. Bonnélye, "Impact environnemental du dessalement : contraintes et avancées", Revue HTE, No. 142 (2009) 103–110.
- [17] L. Barozzi, D. Guidi, "Prospects for the Expansion of Solar PV Technology in the Developing Country", Rapport WWF, 1993.
- [18] A. Hänel et al., "Assessment of Non-electrified Houses in Southern Europe and Identification of PV System Requirements for Accelerated Large-Scale Deployment of Photovoltaic Energy", REDEC & APAS-RENA Contractors Meeting, Venise, Italie, pp. 402–407, 1995.
- [19] M.Z. Jacobson, "Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security", Energy & Environment Science 2 (2009) 148–173.
- [20] M.R. Islam, S. Mekhilef, R. Saidur, "Progress and recent trends of wind energy technology", Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 456–468.

- [21] S. Diaf, "Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar", revue des Energies Renouvelables, SMEE' 10, Bou Ismail Tipaza (2010) 161–172.
- [22] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, "Wind energy explained-theory, design and application", John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2002.
- [23] N.K. Merzouk, "Wind Energy Potential of Algeria". Renewable Energy 21 (2000) 553–562.
- [24] www.abhs.dz (Site de l'Agence de Bassin Hydrographique Sahara).
- [25] Y. Himri, S. Rehman, B. Draoui, S. Himri, "Wind power potential assessment for three locations in Algeria", Renewable Sustainable Energy Review 12 (2008) 2495–2504.
- [26] Y. Himri, A. Boudghene Stambouli, B. Draoui, S. Himri, "Review of wind energy use in Algeria", Renewable Sustainable Energy Review 13 (2009) 910–914.
- [27] S. Mathew, "Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics", Springer, Germany (2006).
- [28] E. Hau, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer, Germany (2006).
- [29] Z. Chen, F. Blaabjerg, "Wind Energy – The World's Fastest Growing Energy Source", IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3, (2006) 15–18.
- [30] L. Chang, "Systèmes de conversion de l'énergie éolienne", IEEE Canadian Review - Été 2002.
- [31] 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.
- [32] P. Ribeiro, B. Johnson, M. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications". Proc. IEEE. 12 (2001) 1744 –56.

- [33] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, "Solutions de stockage de l'énergie éolienne". Rapport interne, UQAR, UQAC, LREE, 01 Janvier 2006.
- [34] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley&Sons, England (2005).
- [35] N.E. Clausen, H. Bindner, S. Frandsen, J.C. Hansen, L.H. Hansen et P. Lundsager, "Isolated Systems with Wind Power An implementation Guideline", Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (2001).
- [36] I. Baring-Gould, D. Corbus, "Status of Wind-diesel Applications in Arctic Climates", Conference Paper NREL/CP-500-42401 Arctic Energy Summit Technology Conference, Anchorage Alaska, 15–18 Octobre 2007.
- [37] J.S. Giuseppe, S. Ambra , "Improving Voltage Disturbance Rejection for Variable-Speed Wind Turbines." IEEE Transactions on energy conversion 17 (2002) 422–428.
- [38] J.C. Hansen, "Wind power and small islands: ideas, theories and practical realities. Proceedings: Workshop on renewable alternative energy technologies for Bermuda and other small islands, St. George's (BM), 5–6 Juin 2000.
- [39] 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.
- [40] N. Julien, "Impacts du changement climatique sur le potentiel éolien en France : une étude de régionalisation", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Novembre 2008.
- [41] C. Dubois, "Le Guide de L'éolien, Techniques et Pratiques", Edition Groupe Eyrolles: Presses Polytechniques Romandes, CH-1015 Lausanne, 2009.
- [42] N.K. Merzouk, H. Daaou, "Atlas Energétique Eolien de l'Algérie", SIPE5, Béchar, Algérie, 2000.
- [43] G. Solari, "Wind Speeds Statistics", Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994.

- [44] C.G. Justus, A. Mikhael, "Height Variation of Wind speed and Wind Distributions Statistics", *Geophysical Research Letters* 3 (1976) 261–264.
- [45] E. Peterson, "On the Use of Power Laws Estimates of Wind Power Potential", *J. of Applied Meteorology* 17 (1978) 390–394.
- [46] L. Aiche, "Etude des Modèles d'Extrapolation Verticale du Profil du Vent", *Rapport de Stage, CDER*, 1995.
- [47] A.S. Mikhael, "Height Extrapolation of Wind Data", *Transaction of ASME*. 107 (1985) 10–14.
- [48] S. Poje, B. Cividini, "Assessment of Wind Energy Potential in Croatia", *Solar Energy* 41 (1988) 543–554.
- [49] A.P. Tamas, "Étude comparée du colmatage en Nano-filtration et en ultrafiltration d'eau de surface", *Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Canada*, 2004.
- [50] R.W. Baker, "Membrane Technology and Applications", *John Wiley & Sons Edition*, 2004.
- [51] R. Audinos, "Membranes semi-perméables: Membranes d'osmose inverse", *Techniques de l'Ingénieur, traité constantes physico-chimiques K362*, 2000.
- [52] J. Wagner, "Membrane filtration Handbook: Practical Tips and Hints", *Edition Osmonics*, 2001.
- [53] G. Morales, M. Barrufet, "Desalination of produced water using reverse osmosis", *J.GasTIPS*, summer (2002) 13–17.
- [54] B. Liberman, "The importances of energy recovery devices in reverse osmosis desalination", *The Future of Desalination in Texas-Volume 2: Technical Papers, Case Studies, and Desalination Technology Resources*, 2004.

- [55] P. Corsin, "Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse: les vrais besoins en énergie", *l'eau, l'industrie, les nuisances*, No. 262 (2005) 57–61.
- [56] G. Migliorini, E. Luzzo, "Seawater reverse osmosis plant using the pressure exchanger for energy recovery: a calculation model", *Desalination*, 165 (2004) 289–298.
- [57] P. Danis, "Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés", J2700, 2003.
- [58] S. Bertrand, "Osmose Inverse: Technologie, Manuel du cours intensif sur techniques à membranes et dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : principes-état de l'art", Tunis (Tunisie) 23–27 Février 2004.
- [59] E. Riboni, "Conception d'une nouvelle installation: Méthodologie- Déroulement d'un projet- Spécifications", Cours de formation continue, Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique, 2002.
- [60] Le Guern, P. Lachassagne, Y. Noël, F. Persin et I. De Buysscher, "Dessalement et recharge artificielle : synthèse technico-économique", Rapport BRGM/RP-52262-FR, 2003, 80 p.
- [61] P. Corsin, "État des développements en matière de dessalement de l'eau de mer par procédés membranaires", *Revue HTE*, No. 142 (2009) 31–37.
- [62] A. Maurel, "Osmose inverse et ultrafiltration : I- Considérations théoriques ", *Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés*, J2790, 1974.
- [63] K.A. Al-Shayji, "Modeling, Simulation and Optimization of Large-Scale commercial desalination plant", Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique et Université d'état de Virginie, États-Unis, Avril 1998.
- [64] A. Maurel, "Osmose inverse et ultrafiltration : II- Technologie et applications", *Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés*, J2796, 1988.

- [65] A. Philip Schweitzer, "Handbook of Separation Techniques for Chemical", 2^{ème} édition, McGraw-Hill Book Co., New York (1988) 2–98.
- [66] P. Aimar, P. Bacchin, A. Maurel, "Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) -Aspects théoriques : perméabilité et sélectivité", Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés, J2790, 2010
- [67] A. Maurel, "Osmose Inverse et Ultrafiltration: II- Technologie et Application", Techniques de l'Ingénieur, Imprimerie Strasbourgeoise, 1996.
- [68] G. Cyrille, L. Bernard, "Eau-Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres", Encyclopædia Universalis, Albin Michel, Paris, 2002.
- [69] E. Mathioulakis, V. Belessiotis, E. Delyannis, "Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art", Desalination 203 (2007) 346–365.
- [70] E. Tzen, "Wind and Wave Energy for Reverse Osmosis", Seawater Desalination Green Energy and Technology (2009) 213–245.
- [71] 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.
- [72] B.G. Keeper, R.D. Hembree, F.C. Schrack, "Optimized matching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination", Desalination 54 (1985) 89–103.
- [73] 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.
- [74] L. Garcia-Rodriguez, "Seawater desalination driven by renewable energies: a review", Desalination 143 (2002) 103–113.

- [75] I.M.A. Peral, A.C. Gómez, 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.
- [76] F. Palma, "Photovoltaic powered sea water desalination unit", Proc. New technologies for the Use of Renewable Energy Sources in Water Desalination, Athens, 1991.
- [77] J. Huggins, J. Dunlop, L. Demetrius, "Photovoltaic-powered reverse osmosis water desalination", Proc. International Desalination Association (IDA) World Congress, Abu Dhabi, 5 (1995) 381–396.
- [78] 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.
- [79] M.S. Mohsen, J.O. Jaber, "A photovoltaic powered system for water desalination", Desalination 138 (2001) 129–136.
- [80] D. Herold, A. Neskakis, "A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria", Desalination 137 (2001) 285–292.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] M. Thomson, D. Infield, "A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries", Desalination 153 (2002) 1–8.
- [84] G. Petersen, S. Fries, J. Mohn, A. Müller, "Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units — description of two demonstration projects", Desalination 31 (1979) 501–509.

- [85] G. Petersen, S. Fries, J. Mohn, A. Müller, "Wind and solar powered reverse osmosis desalination- design, start up, operating experience", *Desalination* 39 (1981) 125–135,
- [86] R. Robinson, G. Ho, K. Mathew, "Development of a reliable low-cost reverse osmosis desalination unit for remote communities", *Desalination* 86 (1992) 9–26.
- [87] W. Graef, "ROWEP — Reverse Osmosis–Wind Energy Program", *Proc. International Desalination Association (IDA) World Con-gress, Abu Dhabi, 5 (1995) 311–323.*
- [88] H. Ehmann, A. Wobben, 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.*
- [89] K. Tahri, "The prospects of fresh water supply for Tan-Tan City from non-conventional water resources", *Desalination*, 135 (2001) 43–50.
- [90] L. Garcia-Rodriguez, V. Romero-Ternero, C. Gómez-Camacho, "Economic analysis of wind-powered desalination", *Desalination* 137 (2001) 259–265.
- [91] 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.
- [92] S. A. Kershman, J. Rheinländer 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.
- [93] M.S. Miranda, D. Infield, "A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries", *Desalination* 153 (2002) 9–16.
- [94] P.C.M. Carvalho, "Reverse osmosis plant powered by photovoltaic and wind energy in isolated operation", *Dr.-Ing dissertation, University of Paderborn, Germany, 1997*
- [95] G. Petersen, S. Fries, J. Mohn, A. Müller, "Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units—description of two demonstration projects", *Desalination* 31 (1979) 501–509.

- [96] G. Petersen, S. Fries, J. Mohn, A. Müller, "Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units—design, start up, operating experience", *Desalination* 39 (1979) 125–135.
- [97] 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.
- [98] S.A. Kershman, J. Rheinländer, 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.
- [99] S.A. Kershman, J. Rheinländer, 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.
- [100] E.S. Mohamed, G. Papadakis, "Design, simulation and economic analysis of a standalone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics", *Desalination* 164 (2004) 87–97.
- [101] 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.
- [102] M. Folley, B. Penate Suarez, T. Whitteker, "An autonomous wave-powered desalination system", *Desalination* 220 (2008) 412–421.
- [103] A. Maurel, "Desalination by RO using RE (solar & wind): Cadarache Center Experience", *Proceedings of the New Technologies for the Use of RE Sources in Water Desalination*, Grèce, 1991, pp. 17–26.
- [104] European Commission, *Desalination guide Using Renewable Energies*, 1998.
- [105] R. Morris, "Renewable Energy Powered Desalination Systems in the Mediterranean Region", *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO*, (1999).

- [106] E. Tzen, D. Theofiloyianakos, Z. Kologios, "Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned", *Desalination* 221 (2008) 29–36.
- [107] ADU RES Project, INCO Programme, MPC-1-50-9093, "Autonomous Desalination Units Using RES", WP2 Report, (2005).
- [108] M. Papapetrou, C. Epp, E. Tzen, "Autonomous Desalination Units based on RE Systems-A Review of Representative Installations Worldwide", *Solar Desalination for the 21st Century*, Springer (2007) 343–353.
- [109] K. Paulsen, F. Hensel, "Design of an autarkic water and energy supply driven by RE using commercially available components", *Desalination* 203 (2007) 455–462.
- [110] M. Enzili, "Wind Energy in Morocco, Potential and Projects", CDER, presented in EWEC Con-ference, Athens, Greece, 2006.
- [111] Q. Ma, H. Lu, "Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art", *Desalination* 277 (2011) 274–280.
- [112] P. Feron, "Use of wind power in autonomous reverse osmosis seawater desalination", *Wind Engineering* 9 (1985) 180–199.
- [113] J.A. Carta, J. Gonzalez, V. Subiela, "Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in Canary Islands", *Solar Energy* 75 (2003) 153–168.
- [114] G.L. Park, A.I. Schäfer, B.S. Richards, "Renewable energy powered membrane technology: The effect of wind speed fluctuations on the performance of a wind-powered membrane system for brackish water desalination", *Journal of Membrane Science* 370 (2011) 34–44.
- [115] S. M. Habali, I. A. Saleh, "Design of stand-alone brackish water desalination wind energy system for Jordan", *Solar energy* 52 (1994) 525–532.

- [116] C.T. Kiranoudis, N.G. Voros, Z.B. Maroulis, "Wind energy exploitation for reverse osmosis desalination plants", *Desalination* 109 (1997) 195–209.
- [117] D. Voivontas, K. Yannopoulos, K. Rados, A. Zervos, D. Assimacopoulos, "Market potential of renewable energy powered desalination systems in Greece", *Desalination* 121 (1999) 159–172.
- [118] D. Voivontas, K. Misirlis, E. Manoli, G. Arampatzis, D. Assimacopoulos, A. Zervos, "A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies", *Desalination* 133 (2001) 175–198.
- [119] V. Romero-Ternero, L. García-Rodríguez, C. Gómez-Camacho, "Thermoeconomic analysis of wind powered seawater reverse osmosis desalination in the Canary Islands", *Desalination* 186 (2005) 291–298.
- [120] P.A. Koklas, S.A. Papathanassiou, "Component sizing for an autonomous wind-driven desalination plant", *Renewable Energy* 31 (2006) 2122–2139.
- [121] M. Forstmeier, F. Mannerheim, F. D'Amato, M. Shah, Y. Liu, M. Baldea, A. Stella, "Feasibility study on wind-powered desalination", *Desalination* 203 (2007) 463–470.
- [122] C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas, "Renewable energy driven desalination systems modeling", *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 449–464.
- [123] D. Zejli et al., "Economic feasibility of a 11-MW wind powered reverse osmosis desalination system in Morocco", *Desalination and Water Treatment* 18 (2010) 164–174.
- [124] I.D. Spyrou, J.S. Anagnostopoulos, "Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit", *Desalination* 257 (2010) 37–149.
- [125] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, "Design optimization of desalination systems powersupplied by PV and W/G energy sources", *Desalination* 258 (2010) 171–181.

- [126] K. Bourouni, T. Ben M'Barek, A. Al Taei, "Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithm", *Renewable Energy* 36 (2011) 936–950.
- [127] J. Käufler, R. Pohl, H. Sader, "Seawater desalination (RO) as a wind powered industrial process—Technical and economical specifics", *Desalination and Water Treatment* 31 (2011) 359–365.
- [128] F. Vince, F. Marechal, E. Aoustin, P. Bréant, "Multi-objective optimization of RO desalination plants", *Desalination* 222 (2008) 96–118.
- [129] A. Zhu, "Effect of Thermodynamic Restriction on Energy Cost Optimization of RO Membrane Water Desalination", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48 (2009) 6010–6021.
- [130] J.P. MacHarg, S.A. McClellan, "Pressure exchanger helps reduce energy costs in brackish water RO system", *Journal American Water Works Association* 96 (2004) 44–48.
- [131] F. Morenski, "Current pretreatment requirements for reverse osmosis membrane applications", *Proceedings of the 53rd International Water Conference, Pittsburgh Hilton and Towers, 19–21 Octobre, 1992*, pp. 325–330.
- [132] J. Gilron, Y. Folkman, R. Savliev, M. Waisman, O. Kedem, "WAIV—wind aided intensified evaporation for reduction of desalination brine volume", *Desalination* 158 (2003) 205–214.
- [133] S. Walker, P. Mattausch, A. Abbott, "Reverse osmosis treatment facilities: Innovative post-treatment stabilization solutions", *Florida Water Resources Journal* 59 (11) (2007) 35–37.
- [134] S. Diaf, "Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Polytechnique, Alger, 2009.

- [135] S. Diaf, "Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar". Le 1^{er} Séminaire sur l'énergie éolien, SMEE'2010, Tipaza, 11–12 Avril 2010.
- [136] B. Bagen, "Reliability and Cost/Worth Evaluation of Generating Systems Utilizing Wind and Solar Energy", Thèse de doctorat, Université de la Saskatchewan, Canada, 2005.
- [137] N.K. Merzouk, "Évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Mai 2006.
- [138] <http://www.worldwidewindturbines.com/en/wind-turbines/wind-turbine-manufacturers/aaer/700-1400kw/a-1000s/>
- [139] C.J. Geankoplis, "Transport Processes and Unit Operations, Prentice-Hall International", New Jersey, Ch. 13, 1993.
- [140] P. Sarkar, D. Goswami, S. Prabhakar, P.K. Tewari, "Optimized design of a reverse osmosis system with a recycle", *Desalination* 230 (2008) 128–139.
- [141] S.P. Agashichev, "Reverse osmosis at elevated temperatures; influence of temperature on degree of concentration polarization and transmembrane flux", *Desalination* 179 (2005) 61–72.
- [142] A.R. Da Costa, A.G. Fane, D.E. Wiley, "Spacer characterization and pressure drop modelling in spacer-filled channels for ultrafiltration", *Journal of Membrane Science* 87 (1994) 79–98.
- [143] N. Al-Bastaki, A. Abbas, "Permeate recycle to improve the performance of a spiral-wound RO plant", *Desalination* 158 (2003) 119–126.
- [144] S. Sourirajan, "Reverse Osmosis", Academic Press, New York, 1970.
- [145] Z. Amor, S. Malki, M. Taky, B. Bariou, N. Mameri, A. Elmidaoui, "Optimization of fluoride removal from brackish water by electro dialysis", *Desalination* 120 (1998) 263–271.

- [146] G. Schock, A. Miquel, "Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules", *Desalination* 64 (1987) 339–352.
- [147] J.E. Ahern, "Method of Energy Systems Analysis", John Wiley: New York, 1980.
- [148] Y.A. Cengel, M.A. Boles, "Thermodynamics: an engineering approach", 4th edition, McGraw-Hill, 2002.
- [149] C. Koronreos, E. Katapodi, "Exergy analysis of the wind power hydrogen and electricity production", Proceedings of the 2006 European Wind Energy Conference & Exhibition Athens, Greece, 27 Février–2 Mars 2006.
- [150] X. Wang and Y. Tang, "Exergetic analysis on the two-stage reverse osmosis seawater desalination system", *Desalination and Water Treatment* 51 (2013) 2862–2870.
- [151] A. Criscuoli, E. Drioli, "Energetic and exergetic analysis of an integrated membrane desalination system", *Desalination* 124 (1999) 243–249.
- [152] H. Mehdizahed, "Membrane desalination plant from an energy-exergy viewpoint", *Desalination* 191 (2006) 200–209.
- [153] M. Wilf, K. Klinko, "Optimization of seawater RO systems design", *Desalination* 138 (2001) 299–306.
- [154] J.A.G.C.R. Pais, L.M. Gando-Ferreira, "Estimation in reverse osmosis seawater desalination", *Desalination and Water Treatment* 1 (2009) 82–87.
- [155] A. Zhu, P.D. Christofides, Y. Cohen, "Minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: Effect of energy recovery membrane rejection and retentate recycling", *Journal of Membrane Science* 339 (2009) 126–137.
- [156] S.A. Avlonitis, D.A. Avlonitis, T.H. Panagiotidis, "Experimental study of the specific energy consumption for brackish water desalination by reverse osmosis", *International Journal of Energy Research* 36 (2012) 36–45.

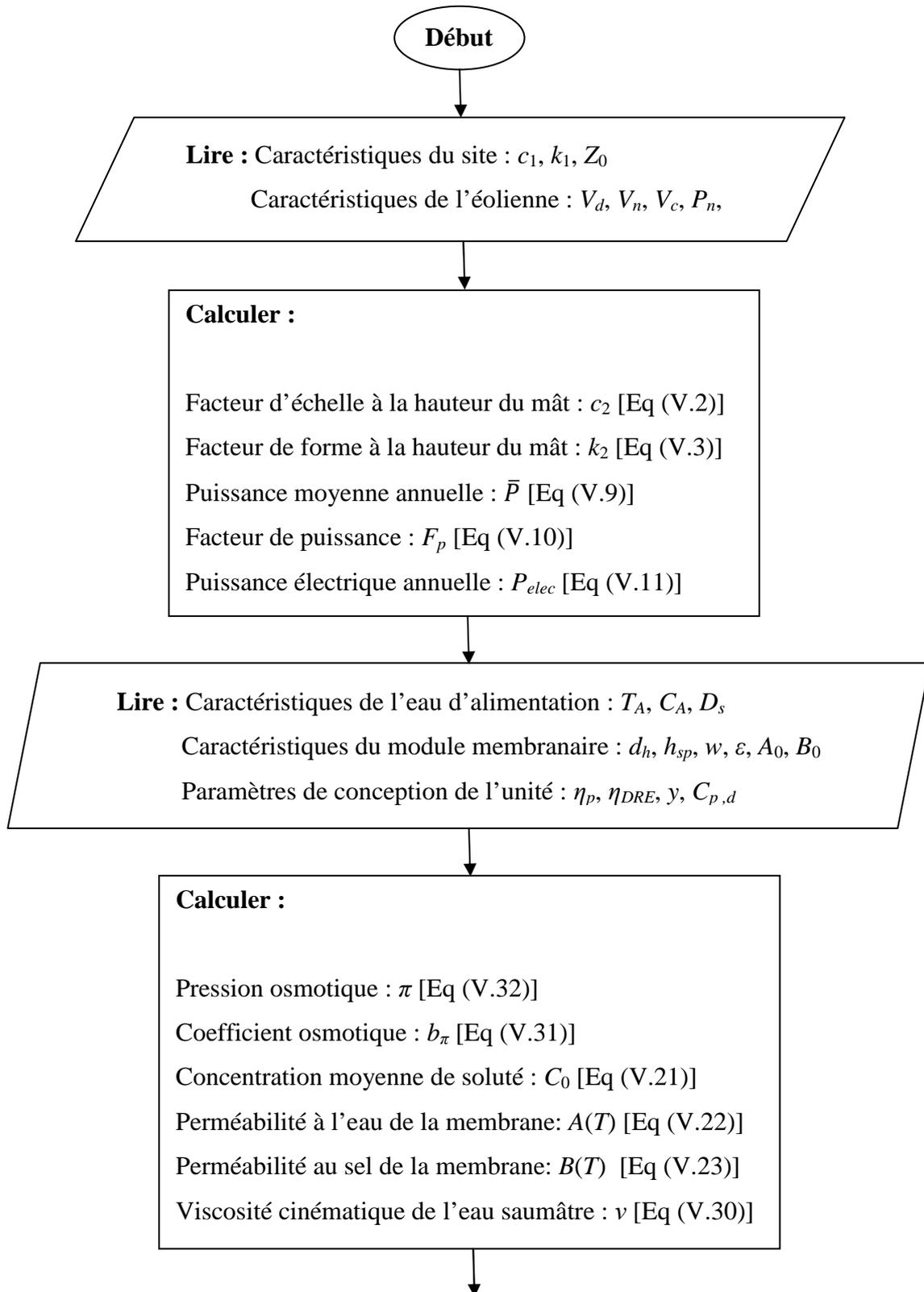
- [157] A. Abbas, "Simulation and analysis of an industrial water desalination plant", *Chemical Engineering and Processing* 44 (2005) 999–1004.
- [158] Y. Cerci, "Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California", *Desalination* 142 (2002) 257–266.
- [159] I.H. Aljundi, "Second-law analysis of a reverse osmosis plant in Jordan", *Desalination* 239 (2009) 207–215.
- [160] J.B Gravel, "Analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïques et éoliens", Mémoire de Maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, Décembre 2011.
- [161] R. W. Wies, A. N. Agrawal "Integration of Wind-Turbine Generators (WTGs) into Hybrid Distributed Generation Systems in Extreme Northern Climates", *Proceedings of the 2003 International Yukon Wind Energy Conference: Cold Climate Opportunities*, 2003.
- [162] S. Diaf, D. Diaf, "Evaluation du potentiel éolien et estimation de la production d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar", Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE'2010, Constantine, Algérie, 6–7 Décembre 2010
- [163] K. Bae, J.H. Shim, "Economic and Environmental Analysis of a Wind Hybrid Power System with Desalination in Hong-do, South Korea", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13 (2012) 623–630.
- [164] I. Kamwa, B. Saulier, "Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome ", Rapport N°IREQ 4340, Varennes, Canada, 1989.
- [165] B. Tammam, "Étude de faisabilité d'un jumelage éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé", Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Canada, Février 2009.
- [166] S.K. Djohra, "Étude technique, économique et environnementale des systèmes décentralisés connectés au réseau électrique", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Novembre 2011.

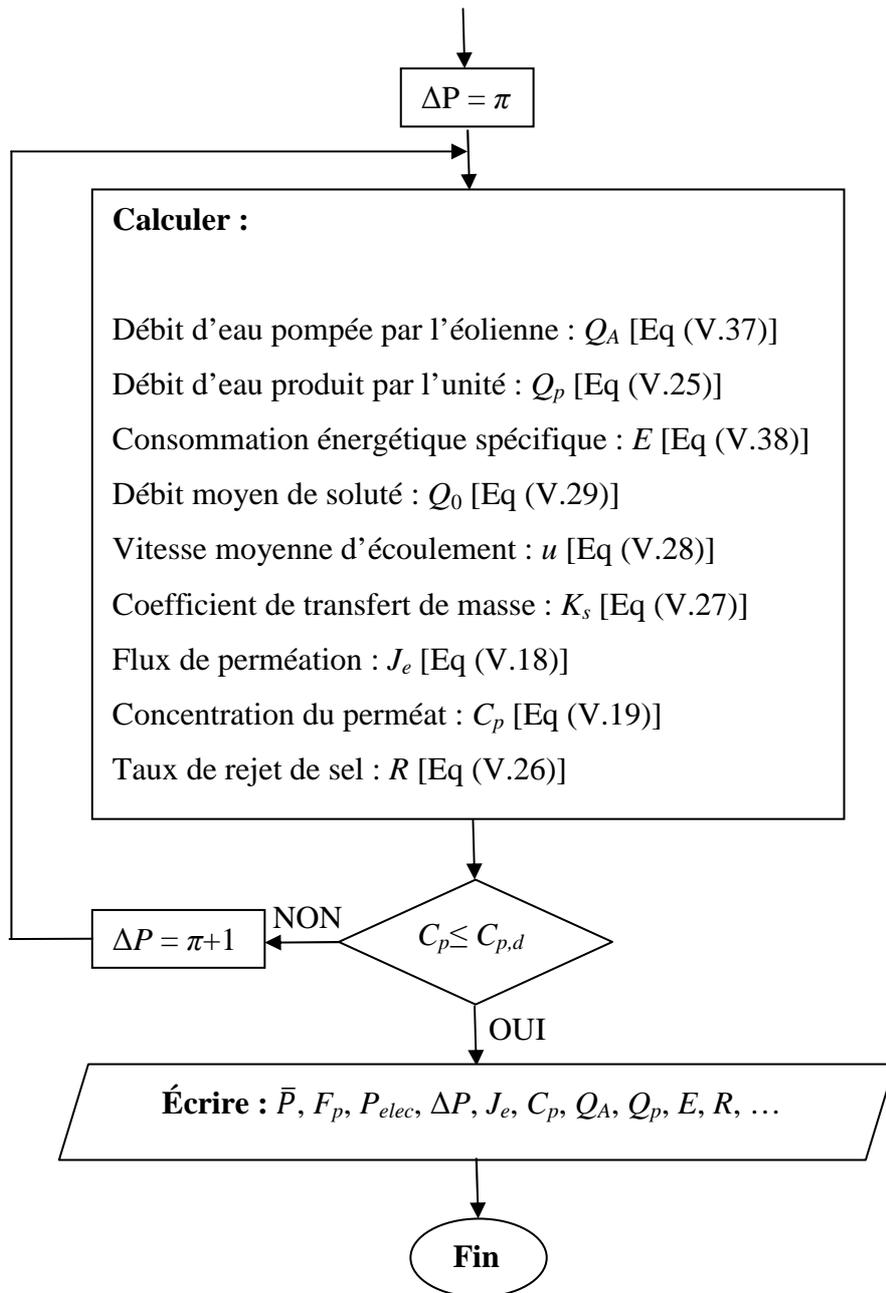
- [167] M. Metaiche, "Optimisation des systèmes de dessalement par osmose inverse : conception, paramètres de fonctionnement et simulation numérique", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 2007.
- [168] D. Zejli, R. Benchrifa, A. Bennouna, K. Zazi, "Economic analysis of wind powered desalination in the south of Morocco", *Desalination* 165 (2004) 219–230.
- [169] M.E. Clayton, S.A. Stillwell, E.M. Webber, "Implementation of brackish ground-water desalination using wind-generated electricity as a proxy for energy storage: A case study of the energy-water Nexus in Texas", *Proceedings of the 12th International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Colorado, USA, 11–17 Novembre 2011.
- [170] R.G. Raluy, L. Serra, J. Uche, A. Valero, "Life cycle assessment of water production technologies. Part 2: Reverse osmosis desalination versus Ebro River water transfer", *International Journal of Life Cycle Assessment* 10 (2005) 346–354.
- [171] E. Friedrich, "Environmental Life Cycle Assessment of Potable Water Production", University of Natal, South Africa, 2001.
- [172] J. Stokes, A. Horvath, "Life cycle energy assessment of alternative water supply systems", *International Journal of Life Cycle Assessment* 11 (2005) 335–343.
- [173] R.G. Raluy, L. Serra, J. Uche, "Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies", *Desalination*, 183 (2005) 81–93.
- [174] H. Udo de Haes, R. Heijungs, S. Suh, G. Huppes, "Three strategies to overcome the limitations of LCA", *Journal of Industrial Ecology* 8 (3) (2004) 19–32.
- [175] J. Payet, "Assessing Toxic Impacts On Aquatic Ecosystems In Life Cycle Assessment", Swiss Federal School of Technology, 2004.
- [176] I.E. Grossmann, "MINLP Optimization Strategies and Algorithms for Process Synthesis", *Foundations of Computer-aided Process Design*, 1990.

ANNEXES

ANNEXE A

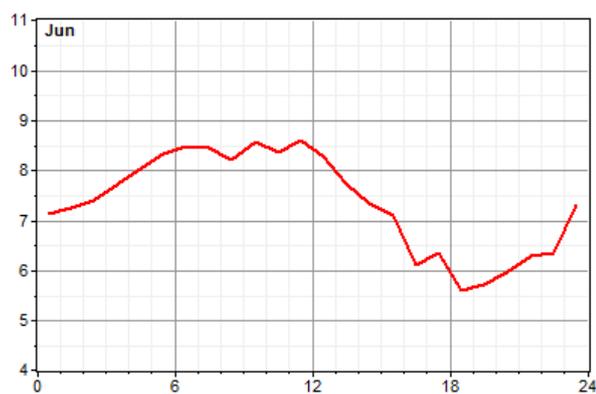
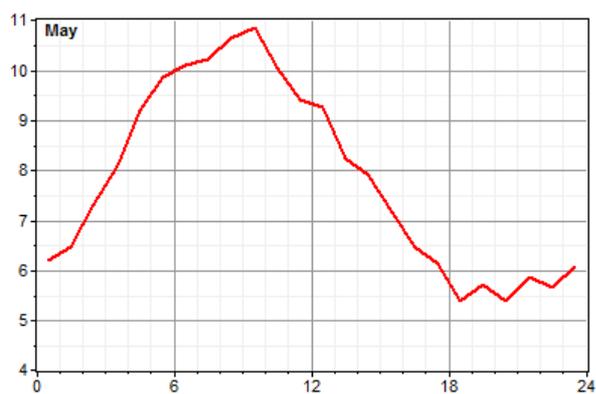
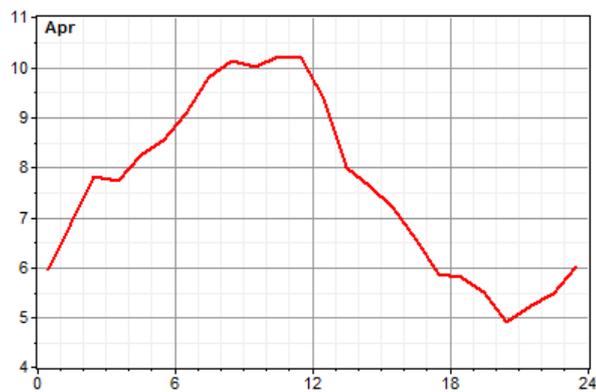
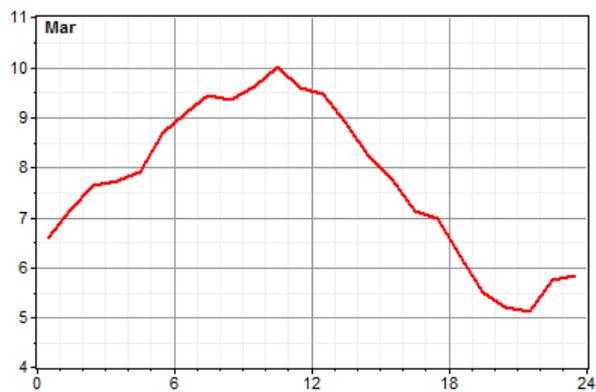
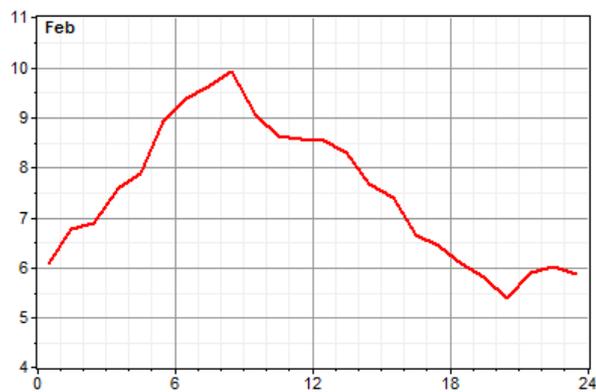
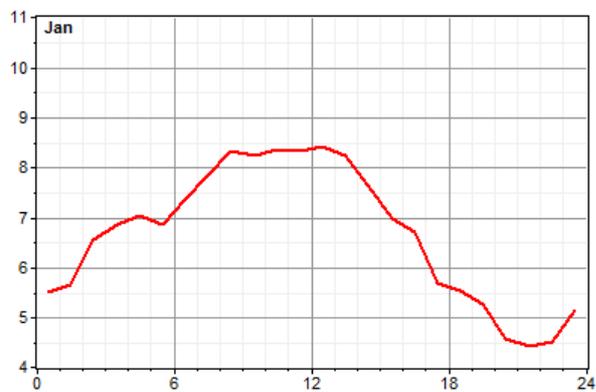
Organigramme de calcul

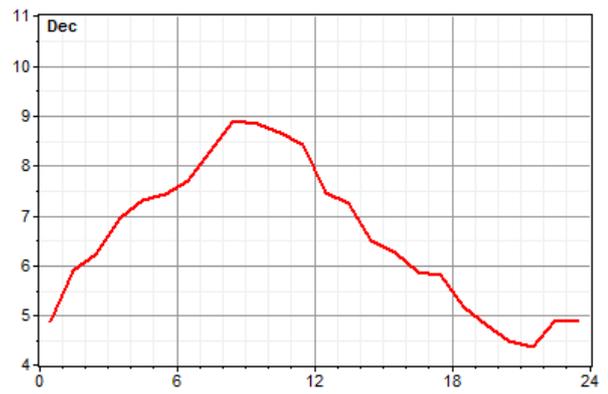
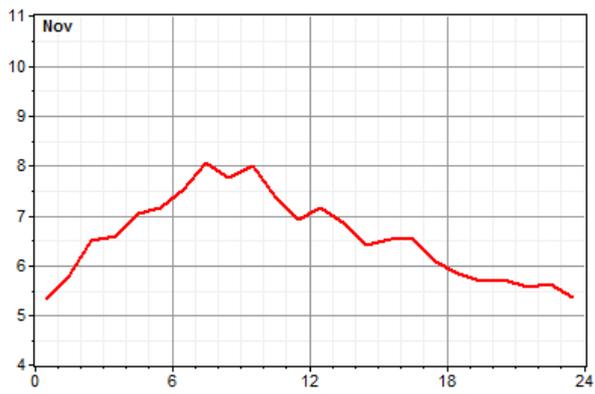
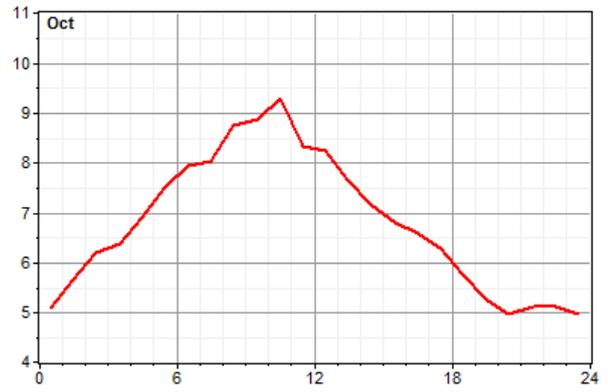
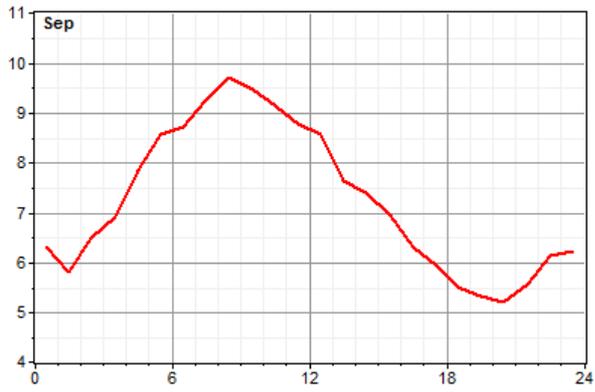
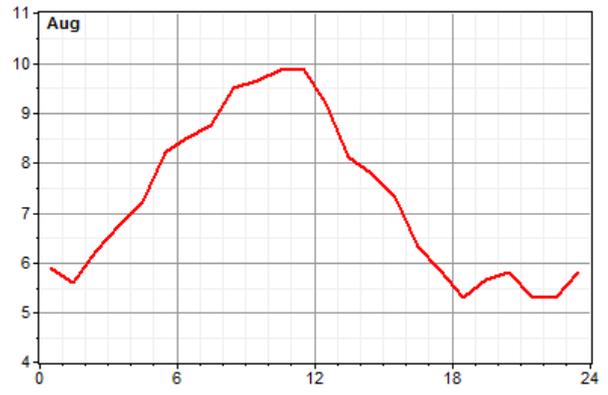
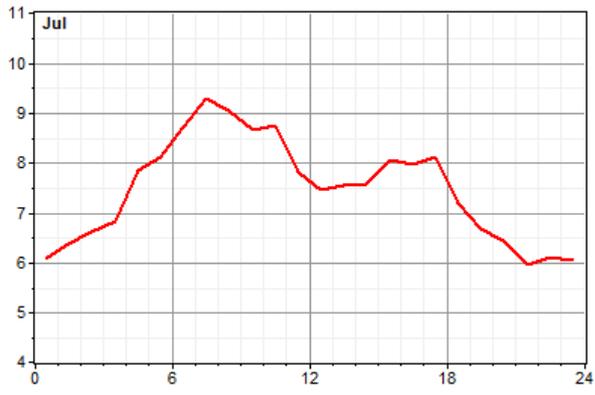




ANNEXE B

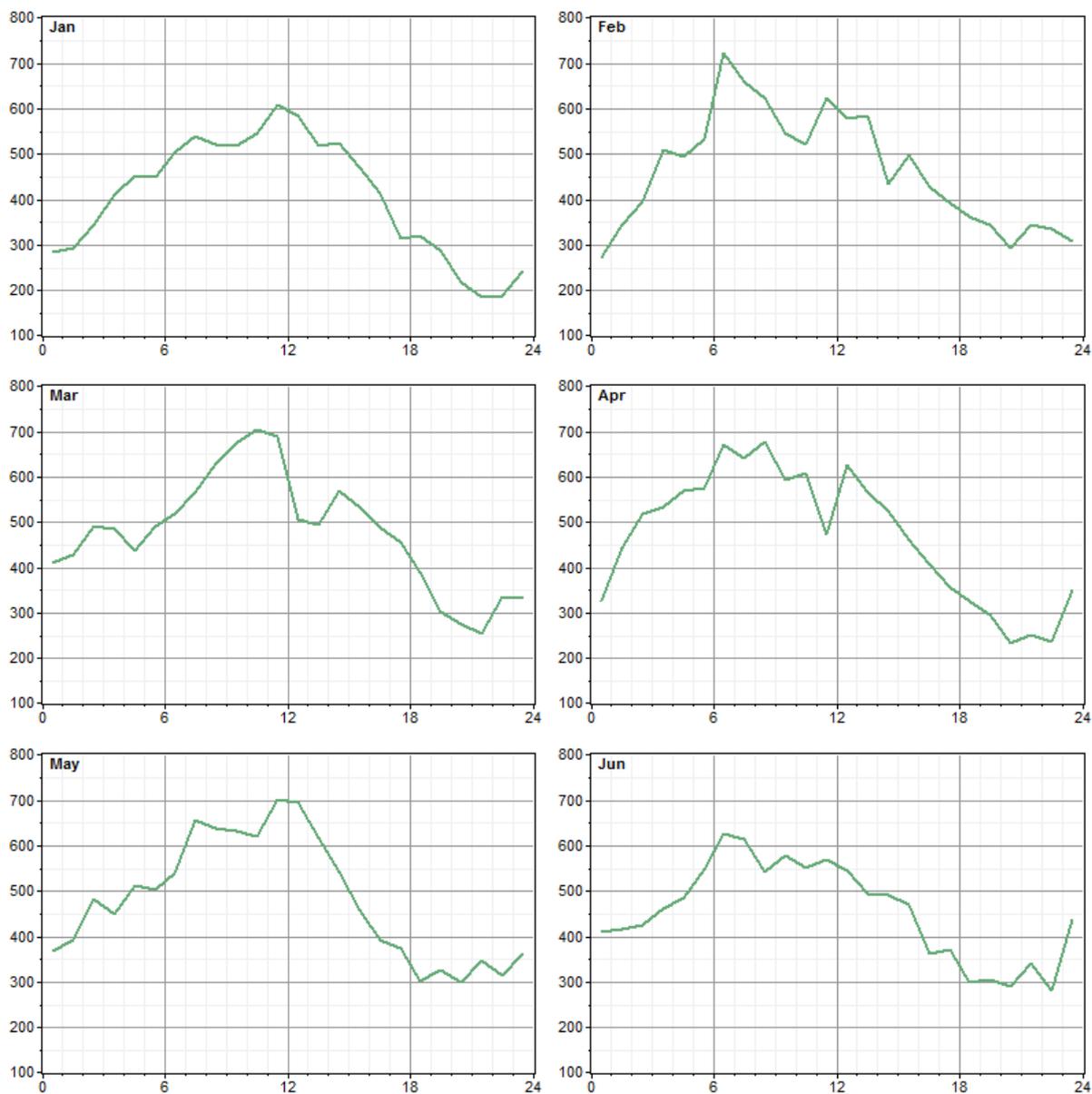
Distribution journalière des vitesses moyennes mensuelles du vent (Adrar)

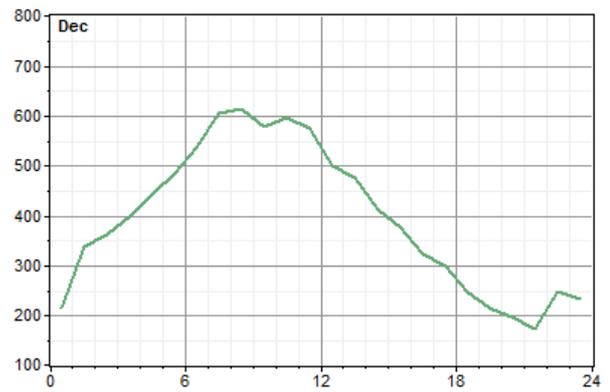
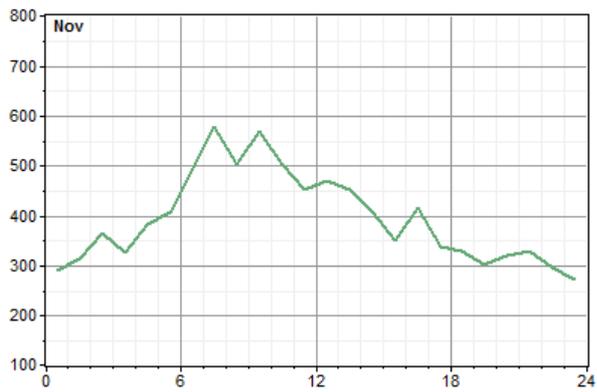
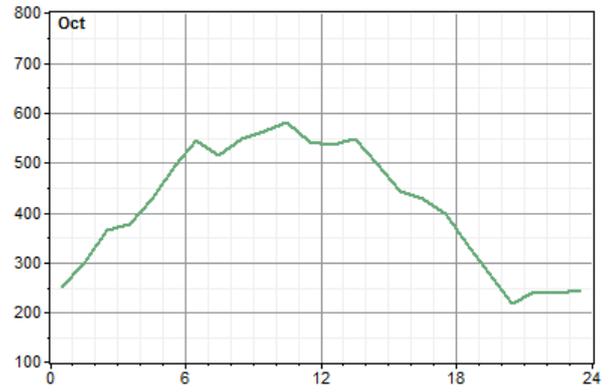
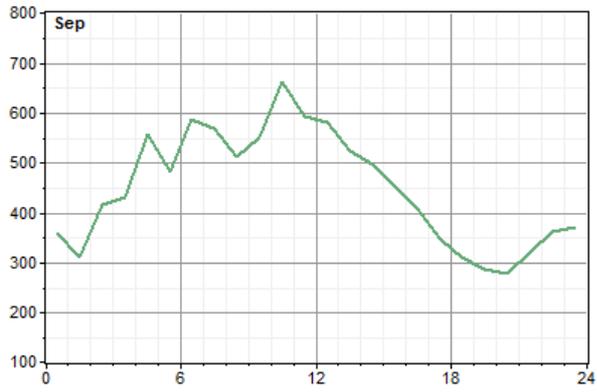
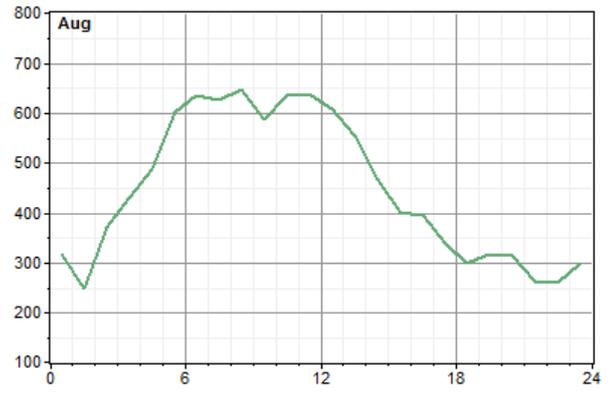
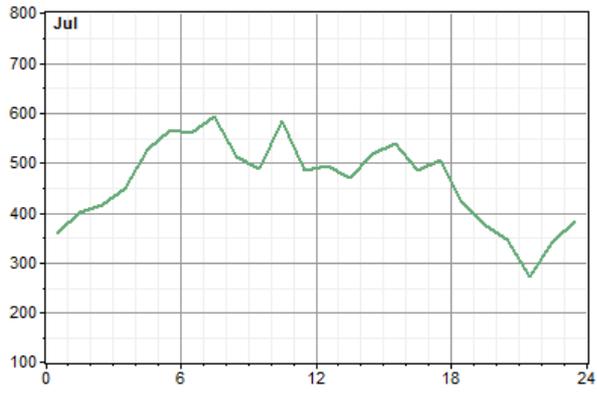




ANNEXE C

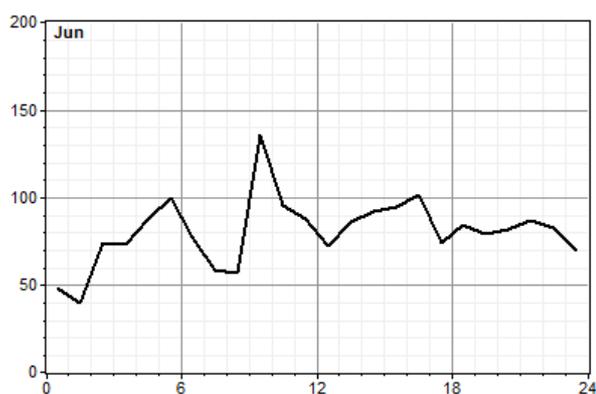
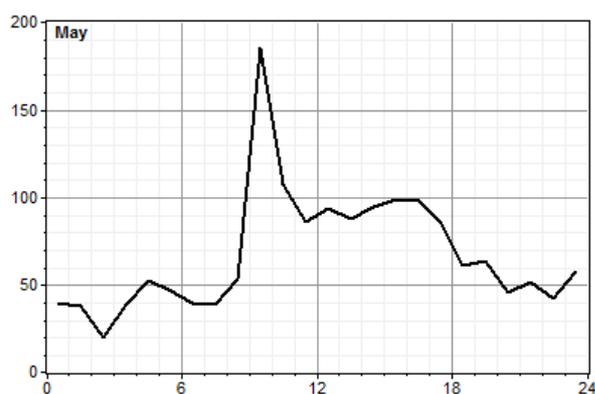
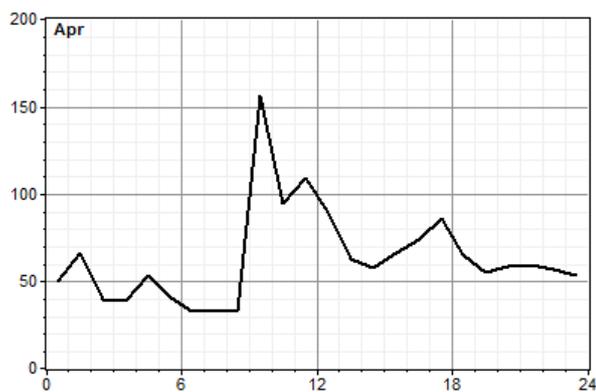
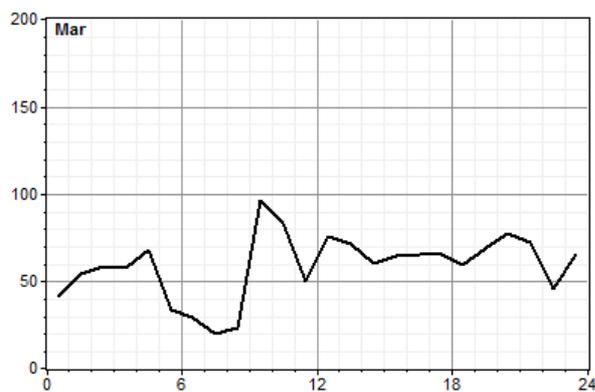
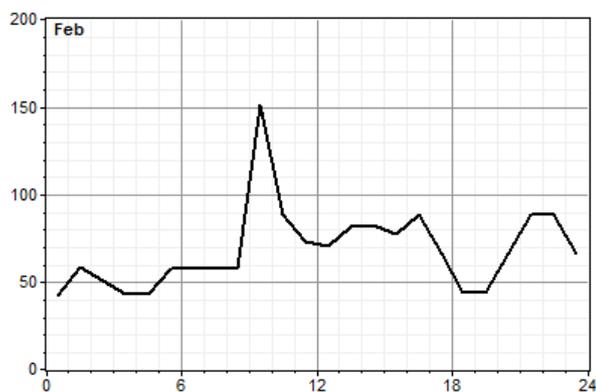
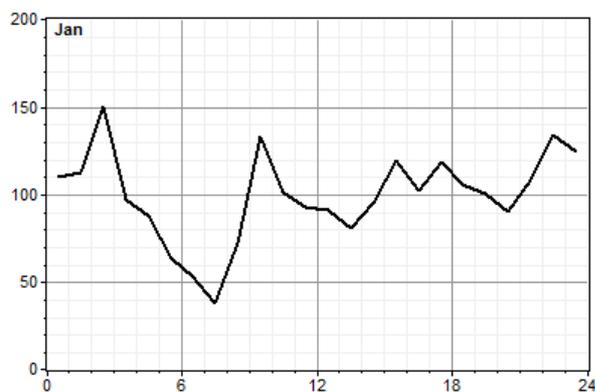
Distribution journalière des puissances moyennes mensuelles délivrée par la turbine éolienne (Adrar)

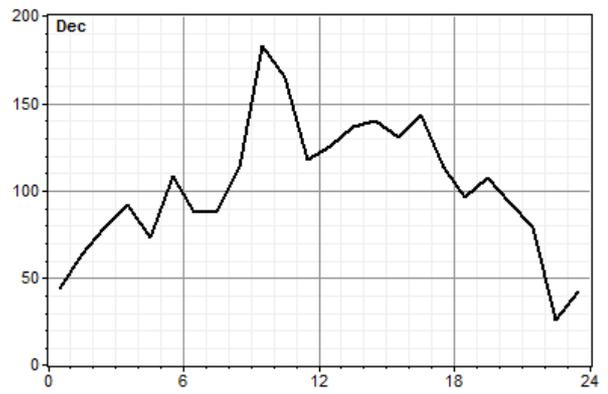
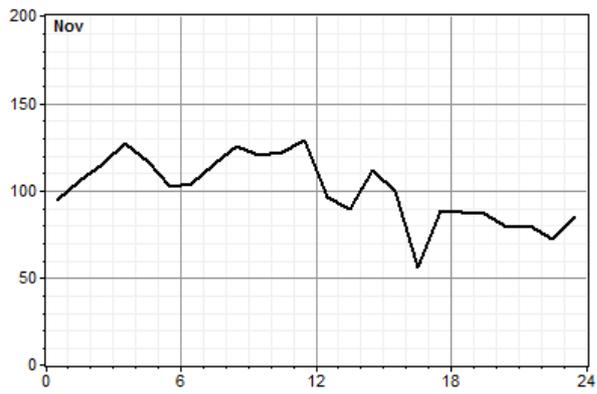
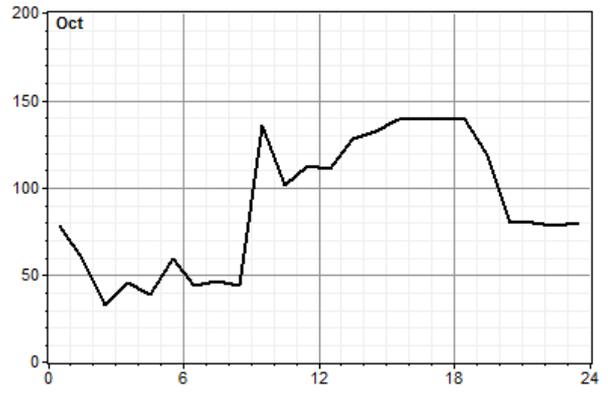
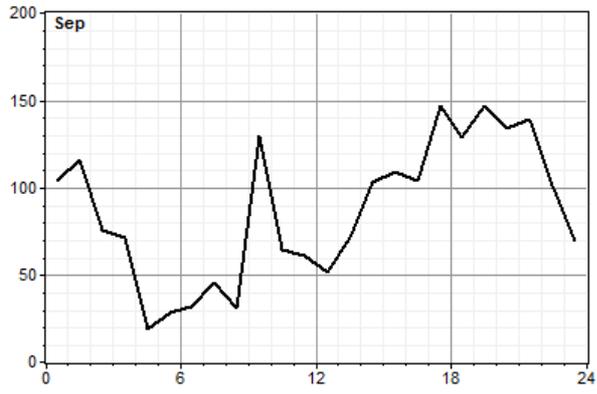
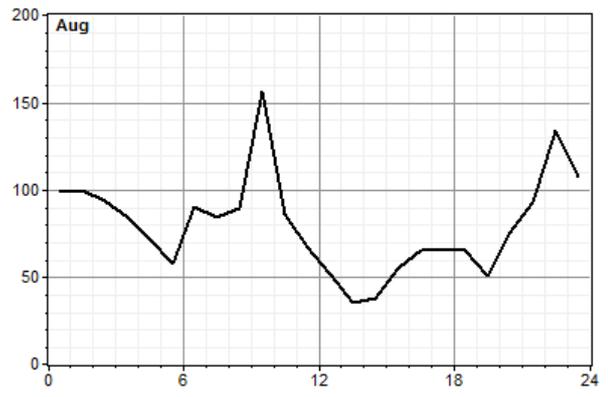
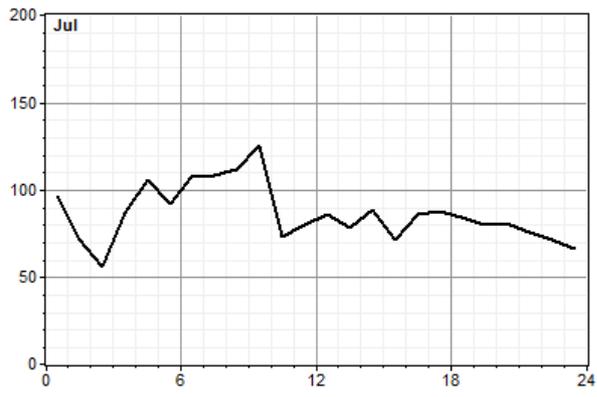




ANNEXE D

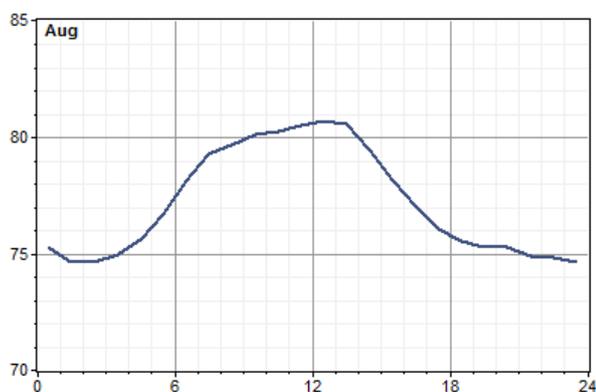
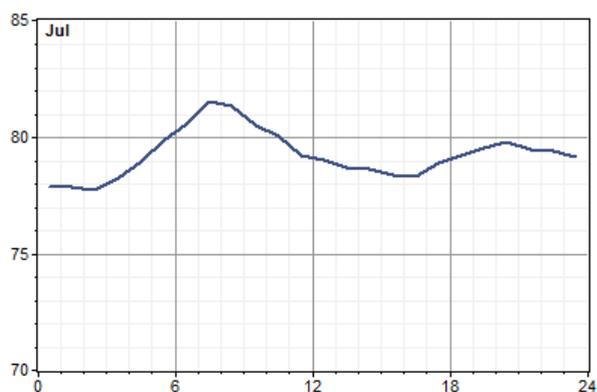
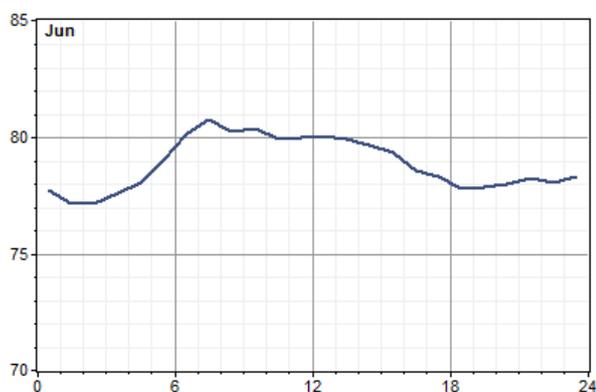
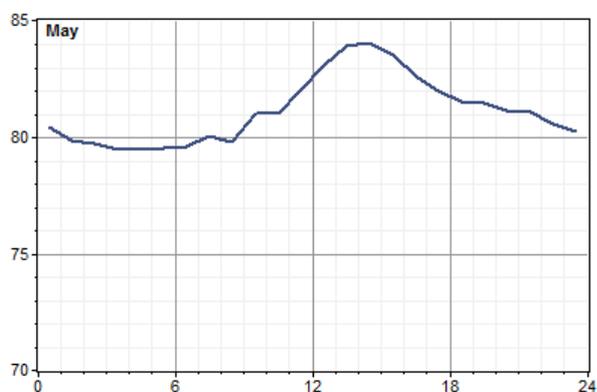
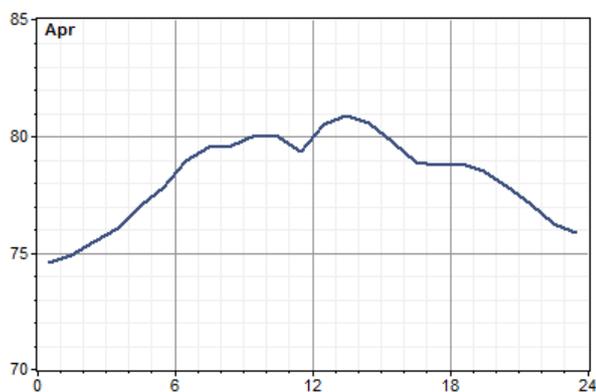
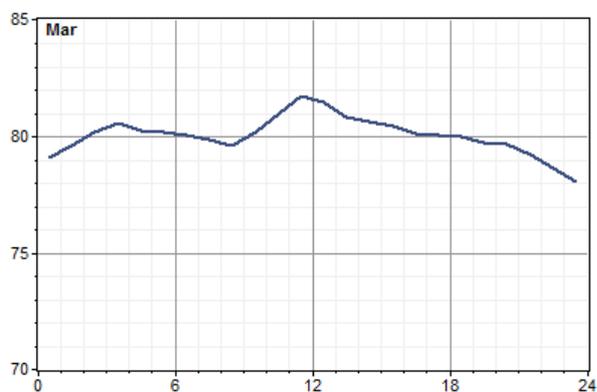
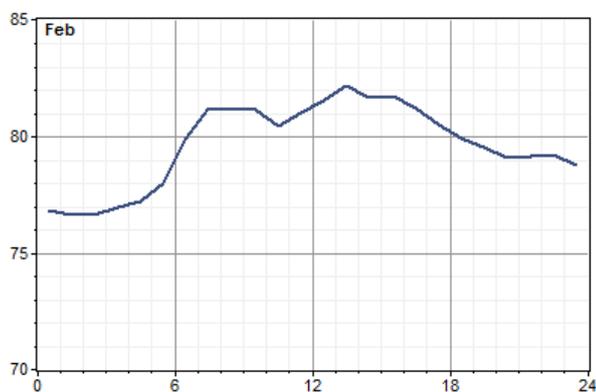
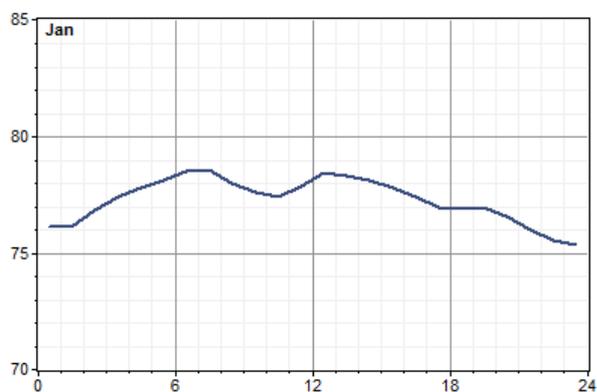
Distribution journalière des puissances moyennes mensuelles délivrées par le groupe électrogène (Adrar)

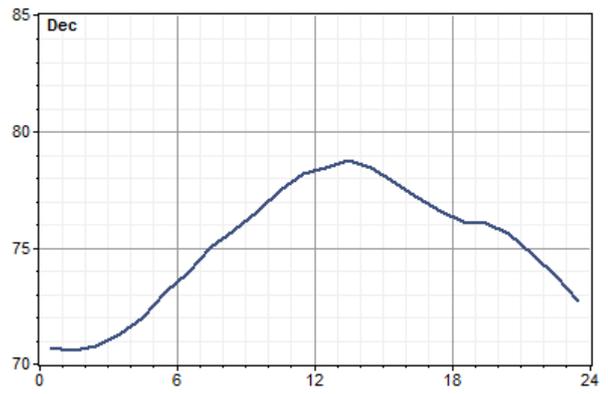
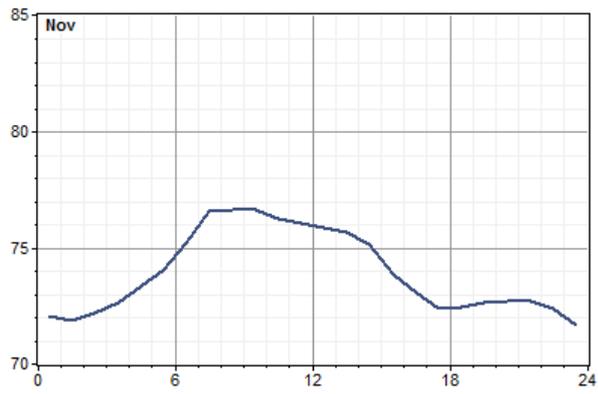
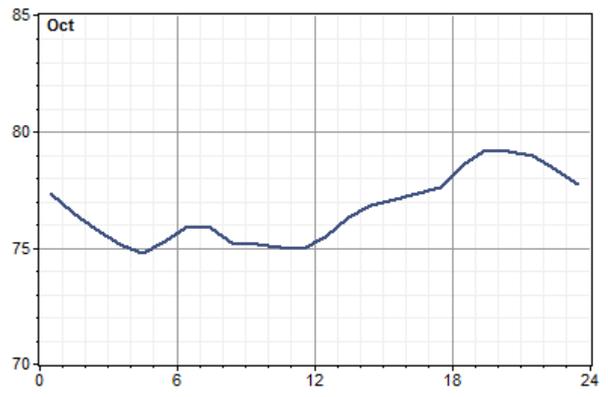
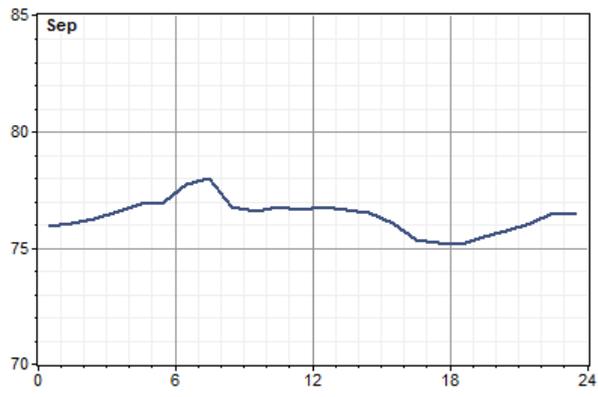




ANNEXE E

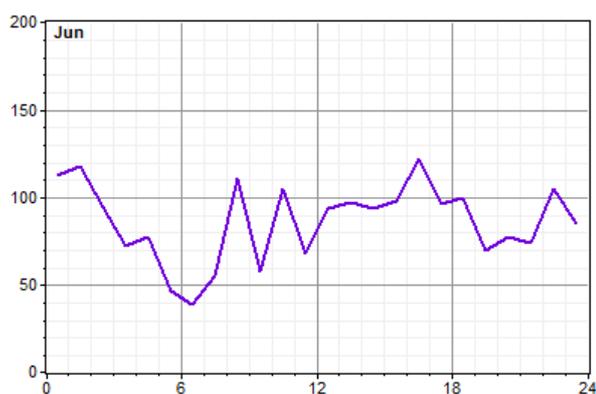
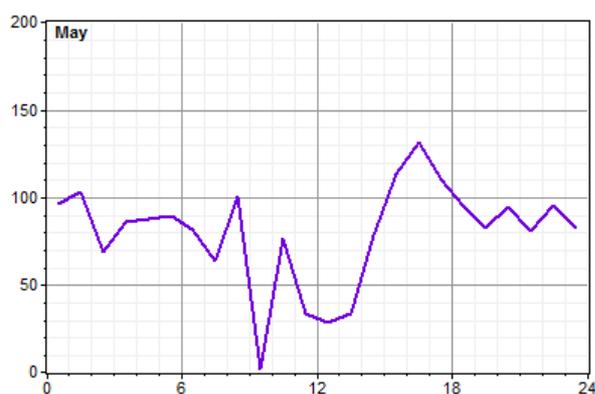
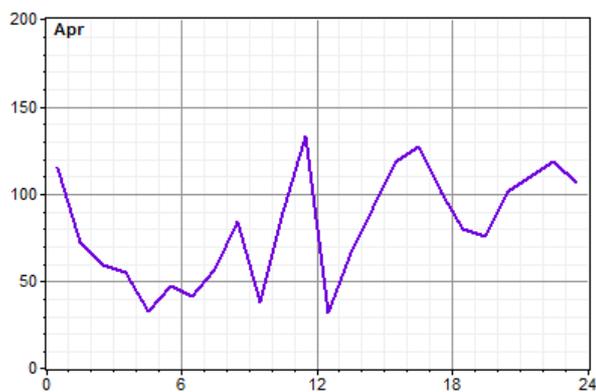
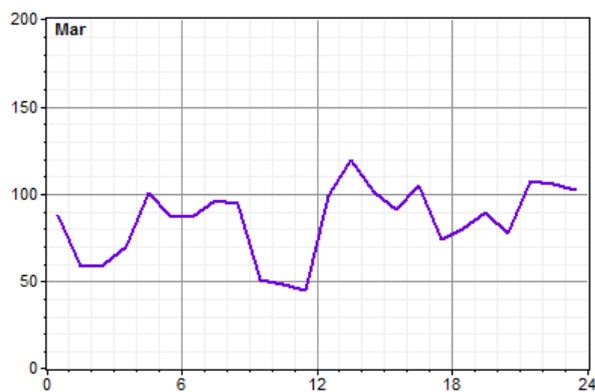
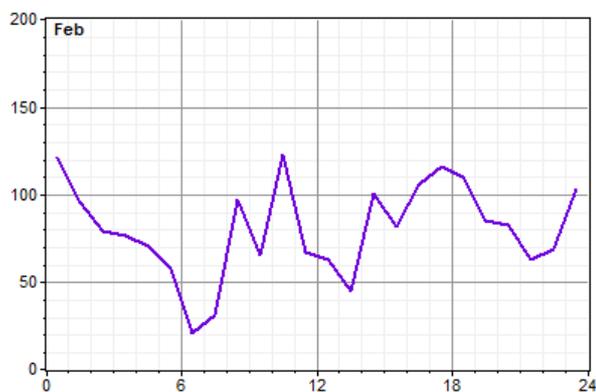
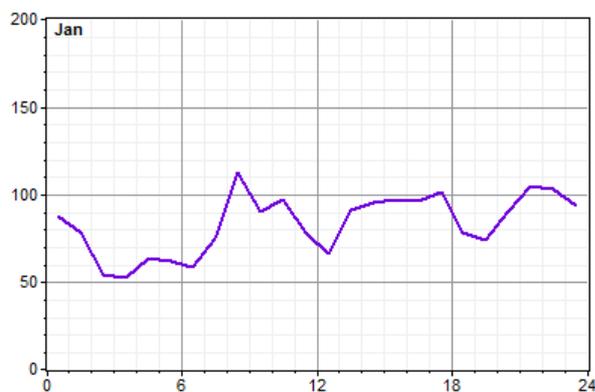
État de charge moyenne journalière des batteries (Adrar)

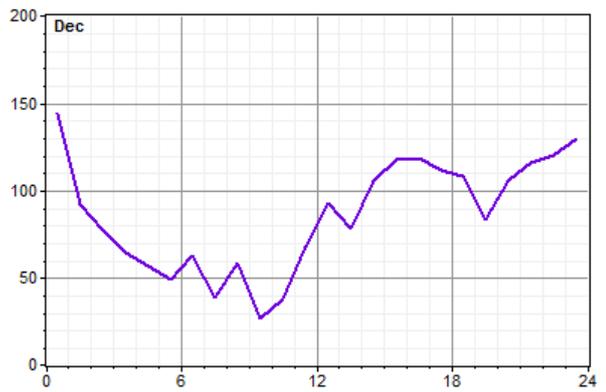
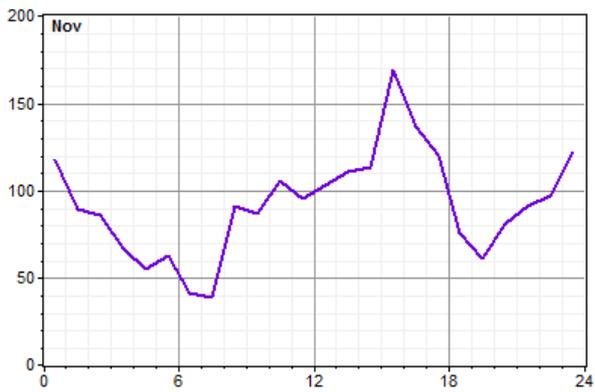
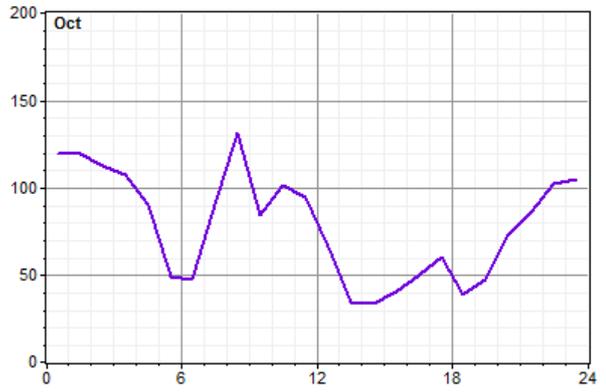
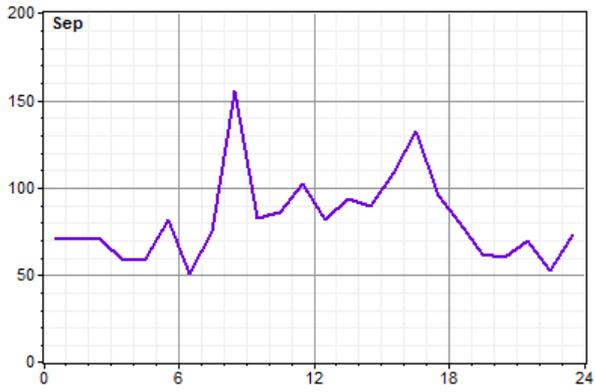
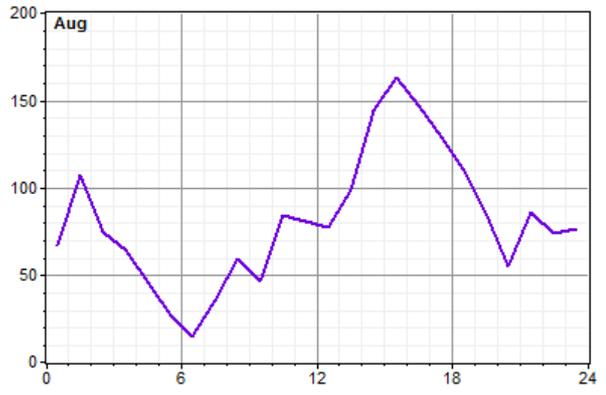
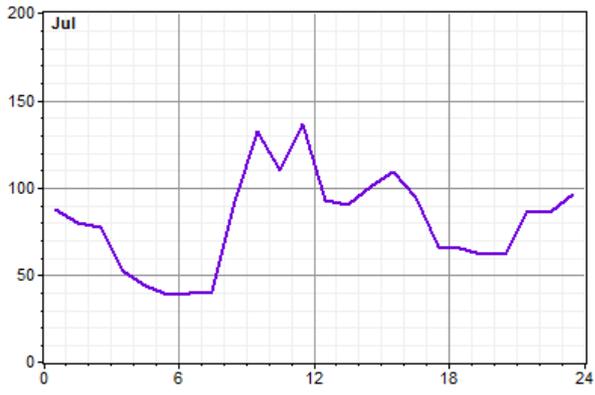




ANNEXE F

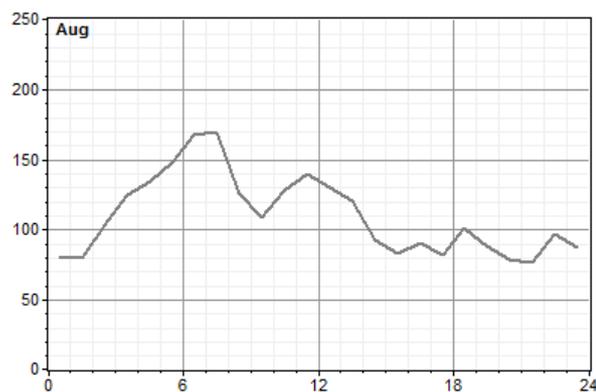
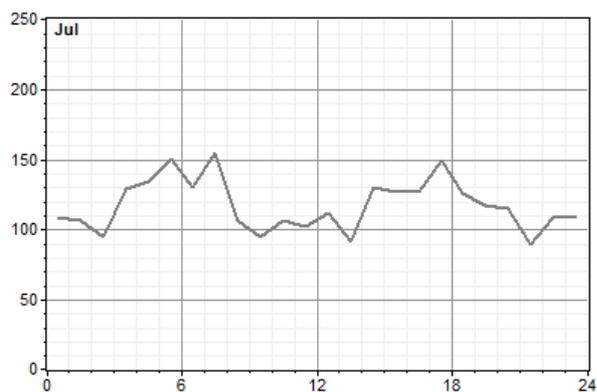
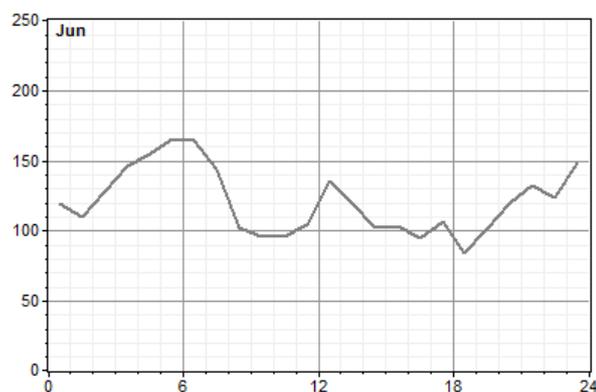
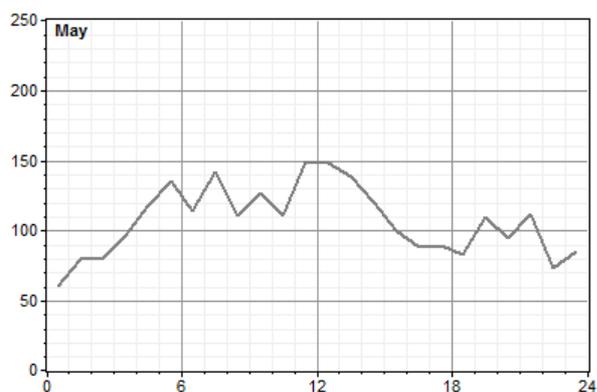
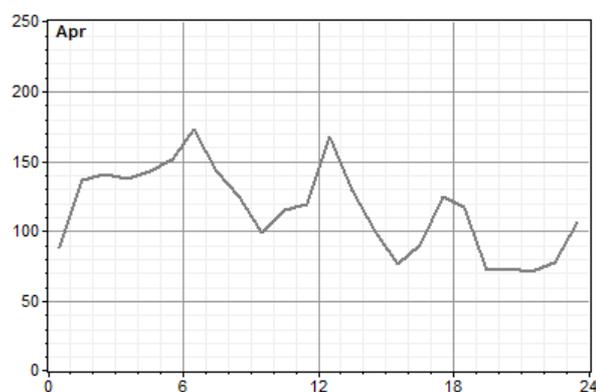
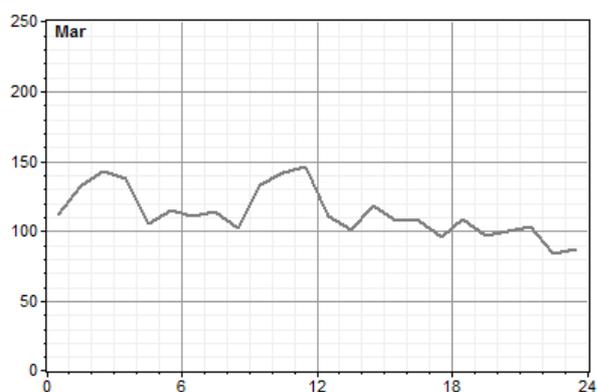
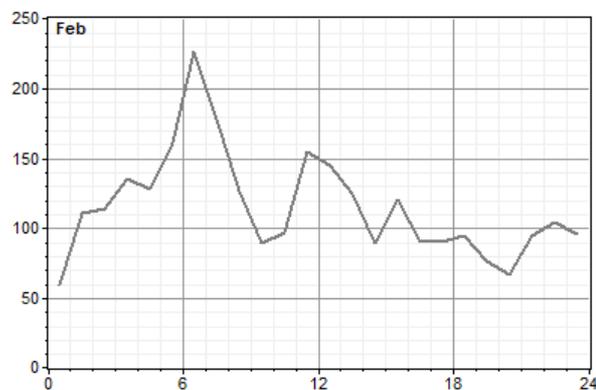
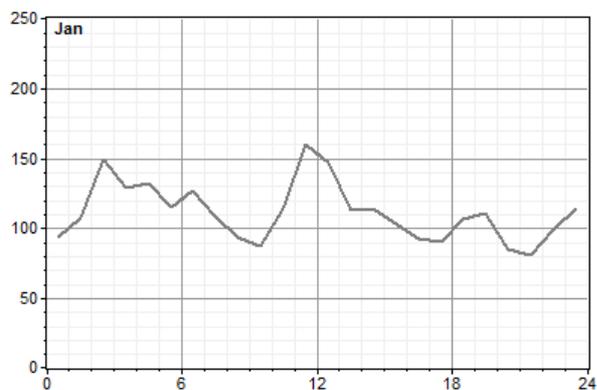
Distribution de puissance moyenne journalière délivrée par l'onduleur (Adrar)

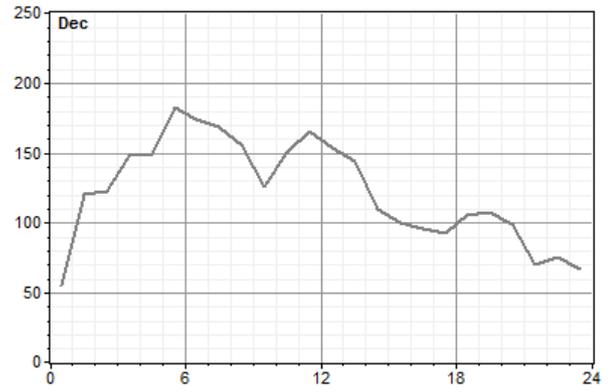
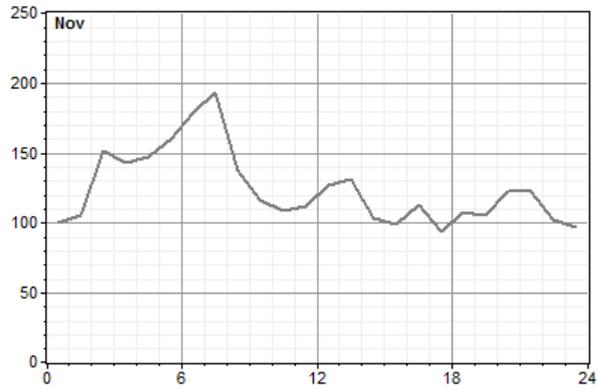
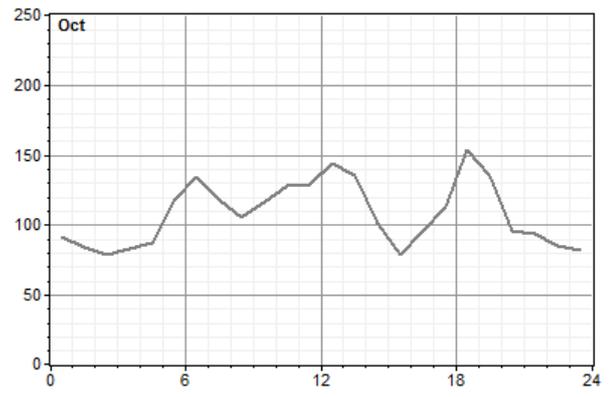
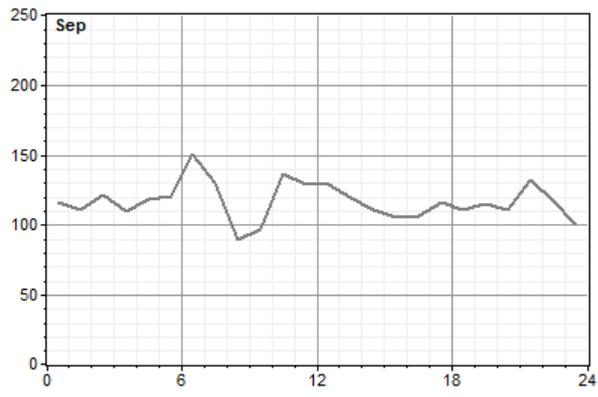




ANNEXE G

Distribution de puissance moyenne journalière délivrée par le redresseur (Adrar)





ANNEXE H

Développement durable et analyses de cycle de vie

La prise de conscience de notre développement incontrôlé est de plus en plus forte. L'homme devient sensible à son environnement physique et humain. Dorénavant, le développement se doit d'être responsable : la faisabilité technique et économique ne suffit plus à justifier les décisions. Une vision plus globale se développe et s'intègre aux décisions des gouvernements, des industriels et des consommateurs.

Pour être durable, le développement se doit d'englober les aspects économiques, environnementaux et sociaux, mais plus important encore est leur interaction ; ils doivent être intégrés simultanément. Le développement durable est à la fois viable, vivable et équitable comme le suggère la représentation, très fréquente qui est faite du développement durable à la figure H1.

La viabilité du développement regroupe les aspects environnementaux et économiques alors que la qualité d'être vivable intègre les concepts d'environnement et de société et finalement, le fait d'être équitable respecte l'économie et la société. La difficulté du développement durable est de trouver l'harmonie entre ces trois pôles, tous les aspects sont d'égale importance, alors la solution idéale est difficilement atteignable.

Certains décrivent l'aspect social comme l'objectif à atteindre, l'environnement comme une contrainte due aux ressources limitées de notre planète et l'économie comme le moyen d'atteindre les objectifs.

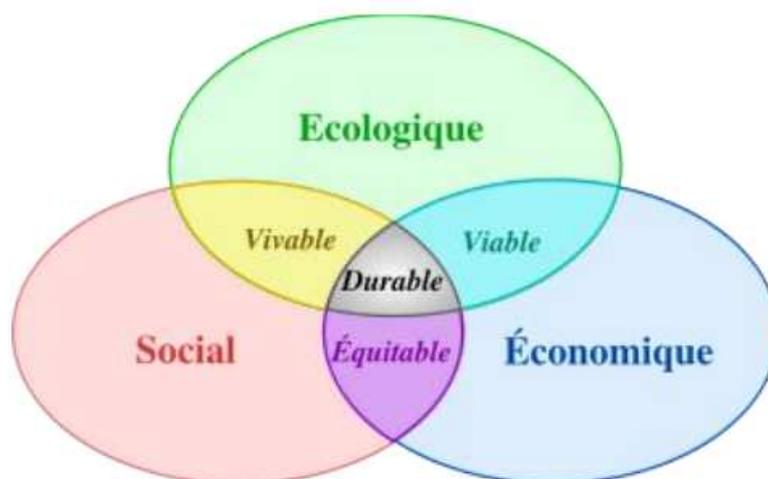


Figure H1 : Schéma typique du développement durable

H.1 ACV des systèmes seuls

Les analyses sur un seul système, comme l'analyse du cycle de vie d'une installation éolienne déterminée, présentent de nombreux avantages. Elles permettent de connaître les points faibles sur tout le cycle de vie. Ces points faibles peuvent être autant les étapes qui ont le plus d'impact pour une phase donnée ou les phases qui ont le plus d'impact sur tout le cycle de vie. En connaissant ces points faibles, il est facile de cerner les phases ou les étapes qui ont le plus besoin d'amélioration et d'ainsi améliorer le produit ou le service efficacement en mettant les efforts là où c'est nécessaire et payant. Par exemple, pour les éoliennes, la phase de production est très importante au niveau de tous les indicateurs environnementaux, il faut donc travailler à améliorer en priorité cet aspect. À l'opposé, la phase d'opération est négligeable pour tous les indicateurs, alors il n'est pas criant d'apporter des changements à cette phase. Suivant la même logique, il est inutile de faire des recherches pour améliorer la phase d'utilisation pour les systèmes photovoltaïques puisque leurs émissions sont pratiquement nulles, mais la phase de production nécessite énormément de travail puisqu'elle est très coûteuse en énergie et qui, la plupart du temps, n'est pas d'origines renouvelables.

H.2 Analyse faite avec les systèmes connectés au réseau

La plupart des analyses de cycle de vie réalisées ont été faites pour des systèmes connectés au réseau. Parmi elles, une étude japonaise relate qu'au niveau des émissions de gaz à effet de serre évaluées sur tout le cycle de vie, toutes les énergies renouvelables offrent une meilleure performance, de plusieurs ordres de grandeur, que les énergies fossiles. Seule l'énergie nucléaire parmi les énergies non renouvelables est en mesure d'offrir une performance similaire aux énergies renouvelables. Le pouvoir calorifique de ce combustible est énorme. De relativement petites quantités donnent énormément d'énergie. Même si les déchets sont dangereux, ils sont maîtrisés, donc on les entrepose simplement dans un milieu sécuritaire. Alors même s'ils sont hautement toxiques pour l'homme, vu qu'il n'y a pas d'exposition à l'homme ou à la nature, le nucléaire est très propre du point de vue de l'ACV. De la même façon, même si les panneaux solaires contiennent des matériaux toxiques, s'ils sont simplement enfouis sous forme de panneaux, on considère qu'ils ont un impact minime sur l'environnement puisque les produits toxiques n'interagissent pas avec la nature. Il y a une différence notable entre la situation des systèmes connectés au réseau et celle des systèmes hors réseau : la banque de batteries. Pour une situation connectée au réseau, l'intermittence de la source d'énergie éolienne ou photovoltaïque est absorbée par le réseau.

Le réseau, normalement constitué de plusieurs sources distinctes d'énergie, utilisera simplement plus d'une autre source en cas d'arrêt d'approvisionnement de l'une d'entre elles. Par contre, pour un système hors réseau, il n'y a que l'énergie d'une source si c'est un système simple (éolien ou photovoltaïque) et de deux sources pour les systèmes hybrides (éolien et photovoltaïque). Vu l'intermittence de ces sources, il est nécessaire d'avoir des accumulateurs plus simplement appelés dans ce cas-ci, des banque de batteries. Elles permettent d'emmagasiner l'énergie excédentaire pour la réutiliser lors d'interruption d'approvisionnement en énergie. Pour un système simple, leur nombre est important et c'est pourquoi plusieurs proposent les systèmes hybrides qui diminuent les chances ou les moments d'interruption d'énergie et qui permettent ainsi d'utiliser moins de batteries. Les batteries sont le point faible des systèmes hors réseau, elles ont une durée de vie plus courte que le système et elles sont très sensibles à des températures très élevées et très basses, ce qui tend à diminuer de façon encore plus importante leur durée de vie.

H.3 Analyse des gros systèmes

En plus, qu'il existe une différence entre la situation hors réseau et la situation connectée au réseau, il existe aussi une différence entre les petits systèmes et les gros systèmes. Plusieurs petits systèmes de quelques dizaines de kilowatts peuvent être équivalents en apport d'énergie à un gros système de centaines de mégawatts, mais au niveau environnemental, les nombreux petits systèmes risquent d'être plus dommageables. Chacun des petits nécessite son propre petit réseau donc contrôleur, convertisseur et banque de batteries. Le gros système utilise simplement plus efficacement tous ses éléments alors que les petits systèmes n'utilisent pas ses éléments à leur pleine capacité. Il est parfois impossible de faire un réseau important en milieu isolé vu les distances à couvrir pour relier les gens ou les divers besoins. Une étude récente faite en 2006 compare différentes technologies pour de très gros systèmes. Les conclusions sont intéressantes et très bien formulées cependant elles étudient seulement le coût, l'énergie utilisée et les émissions de CO₂ émises sur tout le cycle de vie comme paramètres de comparaison. Il est cependant difficile à dire si l'étude portait sur la situation hors réseau ou connectée au réseau et quels éléments avaient été modélisés. Cette étude semble simplement tenir compte des modules nécessaires pour répondre aux besoins sans tenir compte du système complet. De plus, les conclusions pour un gros système ne peuvent pas s'appliquer pour un petit système puisqu'ils n'utilisent pas exactement les mêmes technologies pour leurs composantes puisque les capacités diffèrent.

ANNEXE I

Analyse de l'aspect social

L'aspect social est de façon générale l'amélioration de la condition humaine par la satisfaction des besoins essentiels et l'amélioration de la qualité de vie. Ceci intègre les principes généraux d'accès à l'emploi, à l'éducation, aux soins médicaux, aux services sociaux et à un logement de qualité.

Dans de nombreux pays en voie de développement ou sous-développés, les systèmes hybrides ou photovoltaïques sont utilisés pour le dessalement afin d'offrir de l'eau potable ou encore pour réfrigérer les médicaments ou alimenter les équipements médicaux dans les cliniques des régions isolées. L'utilisation de l'énergie éolienne pour ce genre de besoins est essentielle à l'amélioration de la qualité de vie des gens de ces régions. De plus, l'ajout d'autres sources d'énergie comme les panneaux solaires ou une génératrice diesel aux systèmes éoliens permet d'offrir une sécurité pour un apport en énergie continue.

Pour les cliniques, par exemple, souvent le système éolien ou hybride est couplé à une génératrice ou connecté à des batteries puisqu'on ne peut pas permettre une défaillance du système et se retrouver sans apport d'énergie.

De plus, plusieurs villages reculés du monde installent ou font des projets d'installations d'énergies renouvelables. Ces installations peuvent simplement être utilisées pour pomper ou chauffer de l'eau ou encore apporter un besoin minimal en énergie par exemple dans les écoles ou centres communautaires.

L'aspect social peut aussi se traduire par la responsabilité sociétale de l'entreprise. Ceci se traduit par les bonnes conditions de leurs employés, le respect des communautés environnantes et du territoire. L'employeur doit offrir de bonnes conditions de travail (santé et sécurité, hygiène et propreté des lieux) et aussi leur donner de la formation nécessaire.