



Université du Québec
à Rimouski

Conception d'un système d'alimentation à énergie renouvelable pour une station autonome de désalinisation de l'eau

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de Maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© **WAFABEN DAKHLIA**

Février 2020

Composition du jury :

Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR

Jean-Sébastien Deschênes, directeur de recherche, UQAR

Adrian Ilinca, codirecteur de recherche, UQAR

Houssam Ben Khalifa, examinateur externe, AMT Diecasting

Dépôt initial le 10 Décembre 2019

Dépôt final le 17 février 2020

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Je dédie ce mémoire à tous ceux et celles qui m'ont accompagnée et soutenue durant ces deux années de formation, surtout à ma grand-mère qui s'est éteinte cette année, que son âme repose en paix.

REMERCIEMENTS

Je remercie grandement le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour son support financier, sans quoi ce travail de recherche aurait été impossible.

Je tiens aussi à remercier Professeur Jean-Sébastien Deschênes et Professeur Adrian Ilinca, mes codirecteurs de recherche, pour leur aide considérable et primordiale dans l'accomplissement de ce travail. Merci pour votre encadrement et pour l'opportunité d'apprendre autant à vos côtés. Je tiens également à remercier les membres de l'équipe de l'entreprise Puribec pour leur entière collaboration dans la réalisation de ce projet. Sans oublier M. Jean-Charles Morin pour son assistance technique, sa patience et sa bonne humeur.

Mes remerciements vont naturellement à mon mari Majed, qui m'a motivée et aidée pour atteindre les objectifs fixés. Tu es mon exemple de détermination, de persévérance et de dévouement. Mes parents, Moncef et Jeannet qui m'ont toujours motivée à franchir la porte suivante. Spécialement pour toi mon papa, tu m'as donné les moyens d'aller jusqu'au bout de mes rêves. Sans oublier mes beaux-parents Naceur et Donia pour leurs encouragements et leur soutien moral.

Un dernier merci, et non le moindre, à mes très chers amis (Saoussen, Steve, Johanne, Asma, Ghada, Emna et Cloé) pour leur présence, leurs conseils et surtout leur soutien moral. Vous étiez toujours une famille pour moi.

RÉSUMÉ

La disponibilité de l'eau potable est l'un des problèmes mondiaux majeurs de notre époque. Ce problème caractérise particulièrement l'Afrique, où le manque d'accès à l'eau freine le développement social et économique. Dans certains endroits où l'eau existe sous forme de nappe phréatique saumâtre, les communautés ne disposent généralement pas des technologies nécessaires pour extraire l'eau et la traiter, afin de la rendre potable et utilisable pour les activités économiques, par exemple l'agriculture. Or, les avancées accomplies dans le domaine des énergies renouvelables et la baisse continue de leur prix ouvrent une opportunité pour l'accès à l'énergie propre et durable. En même temps, les technologies de traitement de l'eau saumâtre deviennent de plus en plus accessibles et de plus en plus efficaces. Il serait bénéfique d'assembler ces deux composantes dans le but de fournir de l'eau avec une solution technologique viable et accessible.

L'objectif de ce projet est d'explorer la possibilité d'alimenter un système d'osmose inverse par les énergies renouvelables, et de simuler sa performance dans un milieu isolé en Afrique du Nord (El Haouaria, Tunisie). Après une modélisation appropriée du système de désalinisation d'eau saumâtre, une étude énergétique a été réalisée afin de cerner les besoins de notre système en électricité. Pour réaliser cette étude énergétique, nous avons utilisé le logiciel HOMER ainsi que le logiciel RETScreen pour l'extraction des données climatiques du site d'El Haouaria. Enfin une étude de sensibilité économique a été élaborée.

Mots clés : Dessalement, Energies renouvelables, eaux saumâtres, membranes d'osmose inverse, modèle d'OI, site isolé, pompage, salinité

ABSTRACT

The availability of drinking water is one of the major global problems of our time. This problem is particularly characteristic of Africa, where the lack of access to water hampers social and economic development. In some areas where water exists as a brackish water table, communities generally do not have the technology and energy to extract and treat water to make it drinkable and usable for economic activities. For example, agriculture. However, the progress made in the field of renewable energies and the continuous decline in their price open an opportunity for access to clean and sustainable energy. At the same time, brackish water treatment technologies are becoming more accessible and more optimized. It would be beneficial to assemble these two components in order to provide water with a viable and accessible solution.

The aim of this project is to explore the possibility of feeding a reverse osmosis system using renewable energies, and to simulate its performance in an isolated environment in North Africa (El Haouaria, Tunisia). After an appropriate modeling of the brackish water desalination system, an energy study was conducted to identify the energy needs of our system. To carry out this energy study, we used the HOMER software as well as the RETScreen software for extracting climate data from the “El Haouaria” site. Finally, an economic sensitivity study was developed.

Keywords: Desalination, Renewable energies, brackish water, reverse osmosis membranes, RO model, isolated site, pumping, salinity

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IX
RÉSUMÉ	XI
ABSTRACT	XIII
TABLE DES MATIÈRES	XV
LISTE DES TABLEAUX	XIX
LISTE DES FIGURES	XXI
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	XXV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1. LE CYCLE DE L'EAU	2
2. RESSOURCES EN EAU, DISTRIBUTION ET DISPONIBILITE	4
3. MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET	5
4. GENESE DE LA PROBLEMATIQUE DU BESOIN D'ENERGIE	6
5. OBJECTIFS DU PROJET	8
CHAPITRE 2 LES TECHNIQUES DE DESSALEMENT	11
2.1. INTRODUCTION	11
2.2. TECHNOLOGIES DE DISTILLATION THERMIQUE	12
2.2.1. La distillation multiflash (MSF)	12
2.2.2. Distillation multi effets (MED)	13
2.2.3. Distillation par compression de vapeur (VC)	15
2.3. PROCESSUS MEMBRANAIRES	16
2.3.1. L'électrodialyse	16

2.3.2. L'osmose inverse	17
CHAPITRE 3 L'OSMOSE INVERSE	19
3.1. PRINCIPE DE BASE DE LA TECHNOLOGIE D'OSMOSE INVERSE	19
3.1.1. Aperçu historique de la technologie d'osmose inverse	19
3.1.2. Mode d'action de la membrane d'osmose inverse	21
3.2. DESCRIPTION PHENOMENOLOGIQUE DES MECANISMES DE TRANSPORTS DANS L'OSMOSE INVERSE	21
3.2.1. Mécanisme de transfert dans l'osmose inverse	23
3.2.2. Loi régissant le modèle de solubilisation-diffusion	25
3.2.3. Hypothèses utilisées	27
CHAPITRE 4 SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR LE DESSALEMENT	31
4.1. L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	32
4.1.1. Gisement solaire	33
4.1.2. L'énergie solaire photovoltaïque	37
4.2. L'ÉNERGIE EOLIENNE.....	42
4.2.1. Principe de fonctionnement	42
4.2.2. Applications et usages.....	44
4.2.3. Architecture des éoliennes	45
4.2.4. Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de Betz).....	47
4.3. LES CONSTITUANTS DE BASE D'UNE INSTALLATION A ENERGIE RENOUVELABLE, EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE	53
4.3.1. Un onduleur.....	53
4.3.2. Des batteries	53
CHAPITRE 5 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU SYSTÈME DE FILTRATION	57
5.1. INSTALLATION	57

5.2. BANC D'ESSAI	57
CHAPITRE 6 CONDITIONS D'UTILISATION ENVISAGÉES	59
6.1. DONNEES POUR L'EXEMPLE DE CALCUL	59
6.2. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA POMPE	61
6.3. EXTRACTION DES DONNEES CLIMATOLOGIQUES	63
CHAPITRE 7 ÉLABORATION DU MODÈLE DU SYSTÈME DE FILTRATION	67
7.1. ÉLABORATION DU MODELE DE LA MEMBRANE D'OSMOSE INVERSE	67
7.2. ÉLABORATION DU MODELE DE LA POMPE A HAUTE PRESSION	76
7.3. ÉLABORATION DU MODELE DU MOTEUR ASYNCHRONE	82
7.4. MODELISATION ENERGETIQUE DE L'UNITE D'OSMOSE INVERSE INSTALLEE .	85
7.4.1. Estimation des besoins en énergie électrique (Wh/j).....	85
7.4.2. Estimation du besoin en nombre maximal de panneaux	
photovoltaïques ou en éoliennes	87
- Calcul de la puissance crête requise du générateur photovoltaïque	87
- Détermination du nombre de modules photovoltaïques	89
- Détermination du nombre d'éoliennes.....	90
- Choix des accumulateurs	92
- Choix de l'onduleur	93
CHAPITRE 8 RÉSULTATS ET DISCUSSION	95
8.1. CARACTERISATION DE LA CHARGE	95
8.2. ANALYSE ET MODELISATION DU POTENTIEL EOLIEN.....	96
8.2.1. Analyse du potentiel éolien	96
8.2.2. Choix de l'éolienne	100
8.3. DIMENSIONNEMENT DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES	106
8.4. DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR.....	108
8.6. DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE STOCKAGE	111
8.6. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE SIMULATION ENERGETIQUE.....	113

8.7. ÉTUDE DE SENSIBILITE PAR RAPPORT AU NOMBRE DES BATTERIES	115
8.8. ANALYSE ECONOMIQUE DE LA SOLUTION SIMULEE	118
CHAPITRE 9 CONCLUSION GÉNÉRALE	121
ANNEXES	125
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les principaux procédés de dessalement	11
Tableau 2 : Domaines d'application des membranes de filtration.....	20
Tableau 3 : Systèmes d'énergie renouvelable utilisés dans le dessalement	32
Tableau 4. Caractéristiques technologiques typiques des centrales éoliennes	44
Tableau 5: Comparaison des éoliennes à axe horizontal et vertical	46
Tableau 6 : Caractéristiques chimiques de l'eau salée utilisées dans cette étude	59
Tableau 7 : Dimensions du réservoir à 35 gallons.....	62
Tableau 8: Estimation des besoins en puissance électrique Watt heure	86
Tableau 9 : Spécifications techniques des éoliennes retenues	102
Tableau 10 : Tableau comparatif des éoliennes évaluées	105
Tableau 11 : Nomenclature du système autonome à ER conçu.....	118

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Photo satellite du globe [2].....	1
Figure 2 : Schéma sur le cycle de l'eau [1]	3
Figure 3 : Stress hydrique projeté pour le scénario optimiste à l'horizon 2030 [8]	4
Figure 4 : Demande de dessalement pour le scénario optimiste 2030 [8]	5
Figure 5 : Carte de la plaine de Haouaria [14].....	7
Figure 6: Schéma de principe du système de dessalement d'eau alimenté aux ER	9
Figure 7: Principe de dessalement thermique [17]	12
Figure 8: Schéma de principe de l'unité MSF [16]	13
Figure 9: Schéma de principe de l'unité MED [16]	14
Figure 10: Schéma de principe des unités VC (MVC et TVC) [16].....	15
Figure 11: Schéma de principe de l'unité d'électrodialyse [6]	16
Figure 12: Schéma de principe du système RO [16]	17
Figure 13 : Osmose, équilibre osmotique et osmose inverse [28]	21
Figure 14 : Transport moléculaire à travers les membranes [35]	24
Figure 15 : Schéma du modèle de solution-diffusion [35]	29
Figure 16 : Spectre solaire [42, 44].....	34

Figure 17 : Notion de masse d'air [44]	35
Figure 18 : Coordonnées locales du soleil [44].....	36
Figure 19 : Cellule solaire et module solaire [47].....	38
Figure 20 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [46].....	39
Figure 21 : Montage en séries de cellules photovoltaïques [48]	41
Figure 22 : Montage en parallèle de cellules photovoltaïques [48]	41
Figure 23: Intérieur d'une éolienne à axe horizontal [52].....	43
Figure 24: Modèle réel d'éolienne à axe horizontal*	46
Figure 25: Modèle réel d'une éolienne à axe vertical : Éole**	46
Figure 26: Théorie du disque à trois dimensions [49].....	48
Figure 27: Effet d'ombrage de la tour sur le couple aérodynamique [53]	51
Figure 28: Courbe de puissance d'une éolienne en fonction de sa vitesse [51].....	51
Figure 29 : Cycle de durée de vie des batteries [55]	55
Figure 30 : Schéma du banc d'essai. Source : Puribec.....	58
Figure 31: Schéma synoptique du système moteur + pompe + membrane d'OI.....	60
Figure 32: Données climatiques de la région d'El Haouaria	63
Figure 33 : Courbe de variation de la vitesse moyenne du vent	64
Figure 34 : Vitesses du vent (en nœuds), Windfinder au site d'El Haouaria	65
Figure 35 : Variation de la température à El Haouaria sur une année	65
Figure 36 : Diagramme du transport du solvant et du soluté	68

Figure 37: Construction du modèle de simulation du système pompe-membrane.....	72
Figure 38 : Construction du modèle de la membrane dans Simulink.....	72
Figure 39 : Évolution de la pression à l'entrée de l'unité d'osmose inverse.....	74
Figure 40 : Évolution de la concentration de sel dissous totaux dans l'eau en sortie.....	75
Figure 41 : Moteur asynchrone, (a) Stator triphasé et (b) Rotor polyphasé [63].....	82
Figure 42 : Simulation sur Simulink de la charge (moteur-pompe)	84
Figure 43: Puissance transmise au fluide par la pompe.....	84
Figure 44 : Conditions de référence du site d'El Haouaria en Tunisie	88
Figure 45: Interface de l'installation sur RETScreen.....	89
Figure 46 : Résultats de simulation du modèle PV pour le site d'El Haouaria.....	90
Figure 47: Résultats de simulation du modèle éolien pour le site d'El Haouaria	91
Figure 48: Courbe de puissance et d'énergie sur RETScreen	91
Figure 49 : Classification des vitesses du vent [69].....	96
Figure 50 : Distribution de Weibull pour la région d'El Haouaria.....	98
Figure 51: Densité cumulative de probabilité d'El Haouaria	98
Figure 52 : Simulation de la variation de la vitesse du vent sur une année (HOMER).....	100
Figure 53 : Courbes de puissance des éoliennes comparées.....	104
Figure 54 : Courbe de puissance de la Bergey XL-6R	106
Figure 55 : Résultats de simulation par HOMER du système tout éolien	106
Figure 56 : Données de l'ensoleillement fournies par le logiciel HOMER.....	108

Figure 57: Simulation du système photovoltaïque dans HOMER	109
Figure 58: Production d'électricité moyenne mensuelle du système éolien-solaire.....	110
Figure 59: Architecture du système d'ER envisagé	113
Figure 60: Résultats de la simulation avec 8 batteries de marque Trojan 6V 390 Ah	114
Figure 61: Production d'électricité moyenne du système PV-éolien-batteries	114
Figure 62: État de charge avec 8 batteries.....	115
Figure 63: État de charge avec 4 batteries.....	116
Figure 64: convertisseur DC-DC 48 V à 24 V	117
Figure 65: Résultats de la simulation des prix des composants	118

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AM Masse d'air

DoD l'état de charge de la batterie, qui veut dire en anglais « Depth of discharge »

ED Electro-dialyse

EPA L'organisation américaine de la protection de l'environnement

HPP Pompe à haute pression

INRGREF Institut National de la Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts

IWMI « International Water Management Institute »: Institut international de gestion de l'eau

LREE Laboratoire de recherche en énergie éolienne à l'UQAR

MED Distillation Multi Effets

MENA Moyen-Orient et Afrique du Nord

MF Microfiltration

MSF Distillation Multiflash

MVC Compression de Vapeur par des moyens mécaniques

NASA National Aeronautics and Space Administration

NF Nanofiltration

OI Osmose Inverse

PV Photovoltaïque

STEG Société Tunisienne d'Électricité et de Gaz

TDS Solides dissous totaux, qui veut dire en anglais « Total dissolved Solids »

TVC Compression de Vapeur par des moyens mécaniques

UF Ultrafiltration

USAID United States Agency for International Development

VC Distillation par Compression de Vapeur

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau est la substance minérale la plus répandue à la surface du globe. Elle constitue l'hydrosphère. Son volume est estimé à 1370 millions de km³; sur ce total, moins de 3% sont constitués d'eau douce (environ 35 000 000 km³), dont une grande partie (environ 24 000 000 km³) est inaccessible en raison du fait qu'elle est gelée dans les calottes glaciaires et les glaciers. On estime que seulement 0,77% (environ 11 000 000 km³) de toutes les eaux de la planète sont retenues comme eaux souterraines, eaux de surface (lacs, marais, rivières, etc.) ainsi que dans les plantes et l'atmosphère [1, 2].



Figure 1 : Photo satellite du globe [2]

La définition de l'eau de boisson salubre selon le Programme commun OMS/UNICEF est une eau utilisée à des fins domestiques, la boisson, la cuisine et l'hygiène personnelle. L'accès à l'eau de boisson signifie que la source est située à moins d'un kilomètre de l'endroit de son utilisation et qu'il est possible d'obtenir régulièrement au

moins 20 litres d'eau par habitant et par jour. L'accès à l'eau potable est indiqué par la proportion de personnes qui utilisent des sources d'eau potable améliorées : raccordement à domicile, bornes-fontaines publiques, trous de sondage, puits protégés, sources protégées, eau de pluie [3, 4].

Pour l'organisation américaine de la protection de l'environnement (EPA), la salinité de l'eau potable destinée à la consommation ne doit pas dépasser la valeur de 500 mg/l. Pour l'Organisation mondiale de la santé, l'OMS, la salinité doit être inférieure à 1000 mg/l et le taux de chlorures ne doit pas dépasser la valeur de 250 mg/l [5].

1. LE CYCLE DE L'EAU

Le cycle hydrologique décrit le mouvement continu de l'eau au-dessus, sur et sous la surface de la Terre. L'eau sur la surface de la Terre est présentée par des cours d'eau, des lacs et des zones humides, ainsi que des océans. L'eau de surface comprend également les formes solides de l'eau, la neige et la glace. L'eau sous la surface de la Terre est principalement une eau souterraine, mais elle comprend aussi l'eau du sol [1].

La figure 2 représente le cycle hydrologique ou cycle naturel d'eau, qui est un diagramme simplifié qui montre les transferts d'eau. Le cycle hydrologique de l'eau est répété selon ces 4 étapes :

- Évaporation : c'est le renvoi de l'eau sous forme de vapeur dans l'atmosphère, lorsque le soleil chauffe l'eau des mers, océans, lacs et rivières, et le transforme en vapeur.

- Condensation : c'est la transformation d'eau de l'état vapeur causé par l'échauffement sous l'action du soleil en gouttelettes à cause du contact des couches d'air froid de l'atmosphère et ainsi se forment les nuages.

- Précipitation : c'est pratiquement la source de toutes les eaux douces dans le cycle hydrologique. Les nuages formés lors de la condensation déversent leur contenu sur la terre (océans et continents).

- Écoulement : quand les précipitations tombent sur les continents, en ce moment elles vont ruisseler et alimenter les eaux des rivières et des lacs, ainsi qu'elles vont s'infiltrer pour alimenter les nappes souterraines [4].

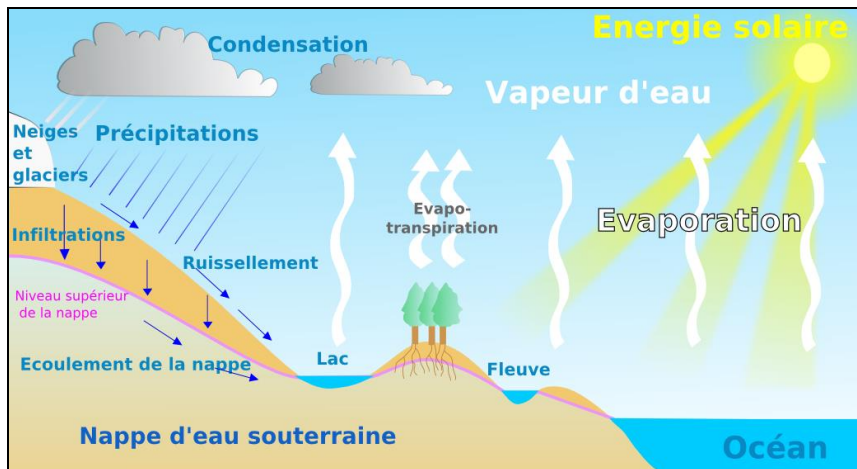


Figure 2 : Schéma sur le cycle de l'eau [1]

Une grande partie des précipitations survenant sur les terres ($69\,600\text{ km}^3 / \text{an}$) est recyclée dans l'atmosphère par l'évaporation et la transpiration des plantes. Environ 26% de cette partie du cycle ($18\,200\text{ km}^3 / \text{an}$) est destinée à un usage humain, par exemple, à travers l'agriculture. L'eau restante (ruissellement) est celle qui est directement disponible pour d'autres formes d'appropriation humaine. À l'échelle mondiale, le ruissellement annuel total (y compris l'infiltration du sol et la reconstitution des nappes phréatiques) est estimé à $40\,700\text{ km}^3 / \text{an}$. En tenant compte de l'éloignement géographique et des problèmes saisonniers (par exemple, les inondations) qui limitent l'accessibilité à l'eau, le ruissellement annuel total accessible ne représente qu'environ $12\,500\text{ km}^3 / \text{an}$. Par conséquent, on estime qu'environ 54% des eaux de ruissellement accessibles et 23% des ressources renouvelables totales (précipitations survenant sur les terres) sont actuellement appropriés pour une utilisation sous une forme ou une autre. Bien entendu, la ressource doit pouvoir supporter à la fois les populations humaines et le reste de l'environnement naturel [6].

2. RESSOURCES EN EAU, DISTRIBUTION ET DISPONIBILITÉ

La disponibilité de l'eau douce varie selon les régions géographiques et les saisons. La fraction renouvelable de l'eau douce de la Terre, se présentant sous forme d'eau de surface (rivières, lacs, ruisseaux, etc.), est très inégalement répartie. À titre d'exemple, considérons que seulement 4% des États-Unis et de leur masse sont couverts par des rivières, des lacs et des ruisseaux. C'est cette répartition inégale dans le temps et la géographie qui explique que seulement environ 30% du ruissellement annuel d'eau douce dans le monde est considéré comme accessible à l'exploitation humaine. C'est également cette répartition inégale qui entraîne presque tous les problèmes d'eau sur une base régionale [6].

Le stress hydrique est le rapport entre la demande totale en eau de la région et les ressources en eau renouvelables annuelles disponibles dans cette région. La figure 3 donne un aperçu des pays connaissant actuellement un stress hydrique, ainsi que des projections pour 2030. Les estimations de la ressource renouvelable utilisées dans ces projections sont extraites de World Resources Institute (WRI) et de l'Atlas de l'eau [7].

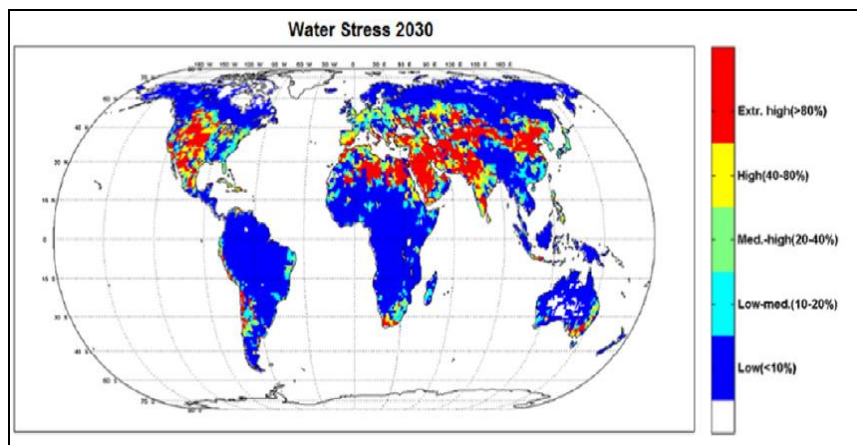


Figure 3 : Stress hydrique projeté pour le scénario optimiste à l'horizon 2030 [8]

Un examen rapide de la figure 3 révèle que le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (ou MENA) sont les régions du monde où l'eau est la plus rare. Ces régions regroupent environ

6,3% de la population mondiale, mais ne reçoivent que 1,4% de l'eau douce renouvelable de la planète [12]. La croissance démographique dans ces régions devrait exacerber le problème. Contrairement au Moyen-Orient, les États-Unis disposent d'une abondance relative d'eau douce renouvelable. Cependant, il y a des régions du pays, en particulier dans l'ouest, où la ressource est limitée [9].

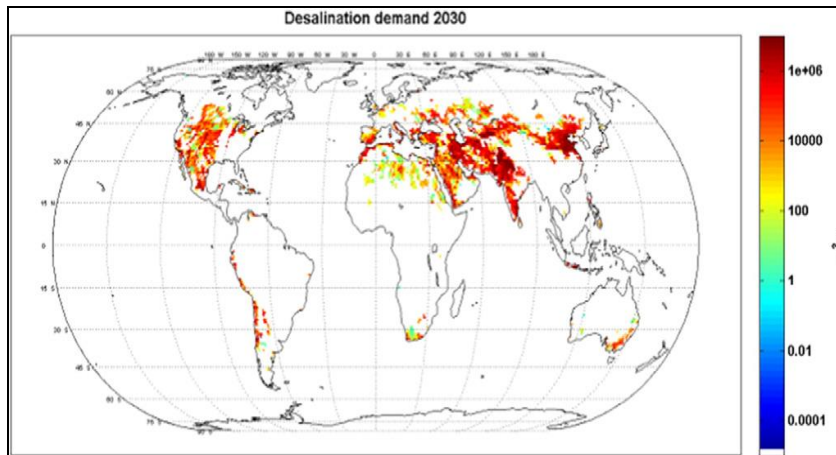


Figure 4 : Demande de dessalement pour le scénario optimiste 2030 [8]

Ci-dessus une figure illustrant un scénario optimiste à l'horizon 2030 extraite à partir de l'Atlas de l'eau qui fournit les facteurs d'augmentation de la demande en eau de 2010 pour tous les scénarios futurs. Ainsi, nous pouvons constater qu'en 2030 la demande de dessalement sera très élevée dans les régions du MENA, une partie de l'Extrême-Orient, les États-Unis et le Chili. En effet, on sait que soixante pour cent de la capacité mondiale de dessalement se trouvent dans les États du Golfe riches en pétrole; 30% du total mondial se trouve en Arabie saoudite, qui possède des installations sur les côtes de la mer Rouge et du golfe d'Aden. De plus, depuis les années 50, le Koweït est un pionnier dans le développement du dessalement afin de fournir de l'eau douce à usage domestique [8, 9].

3. MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Pour le cas de notre étude, nous allons nous intéresser à la Tunisie, pays nord-africain qui souffre du stress hydrique depuis des décennies et d'une répartition inégale des

ressources en eau entre le nord du pays et le sud. Il suffit de citer l'accès du Tunisien moyen à 450 m³ d'eau potable par an, nettement en dessous de la moyenne mondiale qui s'établit à 500 m³ per capita par an [10], pour comprendre la gravité de la situation. Paradoxalement, la Tunisie dispose de 630 millions de m³ d'eau saumâtre identifiée mais non utilisée, et l'on estime qu'une quantité équivalente se trouvant dans des nappes souterraines et dans des régions non reliées au réseau électrique est encore à explorer [11].

De plus, l'infrastructure d'énergie électrique en Tunisie est dans une situation plutôt précaire. La majeure partie de la production repose sur les énergies fossiles. Malheureusement, la quantité de pétrole que détient la Tunisie est en constante diminution et l'on estime qu'à l'horizon 2030, la majorité des gisements du pays seront obsolètes, ce qui, à défaut de nouveaux gisements, freine les investissements et menace l'avenir des Tunisiens [12].

Par ailleurs, la Tunisie explore de plus en plus la piste des énergies renouvelables. Il faut dire que, motivées par un potentiel éolien et solaire considérable, les autorités étudient des solutions de production décentralisée d'énergie, grâce aux énergies renouvelables. Les efforts sont timides pour le moment (la puissance installée en énergies renouvelables représente près de 7% de la puissance totale en 2014 soit 311 MW), mais des projets sont à l'étude. Dans le domaine éolien, 244 MW sont installés dans le nord, répartis entre deux parcs opérés par la STEG. Ce dernier souhaite installer 190 MW complémentaires à horizon 2020. Le potentiel éolien de la Tunisie est évalué à 8 GW sur une surface exploitable de 1600 km² [13].

4. GENÈSE DE LA PROBLÉMATIQUE DU BESOIN D'ÉNERGIE

La plaine d'El Haouaria, au nord de la Tunisie, est une petite ville rurale caractérisée par des ressources en eaux 100 % souterraines tous usages confondus (agricole, domestique, industriel et touristique). Ces ressources en nappes profondes sont exploitées jusqu'à 404% selon une étude réalisée à la fin de l'année 2016 par l'IWMI et l'INRGREF

[14] sur l'estimation des paramètres du bilan hydrique dans la plaine de Haouaria. Selon cette même étude, la salinité moyenne au niveau des puits de surface observés est de 2 ± 1.03 g/l, avec un minimum de 0.82 g/l qui a été enregistré dans la région de Sidi Daoud, réputée par la bonne qualité des eaux souterraines. Alors que le maximum est de 3.97 g/l, il a été enregistré dans un puits où le toit de la nappe est à 12.5 m dans la région d'aïl-Kedwa, sur la limite ouest de la Garaet, suivie par 3.85 g/l dans un puits de surface dans la même région. Le mandat que nous avons donc choisi de développer consiste à étudier, modéliser et dimensionner un système de dessalement d'eau de surface dans un site isolé de la plaine d'El Haouaria alimenté aux énergies renouvelables qui permettrait de disposer d'un débit de solution à la problématique citée.

El Haouaria est une ville tunisienne située à l'extrémité nord-est du cap Bon, à l'entrée du golfe de Tunis. La plaine de Haouaria (gouvernorat de Nabeul) couvre une superficie totale de 4200 ha. C'est une dépression enserrée par la mer Méditerranéenne des deux côtes et encadrée par les deux forêts de Dar Chichou d'axe NO/SE et le Jebel Haouaria (Figure 5). Elle se situe à 120 kilomètres de Tunis et à 80 kilomètres de la Sicile [15].

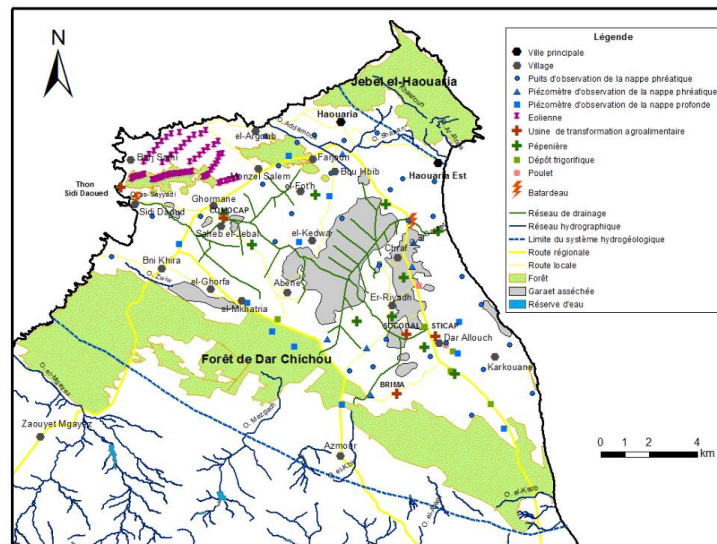


Figure 5 : Carte de la plaine de Haouaria [14]

La situation géographique de la plaine de Haouaria lui offre un climat favorable en termes de températures douces, de pluies importantes et irrégulières, mais aussi de vents forts et très fréquents. Le climat est de type méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique subhumide supérieur à hiver doux, avec une amplitude thermique assez élevée. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 568 mm/an (1972-2007) avec des pluies irrégulières qui tombent essentiellement entre novembre et avril. L'été est très sec et ne représente que 2% des pluies annuelles. La pluviométrie est aussi caractérisée par une forte variabilité interannuelle. Les températures moyennes se situent autour de 18°C- les plus douces en Tunisie - avec des moyennes des maxima et des minima de 30.1 et 9.6 °C respectivement. La température minimale est toujours supérieure à 7 °C, faisant que la gelée est pratiquement inexistante dans la région. En revanche, cette région est la plus ventée en Tunisie avec en moyenne 300 jours de vents par an, d'où l'implantation d'un important parc éolien dans la zone.

L'humidité relative, partout élevée dans les régions littorales, atteint son maximum en hiver, qui peut atteindre jusqu'à 93% au phare du Cap Bon, et son minimum en été. La climatologie de la région cadre encore bien avec le milieu méditerranéen, mais avec une nuance d'aridité déjà sensible. On se trouve ici en situation de marge, à proximité des limites méridionales de ce climat [13].

5. OBJECTIFS DU PROJET

Dans ce travail nous allons dimensionner un système hybride à énergies renouvelables (Photovoltaïque-Éolien) (PV-Éolien) applicable à un montage donné d'osmose inverse schématisé dans la figure 6 ci-dessous. Le dimensionnement de cette étude sera basé sur les données d'un cas réel, celui de la région isolée située dans le nord-est de la Tunisie : El Haouaria. Les problèmes liés à l'eau dont souffre une bonne partie de la population sont critiques [14]. Dans l'exemple de calcul l'eau exploitée a les caractéristiques suivantes : la température $50\text{ °C} < T < 70\text{ °C}$, la dureté $\geq 10\text{ mM}$, la salinité $\geq 1.5\text{ g/l}$.



Figure 6: Schéma de principe du système de dessalement d'eau alimenté aux ER

Ce mémoire est composé de neuf chapitres. Le premier chapitre « Introduction générale ». Le deuxième chapitre « Le dessalement » présente un portrait général des différentes techniques de dessalement d'eau. Un troisième chapitre « L'osmose inverse » décrit les équations mathématiques qui régissent ce système de dessalement sur lequel notre choix s'est porté. Un quatrième chapitre « Sources d'énergie pour le dessalement » dans lequel nous nous intéressons principalement aux deux formes d'ER qui vont alimenter notre système de dessalement d'eau, l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Le cinquième chapitre « Caractéristiques techniques du système de filtration » décrit le banc d'essai du système de filtration d'eau par osmose inverse. Le sixième chapitre « Conditions d'utilisation envisagées » expose les données climatologiques pour l'exemple de calcul. Le septième chapitre « Élaboration du modèle du système de filtration » décrit une étude et une caractérisation du système d'OI ainsi que des pertes de charge. Un huitième chapitre « Résultats et Discussion » qui décrit l'étude de dimensionnement du système d'alimentation par les énergies renouvelables. Un dernier chapitre « Conclusion » dans lequel nous récapitulons et présentons les recommandations et les perspectives qui pourraient être intéressantes pour notre projet et enfin les « Annexes » sont présentés à la fin du rapport.

CHAPITRE 2

LES TECHNIQUES DE DESSALEMENT

2.1. INTRODUCTION

Il existe deux approches de base pour séparer l'eau du sel. La première approche consiste à utiliser des moyens thermiques pour effectuer un changement de phase de l'eau (en vapeur ou solide), séparer physiquement la nouvelle phase de la solution saline restante, puis récupérer l'énergie thermique pour la réutiliser lorsque l'eau séparée redevient liquide. Les procédés de distillation ont été les premiers procédés de dessalement réalisés à grande échelle et représentent une grande partie de la capacité de dessalement du monde. La deuxième approche consiste à utiliser les procédés de séparation membranaires. Les deux processus majeurs de ce type sont l'osmose inverse (OI) et l'électrodialyse (ED). Dans l'OI, l'eau passe à travers une membrane imperméable au soluté en réponse à un gradient de potentiel chimique obtenu par pressurisation. En ED, les ions en solution migrent à travers des membranes sélectives aux anions et aux cations en réponse à un champ électrique. Ces deux procédés ont été commercialisés à grande échelle [6]. Le tableau 1 résume les principaux procédés utilisés dans chaque approche.

Tableau 1 : Les principaux procédés de dessalement

Technologie thermique	Technologie à entraînement électrique
Distillation Multiflash (MSF)	Osiose Inverse (OI)
Distillation Multi-Effets (MED)	Électrodialyse (ED)
Compression de vapeur (TVC)	Compression de vapeur (MVC)

Source : [16].

2.2. TECHNOLOGIES DE DISTILLATION THERMIQUE

Le dessalement thermique repose sur les principes de l'évaporation et de la condensation (Figure 7). L'eau est chauffée jusqu'à sa température de saturation, au-delà de laquelle l'évaporation se produit. Le sel reste tandis que la vapeur est condensée dans un autre échangeur de chaleur pour produire de l'eau douce [6].

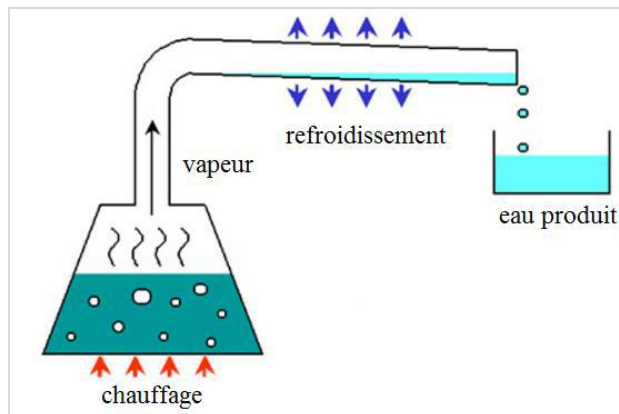


Figure 7: Principe de dessalement thermique [17]

2.2.1. La distillation multistage (MSF)

La distillation MSF est un processus énergivore qui nécessite à la fois de l'énergie thermique et électrique. C'est actuellement le deuxième processus de dessalement installé dans le monde après le processus d'osmose inverse (OI).

Le processus de dessalement MSF est surtout utilisé pour des installations de dessalement thermique de grande taille, où l'énergie thermique est généralement disponible sous forme de vapeur à faible pression (1 à 3 bars). Générer le vide requis dans différentes sections de l'unité. L'énergie électrique est nécessaire au fonctionnement des différentes pompes de l'unité, telles que le recyclage, l'eau de refroidissement, le produit de distillat, la purge de saumure, le condensat et les pompes de produits chimiques. Les unités MSF se situent généralement entre 10 000 et 35 000 m³ / jour et consistent en une série d'étapes allant de 4 à 40 unités, avec des températures et des pressions progressivement plus basses

qui provoquent une évaporation instantanée de la saumure chaude suivie d'une condensation en eau douce [16, 18].

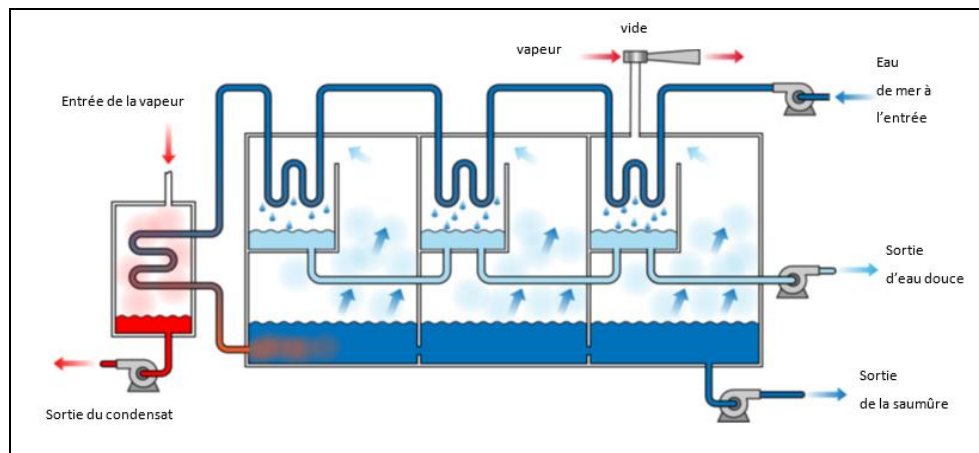


Figure 8: Schéma de principe de l'unité MSF [16]

Le MSF repose sur le principe d'évaporation instantanée. Dans le procédé MSF (Figure 8), l'eau salée est évaporée en réduisant la pression par opposition à l'élévation de la température. Le chauffage de l'eau salée se fait dans le réchauffeur de saumure, par une vapeur de basse pression fournie extérieurement par une chaudière. L'eau salée est ensuite introduite dans la première chambre. Chaque chambre ou étape fonctionne à des pressions progressivement plus faibles.

La vapeur produite est refroidie par échange de chaleur avec l'eau d'alimentation et est condensée sous forme d'eau dessalée. Ce sont les écarts de pression entre les chambres qui autorisent, sans la nécessité de pompes, l'écoulement de l'eau salée et de l'eau douce produite jusqu'à la dernière chambre [19].

2.2.2. Distillation multi effets (MED)

Le processus MED consiste en une série d'étapes (généralement de 2 à 16) qui sont maintenues à des niveaux de pression décroissants.

La distillation multi-effet se produit dans une série des effets (ou récipients) et utilise les principes de l'évaporation et de la condensation à une pression ambiante réduite. En MED, une série d'effets d'évaporateur produisent de l'eau à des pressions progressivement plus faibles. L'eau bouillonne à des températures plus basses lorsque la pression diminue, de sorte que la vapeur d'eau du premier récipient (effet) sert de milieu de chauffage pour le second, et ainsi de suite. La vapeur de chauffe condensée dans le premier effet est récupérée sous forme d'eau douce à la sortie du deuxième effet. Plus il y a d'effets (de 4 à 21), plus le rapport de performance est élevé.

La chaleur externe d'une chaudière à combustible fossile, de la chaleur résiduelle d'une centrale, du soleil ou d'autres sources est fournie pour augmenter la température de la saumure du premier étage à environ 70 °C, afin de permettre l'évaporation d'une partie de la saumure maintenue à basse pression. La vapeur d'eau produite par la platine est transférée dans un tube à l'étage de chauffage qui se situe après pour faire bouillir de l'eau de mer supplémentaire, laquelle produit de la vapeur d'eau en série.

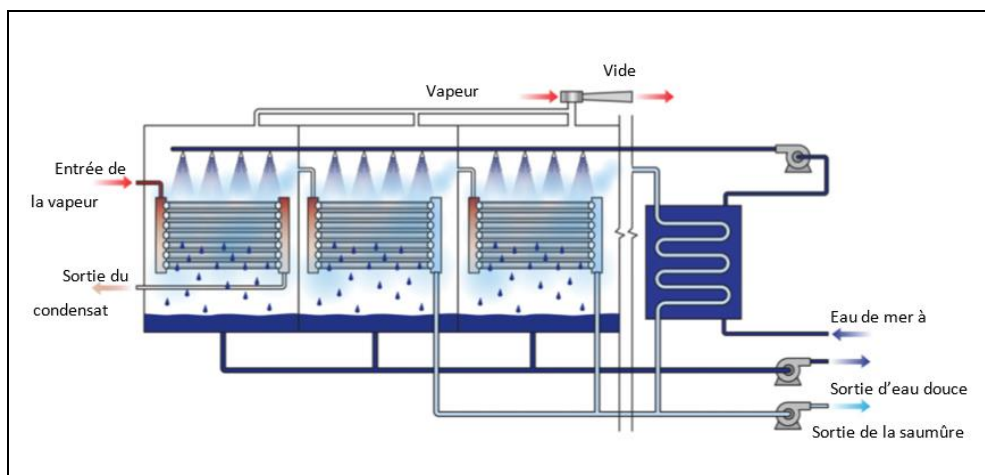


Figure 9: Schéma de principe de l'unité MED [16]

La figure 9 ci-dessus montre un schéma de principe de l'unité MED. Dans l'industrie de dessalement, les premières installations utilisaient la MED, mais la distillation MSF l'a dépassée en raison de son coût inférieur et des problèmes d'encrassement et d'entartrage des tubes des évaporateurs, qui sont évités dans les unités MSF [16].

2.2.3. Distillation par compression de vapeur (VC)

Le processus de distillation par compression de vapeur (VC) s'appuie sur la chaleur générée par la compression de la vapeur d'eau, pour l'évaporation de l'eau salée (Figure 10).

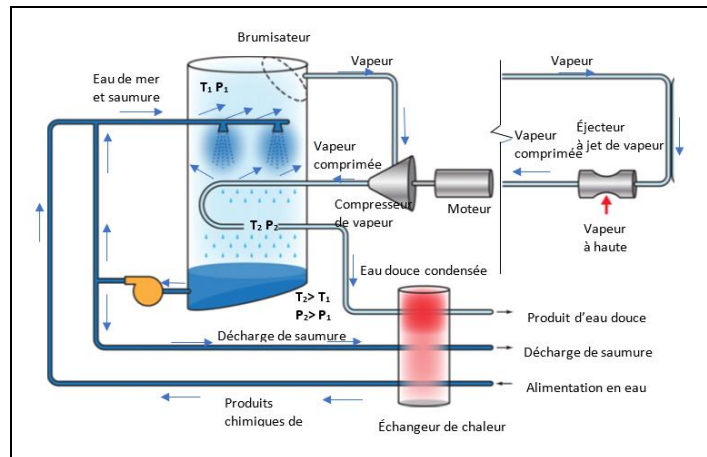


Figure 10: Schéma de principe des unités VC (MVC et TVC) [16]

L'eau d'alimentation entre dans le procédé VC à travers un échangeur de chaleur, et des vapeurs sont générées dans l'évaporateur et comprimées par des moyens mécaniques (MVC) ou thermiques (TVC). La compression de la vapeur augmente sa température d'une quantité suffisante pour servir de source de chaleur. La saumure concentrée est retirée de l'évaporateur par la pompe de récirculation concentrée. Ce flux est ensuite divisé, et une partie est mélangée avec l'alimentation entrante et le reste est pompé vers les déchets. Les unités VC sont généralement de petite taille et sont souvent utilisées dans les hôtels, les centres commerciaux et les applications industrielles [6, 16].

La faible utilisation du procédé à compression de vapeur est liée probablement au fait que le marché des compresseurs de vapeur d'eau n'est pas suffisamment développé actuellement dans le domaine des grandes puissances. Il en résulte un coût unitaire relativement élevé et un manque de crédulité de la part des utilisateurs, dans ces matériels [20].

2.3. PROCESSUS MEMBRANAIRES

2.3.1. L'électrodialyse

L'électrodialyse (ED) est un procédé de séparation électrochimique qui fonctionne à la pression atmosphérique et utilise un courant électrique continu pour déplacer les ions (sels) de manière sélective à travers une membrane, laissant ainsi de l'eau douce derrière. Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes, des membranes échangeuses d'anions et des membranes échangeuses de cations [6].

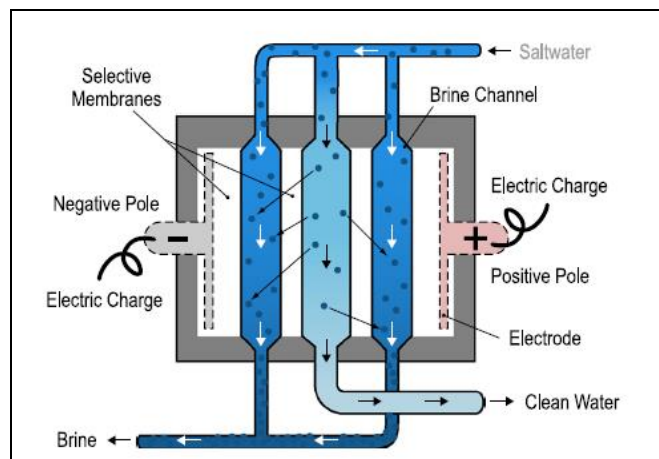


Figure 11: Schéma de principe de l'unité d'électrodialyse [6]

Le principe de cette méthode repose sur l'utilisation d'un champ électrique pour séparer les ions dissouts de l'eau (Figure 11), les électrodes (généralement construites en niobium ou en titane avec un revêtement de platine) sont connectées à une source externe de courant continu dans un récipient contenant de l'eau salée contenant une membrane sélective en anions connectée en parallèle pour former des canaux. Lorsque de l'eau saumâtre coule entre ces canaux, de l'électricité chargeant les électrodes, les ions de sel positifs se propagent à travers la membrane perméable aux cations vers les électrodes négatives et les ions de sel négatifs se propagent à travers la membrane perméable aux anions jusqu'à l'électrode positive, ce qui entraîne l'élimination de la salinité de l'eau [21].

2.3.2. L'osmose inverse

L'OI est la technologie de dessalement la plus couramment utilisée. Sa capacité installée varie de $0,1 \text{ m}^3 / \text{jour}$ (utilisée dans les applications marines et domestiques) à $395\,000 \text{ m}^3 / \text{jour}$ (pour les applications commerciales) [16]. Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants (figure 12): la membrane proprement dite; le module; la pompe haute pression; éventuellement un système de récupération d'énergie qui peut être soit une turbine soit une pompe intégrée; le post-traitement et le prétraitement [22-24].

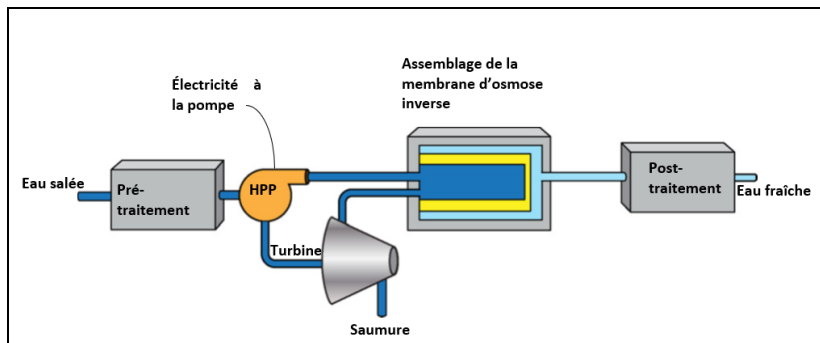


Figure 12: Schéma de principe du système RO [16]

Dans le prochain chapitre, nous allons traiter en détail la technologie de désalinisation de l'eau par osmose inverse qui est le cœur de notre projet de recherche.

CHAPITRE 3

L'OSMOSE INVERSE

3.1. PRINCIPE DE BASE DE LA TECHNOLOGIE D'OSMOSE INVERSE

L'osmose inverse (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 [17]. Cette technologie est utilisée pour réduire le taux des solides dissous et les particules en suspension dans l'eau. Les membranes d'osmose inverse sont largement utilisées pour le dessalement de l'eau salée (eau de mer, eau saumâtre, eau de lac) dans le but de production d'une eau déminéralisée, devant les procédés d'évaporation depuis les années 2000 [25]. Comme le montre le tableau 2, l'OI offre la meilleure filtration actuellement disponible, rejetant la plupart des solides dissous ainsi que des solides en suspension.

3.1.1. Aperçu historique de la technologie d'osmose inverse

Bien que le phénomène à la base de cette séparation par membranes ait été mis en évidence dès le 18^{ème} siècle, l'un des plus anciens documents enregistrés sur les membranes semi-perméables était en 1748, lorsque Abbe Nollet a observé le phénomène d'osmose. L'industrialisation des techniques membranaires n'a connu son essor que dans les années 60. C'est en 1959 que C. E. Reid et E.J. Breton de l'Université de Floride ont démontré les capacités de dessalement d'un film en acétate de cellulose. Ils ont évalué les membranes semi-perméables, candidates dans une approche d'essai et d'erreur, en se concentrant sur les films polymères contenant des groupes hydrophiles [26].

Tableau 2 : Domaines d'application des membranes de filtration

Paramètre	Filtration sur sable	Microfiltration (MF)	Ultrafiltration (UF)	Nanofiltration (NF)	Osмосe Inverse (OI)
Tailles des pores (µm)	< 10-0,1	0,1-10	0,1-0,01	0.01- 0,001	> 0.001
Espèces retenues	Particules Pollens	Colloïdes Micro-organismes Levures	Virus Matières organiques Polymères	Ions divalents Petites molécules organiques	La plupart des éléments (sels) dissous
Pressions (bar)	0,1-0,2	0,2-1	1-5	5-15	15-80
Flux(l/m²/h)	2.000-10.000	150 -300	50 -200	15-50	15-30
Application	Clarification : réduction des matières en suspension	Clarification : Réduction turbidité et colloïdes	Clarification : Réduction turbidité et colloïdes	Adoucissement : élimination de la matière organique, des pesticides, de la couleur	Dessalement Traitement des métaux : zéro rejet, recyclage,

Source : [17, 27]

3.1.2. Mode d'action de la membrane d'osmose inverse

On imagine deux espaces contenant de l'eau salée à deux concentrations différentes et séparés d'une membrane semi-perméable. L'eau va passer spontanément de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée. C'est le phénomène d'osmose. L'eau continue de couler jusqu'à ce que la solution diluée atteigne une valeur spécifique de pression, qu'on appelle la pression osmotique. L'application d'une pression supérieure à la pression osmotique forcera l'eau à s'écouler dans la direction opposée de la solution salée vers l'eau pure (figure 13). Cette modification de la direction d'écoulement est appelée osmose inverse (OI) [17, 26].

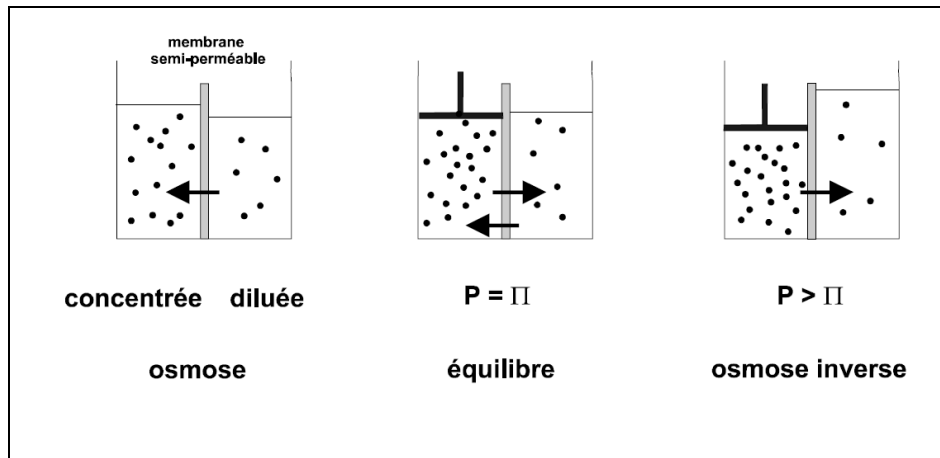


Figure 13 : Osmose, équilibre osmotique et osmose inverse [28]

3.2. DESCRIPTION PHÉNOMÉNOLOGIQUE DES MÉCANISMES DE TRANSPORTS DANS L'OSMOSE INVERSE

Le transport à travers les membranes d'OI, cependant, est contrôlé par diffusion, et aucun canal ouvert n'existe pour l'écoulement des pores ; le mécanisme de transport d'OI a été appelé solution-diffusion ([29], [30], [31],[32]). Dans le modèle de solution- diffusion, le transport de l'eau à travers une membrane d'OI se fait en trois étapes distinctes :

absorption à la surface de la membrane, diffusion à travers l'épaisseur de la membrane et désorption de la surface du perméat de la membrane. Une fois qu'une molécule d'eau a été absorbée à la surface de la membrane, le gradient de concentration d'eau (du système de membrane d'eau) à travers la membrane entraîne la diffusion des molécules d'eau dans le gradient de concentration du côté perméat de la membrane. La molécule d'eau se désorbe alors de la membrane et devient une partie du perméat en vrac. Un développement complet et une explication du modèle de solution-diffusion pour le transport à travers les membranes d'OI peuvent être trouvés plus loin dans notre revue de littérature. Une membrane d'OI est exploitée en réalisant une pression hydrostatique supérieure à la pression osmotique de la solution.

La différence de pression positive crée une différence de potentiel chimique (gradient de concentration) à travers la membrane qui entraîne le liquide à travers la membrane contre la direction naturelle de l'osmose (le mouvement des molécules d'eau d'une zone de forte concentration vers une zone de faible concentration). Tandis que les sels sont retenus et concentrés sur la surface influente de la membrane. Un certain passage de sel à travers la membrane se produit ; le passage du sel pour la même membrane augmente avec la concentration en sel et la température. Le transport de masse à travers les membranes OI peut être décrit comme suit [33]:

$$J_w = A_w(\Delta P - \Delta \Pi) \quad (\text{Équation III.1}) [33]$$

Où J_w est le flux du liquide (eau dans notre cas) à travers la membrane en kg/s.m^2 , A_w est le coefficient de perméabilité en $\text{kg de solvant/s.m}^2.\text{atm}$, ΔP est la différence de pression transmembranaire en N/m^2 ou Pa et $\Delta \Pi$ est la différence de pression osmotique entre l'eau brute d'alimentation et l'eau produite (perméat) en N/m^2 ou Pa ($1\text{N/m}^2=1\text{Pa}=9,869.10^{-6}$ atm).

Les coefficients de perméabilité de la membrane sont déterminés expérimentalement pour un type particulier de membrane. Par exemple, pour les membranes en acétate de

cellulose, les constantes de perméabilité à l'eau sont égales à 5.10^{-4} kg de solvant / s.m².atm.

La pression osmotique, pour une solution idéale, se calcule à partir de l'équation de Van't Hoff [34]:

$$\pi \times V = -R \times T \times \ln(1-f_s) \quad (\text{Équation III.2}) [34]$$

Où :

- π est la pression osmotique (Pa)
- V est le volume molaire occupé par le solvant (m³/mol)
- R est la constante des gaz parfaits (J/ mol. K)
- T est la température absolue (K)
- f_s est la fraction molaire du soluté : ce paramètre traduit la concentration du sel dans l'eau (kg/m³).

3.2.1. Mécanisme de transfert dans l'osmose inverse

Le transfert de matières en osmose inverse est généralement décrit par le modèle de solution-diffusion. Celui-ci considère que le taux de transmission d'un soluté à travers une membrane d'osmose inverse résulte d'un processus dans lequel le soluté se solubilise dans la phase membranaire puis diffuse à travers celle-ci pour rejoindre le compartiment perméat sous l'action d'un gradient de concentration et de pression [35].

La théorie la plus couramment utilisée est basée sur un modèle de solubilisation diffusion. Le modèle de transport de solubilisation-diffusion appelé également « solution-diffusion » a été décrit la première fois par Lonsdale et *al.* [26]. Ce modèle suppose que, pour une membrane non poreuse (dense), la pression à l'intérieur de cette membrane est uniforme et que le gradient de potentiel chimique à travers la membrane est uniquement

exprimé par un gradient de concentration. Cela est vrai tant pour le solvant que pour le soluté en solution [36].

La propriété la plus importante des membranes est leur capacité à contrôler le taux de perméation de différentes espèces. Le transport moléculaire à travers les membranes peut être décrit par un écoulement à travers des pores permanents ou par le mécanisme de diffusion-solution. Les deux modèles utilisés pour décrire le mécanisme de perméation sont illustrés à la figure 14. L'un est le modèle d'écoulement des pores, dans lequel les perméats sont transportés par un flux convectif commandé par la pression à travers de minuscules pores. La séparation se produit parce que l'un des perméats est exclu (filtré) de certains des pores de la membrane à travers lesquels les autres perméats se déplacent. L'autre modèle est le modèle solution-diffusion, dans lequel les agents perméats se dissolvent dans le matériau de la membrane et diffusent ensuite à travers la membrane dans un gradient de concentration. Les perméats sont séparés en raison des différences de solubilité dans la membrane et des différences de vitesse de diffusion à travers la membrane. [22, 28, 35, 36].

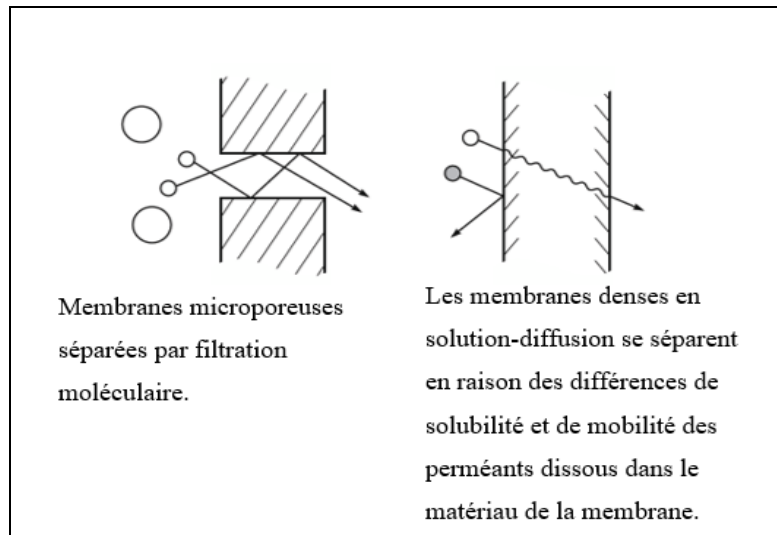


Figure 14 : Transport moléculaire à travers les membranes [35]

Ainsi, en osmose inverse, deux constituants sont impliqués : l'eau et les sels solubles dans l'eau. Pour la suite du développement des équations, le solvant (généralement l'eau) est représenté par l'indice « i » et le sel par l'indice « j ».

3.2.2. Loi régissant le modèle de solubilisation-diffusion

La diffusion, qui est la base du modèle solubilisation-diffusion, est le processus par lequel les perméats sont transportés d'une partie d'un système à l'autre par un gradient de concentration [28]. Les molécules de perméation individuelles dans le milieu membranaire sont en mouvement moléculaire aléatoire constant, mais dans un milieu isotrope, les molécules individuelles n'ont pas de direction de mouvement préférée. Bien que le déplacement moyen d'une molécule à partir de son point de départ puisse être calculé après un certain laps de temps, rien ne peut être dit sur la direction dans laquelle une molécule individuelle va se déplacer. Cependant, si un gradient de concentration de molécules de perméat est formé dans le milieu, de simples statistiques montrent qu'un transport net de matière se produira de la concentration la plus élevée à la zone de concentration la plus basse. Par exemple, lorsque deux éléments de volume adjacents ayant des concentrations de perméat légèrement différentes sont séparés par une interface, alors simplement à cause de la différence dans le nombre de molécules dans chaque élément de volume, plus de molécules se déplaceront du côté concentré vers le côté moins concentré de l'interface que dans l'autre sens. Ce concept a d'abord été reconnu théoriquement et expérimentalement par Fick en 1855 [35]. Fick a formulé ses résultats sous la forme de l'équation appelée à présent la loi de diffusion de Fick, qui dit:

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (\text{Équation III.3}) [35]$$

Où J_i est la vitesse de transfert du composant i ou flux ($\text{g}/\text{cm}^2.\text{s}$) et dc_i/dx est le gradient de concentration du composant i ($\text{g}/\text{cm}^3.\text{cm}$). Le terme D_i est appelé coefficient de diffusion (cm^2/s) et constitue une mesure de la mobilité des molécules individuelles. Le

signe moins indique que la direction de la diffusion est inférieure au gradient de concentration.

La diffusion est un processus intrinsèquement lent. Dans les processus de séparation contrôlés par diffusion, des flux utiles à travers la membrane sont obtenus en rendant les membranes très minces et en créant de grands gradients de concentration dans la membrane.

La description mathématique de la diffusion dans les membranes sur la base de la thermodynamique est que les forces motrices de la pression, température, concentration et potentiel électrique sont interdépendantes et que la force motrice globale produisant le mouvement d'un perméat est le gradient de son potentiel chimique [35].

$$J_i = -L_i \cdot C_i \cdot \nabla \mu_i \quad (\text{Équation III.4}) [35]$$

où $\nabla \mu_i$ est le gradient de potentiel chimique du composant i (J/mol) et L_i est un coefficient de proportionnalité (m^2/s) reliant cette force potentielle chimique au flux.

En limitant l'approche aux forces motrices générées par les gradients de concentration et de pression, le potentiel chimique s'écrit de la manière suivante [35]:

$$d\mu_i = R T d\ln(\gamma_i \cdot n_i) + v_i dp \quad (\text{Équation III.5}) [35]$$

où n_i est la fraction molaire (mol/mol) du composant i , γ_i est le coefficient d'activité (mol/mol) liant la fraction molaire à l'activité, p est la pression (Pa) et v_i le volume molaire du composant i (m^3/mol).

Dans les phases incompressibles, comme dans une membrane liquide ou solide, le volume ne change pas avec la pression. Dans ce cas, l'intégration de l'équation III.5 en ce qui concerne la concentration et la pression donne :

$$\mu_i = \mu_i^0 + R T \ln(\gamma_i n_i) + v_i (p - p_i^0) \quad (\text{Équation III.5.1}) [35]$$

où μ_i^0 est le potentiel chimique de i pur (J/mol) à une pression de référence, p_i^0 (Pa).

Dans les gaz compressibles, le volume molaire change avec la pression. L'utilisation des lois des gaz idéales dans l'intégration de l'équation III.5 donne :

$$\mu_i = \mu_i^0 + R T \ln(\gamma_i n_i) + R T \ln \left(\frac{p}{p_i^0} \right) \quad (\text{Équation III.5.2}) [35]$$

Pour que le potentiel chimique de référence μ_i^0 soit identique dans les équations III.5.1 et III.5.2, la pression de référence p_i^0 est définie comme la pression de vapeur saturante de i, $p_{i_{sat}}$. Les équations III.5.1 et III.5.2 peuvent ensuite être réécrites comme suit pour les liquides incompressibles et la phase membranaire:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R T \ln(\gamma_i n_i) + v_i (p - p_{i_{sat}}) \quad (\text{Équation III.5.3}) [35]$$

et comme suit pour les gaz compressibles [35, 36]:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R T \ln(\gamma_i n_i) + R T \ln \left(\frac{p}{p_{i_{sat}}} \right) \quad (\text{Équation III.5.4}) [35, 36]$$

3.2.3. Hypothèses utilisées

Le flux de chaque espèce i est déterminé par une relation de la forme :

$$J_i = -\frac{\bar{D}_i \bar{C}_i}{RT} \nabla \mu_i = -\frac{\bar{D}_i \bar{C}_i}{RT} \left(\frac{\delta \mu_i}{\delta C_i} \nabla \bar{C}_i + \bar{V}_i \nabla P \right) \quad (\text{Équation III.6.1}) [35, 36]$$

où:

\bar{D}_i coefficient de diffusion du constituant i dans la membrane (m^2/s),

\bar{C}_i concentration du constituant i dans la membrane (kg/m^3).

Les modèles mathématiques sont basés sur des hypothèses qui permettent à la fois d'alléger les équations mathématiques, et de se rapprocher le plus possible de la réalité du problème physique.

Pour le modèle de solution diffusion, la première hypothèse qui régit le transport à travers les membranes est qu'aux deux interfaces de la membrane, du côté de l'alimentation et du côté du perméat, il existe un équilibre thermodynamique entre les différents constituants dans les deux solutions, et dans la membrane. La présence de l'équilibre thermodynamique sur les deux interfaces de la membrane implique l'égalité des potentiels chimiques [35, 37]. Le modèle de filtration suppose alors que le coefficient de diffusion est indépendant de la concentration.

La deuxième hypothèse concerne la manière avec laquelle est exprimé le potentiel chimique à travers la membrane [37]. Le modèle de solution-diffusion suppose que lorsqu'une pression est appliquée à une membrane dense, cette pression reste constante à travers toute la membrane et est égale à sa valeur la plus grande. Par conséquent, les propriétés de la membrane sont indépendantes de la pression.

La troisième hypothèse suppose que la diffusion d'un constituant dépend seulement du gradient de potentiel chimique de ce constituant et qu'elle est indépendante du gradient de potentiel chimique des autres constituants [28].

Les conséquences de ces trois hypothèses sont illustrées dans la figure 15, dans la page qui suit, qui montre un schéma du profil du potentiel chimique, pression et de l'activité du solvant à travers une membrane osmotique selon le modèle de solution-diffusion.

Avec ces trois hypothèses, l'équation précédente (équation III.6.1) du flux du constituant i peut être intégrée en supposant que la différence de concentration en eau à travers la membrane est faible:

$$J_i = -\frac{\bar{D}_i \bar{C}_i \bar{V}_i}{RT_e} (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (\text{Équation III.6.2}) [28]$$

où:

e (m) : épaisseur effective de la membrane,

ΔP (Pa) : différence de pression de part et d'autre de la membrane,

$\Delta \Pi$ (Pa) : différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

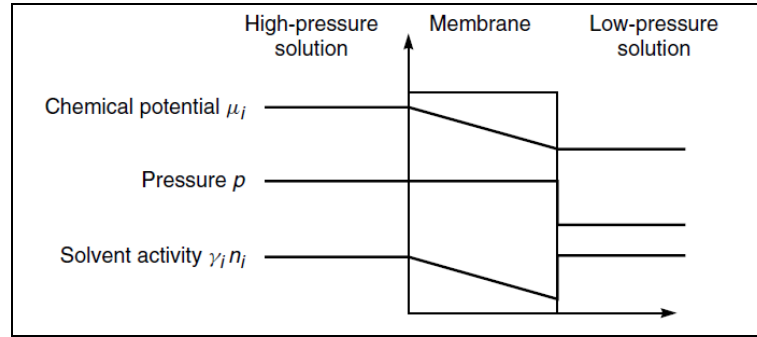


Figure 15 : Schéma du modèle de solution-diffusion [35]

Dans le cas de membranes très sélectives le terme $\bar{V}_i \nabla P$ de l'équation III.6.1 est négligeable devant $\delta \mu_i / \delta C_i \nabla \bar{C}_i$ et l'on obtient pour le flux de soluté :

$$J_i = -\frac{\bar{D}_i}{e} \Delta C_{im} = -\frac{\bar{D}_j H}{e} \Delta C_{ij} \quad (\text{Équation III.6.3}) [28]$$

où:

J_i (kg/m².s) : flux de soluté à travers la membrane,

D_i (m²/s) : coefficient de diffusion du soluté dans la membrane,

$C_{im,ij}$ (kg/m³) : concentration du soluté dans la membrane, la solution respectivement.

Comme aucune des propriétés de la membrane ne dépend de la pression ou de la concentration des solutions, le terme $-(\bar{D}_i \bar{C}_i \bar{V}_i / RTe)$ est considéré comme une constante de la membrane appelée A_w dans la littérature; de même le terme $-(\bar{D}_j H / e)$ est considéré

comme une constante relative au transfert de soluté que nous la plupart des partisans appellent A_s [38].

Ces constantes A_w et A_s représentent des flux unitaires du solvant ou du soluté pour une membrane donnée appelées respectivement la perméabilité de la membrane au solvant et au soluté.

CHAPITRE 4

SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR LE DESSALEMENT

Les sources d'énergies renouvelables telles le solaire thermique, le solaire photovoltaïque, l'éolien et la géothermie sont actuellement utilisés pour alimenter les systèmes de dessalement. Ces sources renouvelables sont exploitées grâce à des technologies éprouvées, de plus en plus maîtrisées et économiquement prometteuses pour les régions isolées, où la connexion au réseau électrique public n'est pas rentable ou irréalisable, et où la pénurie d'eau est sévère.

Le choix de la source d'énergie appropriée pour les technologies de dessalement dépend d'un certain nombre de facteurs. Il s'agit notamment de la taille de l'usine, de la salinité de l'eau, de la disponibilité de l'électricité au réseau électrique, de l'infrastructure technique et du type et potentiel de la source locale d'énergie renouvelable. Parmi les nombreuses combinaisons possibles de technologies de dessalement et d'énergie renouvelable, certaines semblent être plus prometteuses en termes de faisabilité économique et technologique que d'autres. Cependant, leur application dépend fortement de la disponibilité locale des ressources énergétiques renouvelables et de la qualité de l'eau à dessaler.

Le Tableau 3 ci-après présente une combinaison entre les systèmes d'énergie renouvelable et les techniques de dessalement adéquat à chaque technique [39].

Tableau 3 : Systèmes d'énergie renouvelable utilisés dans le dessalement

Système d'énergie renouvelable	Eau d'alimentation	Technologie de dessalement
Solaire thermique	Eau de mer	MSF
	Eau de mer	MSD
Solaire Photovoltaïque	Eau de mer	Osмосe Inverse (OI)
	Eau saumâtre	Osмосe Inverse (OI)
	Eau saumâtre	Electrodialyse (ED)
Energie éolienne	Eau de mer	Osмосe Inverse (OI)
	Eau saumâtre	Osмосe Inverse (OI)
	Eau de mer	Compression Mécanique de la Vapeur (MVC)
Energie géothermique	Eau de mer	MED

Source : [24].

Nous remarquons que pour la technique de dessalement d'eau par osmosse inverse, les formes d'ER les plus utilisées sont l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne. De ce fait, dans notre rapport de mémoire nous nous intéressons uniquement à ces deux formes d'énergie qui seront développées dans la partie qui suit.

4.1. L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

La transformation de l'énergie solaire consiste en une grande famille de systèmes différents capables de répondre à une variété de besoins en services énergétiques. Les techniques solaires peuvent fournir de la lumière naturelle, de la chaleur, du refroidissement et de l'éclairage [40]. La production d'électricité peut être réalisée de deux manières. Dans le premier cas, l'énergie solaire est convertie directement en électricité dans un appareil appelé cellule photovoltaïque. Dans le second cas, l'énergie thermique solaire est utilisée dans une centrale de concentration d'énergie solaire pour produire de la chaleur à haute

température, qui est ensuite convertie en électricité. Dans ce qui suit, nous allons présenter de manière globale le principe physique de la conversion photovoltaïque, ainsi que la composition typique des systèmes à énergie solaire PV. Nous rappellerons aussi quelques données de base concernant le gisement solaire [41].

La technologie photovoltaïque peut être connectée directement à un système d'osmose inverse. Shawky et *al.* ont testé un prototype d'usine de dessalement mobile sans batteries, basé sur la combinaison de PV-OI, pour une production prévue de 4-5 m³/jour d'eau potable [42]. Une autre façon d'utiliser le PV est en combinaison avec l'électrodialyse. Plusieurs installations pilotes de systèmes PV-ED ont été mises en place. Natasha C. Wright a analysé le dessalement solaire pour les villages indiens et a conclu que le système PV-ED semble être plus avantageux pour le dessalement des eaux souterraines [43].

4.1.1. Gisement solaire

- Le Soleil

Le Soleil est une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Le Soleil tire son énergie de réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium au sein de son noyau, dont la température atteint 15 millions de degrés. Elles transforment chaque seconde 564.10⁶ tonnes d'hydrogène en 560.10⁶ tonnes d'hélium, la masse perdue étant convertie en énergie, représentant un flux énergétique de 3,87.10²⁶ W [44].

Le soleil est l'étoile la plus proche de la Terre. Les interactions entre le soleil et la Terre entraînent les saisons, les courants océaniques, les conditions météorologiques, et le climat [40].

L'énergie solaire est la plus abondante de toutes les ressources énergétiques. En effet, la vitesse à laquelle l'énergie solaire est interceptée par la Terre est d'environ 10 000 fois supérieure à la vitesse à laquelle l'humanité consomme de l'énergie [23]. Elle provient de

la fusion d'hydrogène en hélium au sien du noyau de notre étoile. Le rayonnement émis du soleil est généralement caractérisé par son spectre et par la constante solaire.

- Constante solaire

La constante solaire est l'énergie rayonnante émise par le Soleil dans toutes les longueurs d'onde arrivant chaque seconde sur une surface d'un mètre carré à l'extérieur de l'atmosphère terrestre. Elle varie de 1410 W/m^2 à 1320 W/m^2 , sa moyenne annuelle étant égale à 1368 W/m^2 [41, 44].

- Spectre solaire

Chaque corps chaud émet la radiation à son entourage. Selon la loi de corps noir, la température de surface détermine le spectre de radiation. Dans le cas du soleil, la température superficielle est de $6\ 000 \text{ K}$, qui mène à un spectre idéal de corps noir représenté dans la figure 16. Le spectre réel mesuré en dehors de l'atmosphère terrestre (AM0) suit approximativement cette ligne idéale. Le terme AM0 signifie que cette lumière n'a pas traversé l'atmosphère [43].

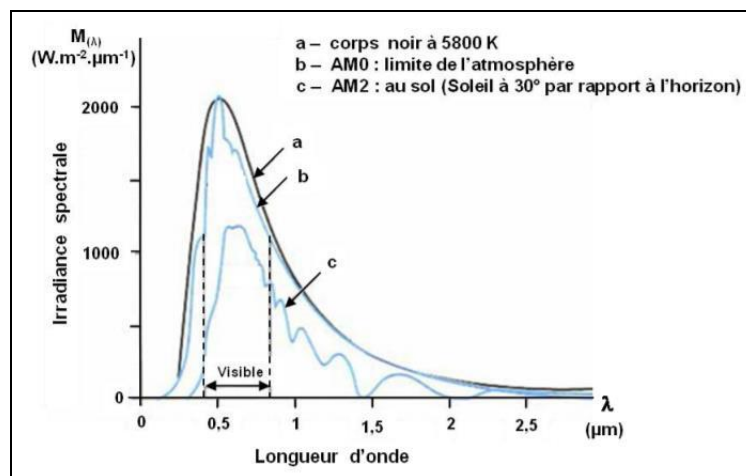


Figure 16 : Spectre solaire [42, 44]

Cependant, le spectre change lorsque le rayonnement passe dans l'atmosphère. En raison des facteurs suivants :

- Réflexion par la surface terrestre. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope.

- Diffusion, le phénomène de diffusion est un phénomène macroscopique résultant d'interactions au niveau microscopique entre le rayonnement solaire et les fines particules ou les molécules contenues dans l'atmosphère.

- Absorption par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.

- Masse d'air

Comme nous l'avons remarqué dans le paragraphe 1.2.3, le spectre solaire change en passant dans l'atmosphère. Pour tenir compte du trajet parcouru par les photons, on utilise la notion masse d'air (Air Mass) désignée par AM (voir figure 17). Cette distance est déterminée en fonction de l'angle h . Pour un angle (h) connu, la valeur de AM est donnée par la relation suivante : $AM = 1/\sin h$ [45].

Pour le Soleil au zénith ($h = 90^\circ$), il vient $m = 1$ (AM 1 = Air Mass one en anglais), et pour le Soleil vu sous un angle $h = 30^\circ$, il vient $m = 2$ (AM 2) [44].

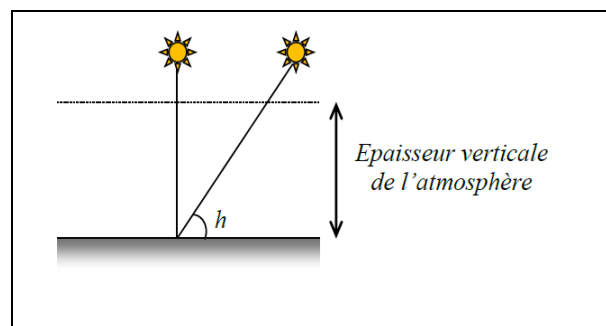


Figure 17 : Notion de masse d'air [44]

- Réception du rayonnement solaire

On distingue deux grandeurs pour quantifier le rayonnement solaire reçu par une surface plane donnée.

- L'irradiation solaire est l'énergie solaire reçue par une surface unitaire. Elle s'exprime en général en kWh/m².

- L'éclairement solaire est la puissance solaire reçue par une surface unitaire. Elle s'exprime en général en W/m².

La position au cours du temps du Soleil peut être repérée par ses coordonnées locales (coordonnées dépendant du lieu d'observation) définies par deux angles comme le montre la figure 18 ci-après :

- la hauteur h : angle entre la direction du Soleil et sa projection sur le plan horizontal (donc le sol) ;

- l'azimut a : angle entre cette projection et la direction du Sud, compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

Quant à l'orientation du capteur, l'idéal est de faire face à l'équateur, donc une orientation vers le Sud dans l'hémisphère nord, et une orientation vers le Nord dans l'hémisphère sud [44].

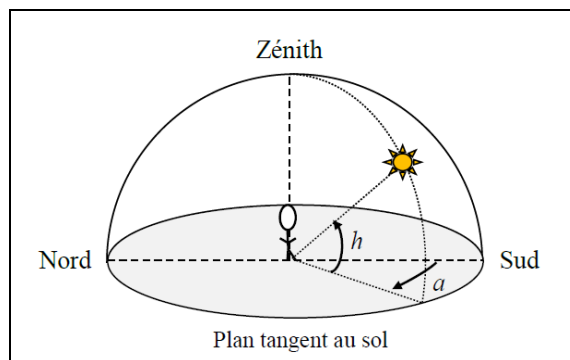


Figure 18 : Coordonnées locales du soleil [44]

L'énergie solaire est transformée en énergie thermique ou électronique grâce aux effets thermiques et photovoltaïques qui ont lieu dans certains matériaux [43]. Dans le paragraphe suivant, cet effet thermique ainsi que les cellules photovoltaïques seront décrits.

4.1.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839, par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel. Il a observé cet effet dans une cellule électrolytique, qui était constituée de deux électrodes de platine, placées dans un électrolyte de chlorure d'argent dissous dans une solution acide. Il a noté que le courant de la cellule était amélioré lorsque son installation a été irradiée par la lumière du soleil [43].

En 1876, le philosophe britannique William Grylls Adams avec son étudiant Richard Evans Day ont démontré l'effet photovoltaïque dans une jonction à base de platine et de sélénium semi-conducteur, mais avec une très mauvaise performance. Sept ans plus tard, l'inventeur américain Charles Fritts a réussi à fabriquer un dispositif photovoltaïque basé sur une jonction or-sélénium. L'efficacité de conversion d'énergie de ce dispositif était de 1%.

Le véritable développement des cellules solaires telles que nous les connaissons aujourd'hui a commencé au laboratoire de Bell aux États-Unis. En 1954, les scientifiques Daryl M.Chapin, Calvin S.Fuller et Gerald L.Pearson, ont fabriqué une cellule solaire à base de silicium avec une efficacité d'environ 6% [46].

Au fil des années, l'efficacité a atteint 24% pour les cellules solaires à base de Si. Aujourd'hui, les cellules solaires à base de Si sont de loin les plus dominantes et représentent 99% de l'industrie du PV [29].

- Définition d'une cellule PV

La technologie actuelle de conversion PV est basée sur des cellules photovoltaïques où l'énergie solaire est convertie en électricité à courant continu. Un ensemble des cellules photovoltaïques est appelé module photovoltaïque (Figure 19).

Ces derniers combinés avec un ensemble de composants supplémentaires (onduleurs, batteries...) forment un système photovoltaïque. Les cellules les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs.

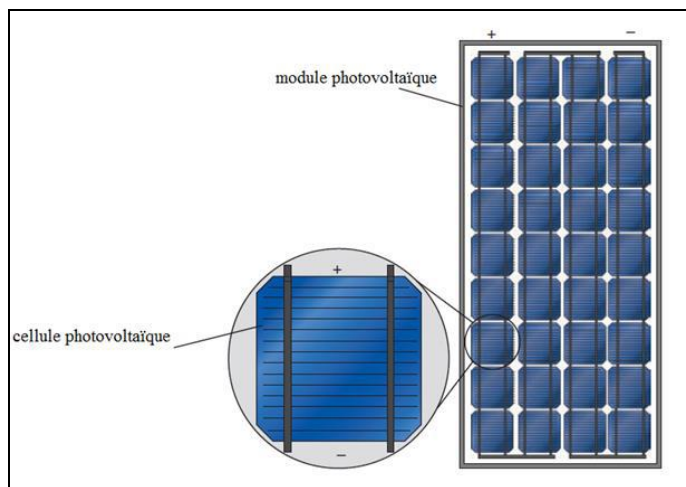


Figure 19 : Cellule solaire et module solaire [47]

- Principe d'une cellule PV

Pour réaliser une cellule photovoltaïque, il faut la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneurs d'électrons) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction PN.

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact, une très grande différence de concentration d'électrons entre les régions de type N et P provoque un courant de diffusion d'électrons du matériau de type N à travers la jonction métallurgique dans le matériau type P. La jonction métallurgique désigne l'interface entre les régions de type N et P. De même, la différence de concentration de trous provoque un courant de diffusion des trous du matériau type P au matériau type N.

Cependant, dans le cas des cellules photovoltaïques, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul, il faut la présence d'un apport d'énergie, sous forme de photon.

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau du matériau dopé n et l'autre au niveau du matériau dopé p : une différence de potentiel et un courant électrique sont créés (Figure 20).

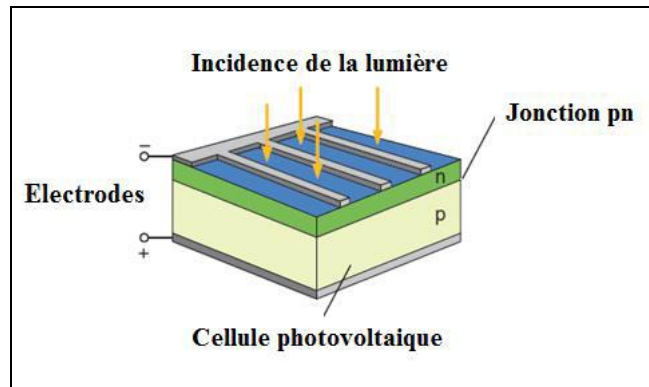


Figure 20 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [46]

Les électrons libres créés vont donc passer dans la zone n, et les trous créés dans la zone p, ce qui occasionne un courant dit photo-induit d'intensité I_{ph} (donc compté négativement avec la convention choisie précédemment), qui augmente avec le nombre de photons, donc la puissance du rayonnement incident. C'est l'effet photovoltaïque [44]. L'effet photoélectrique consiste en l'éjection d'un électron, qualifié de « photoélectron », lorsque la matière absorbe de la lumière.

- Type des cellules photovoltaïques

➤ Cellule photovoltaïque inorganique

Les cellules photovoltaïques inorganiques sont des cellules à base des semi-conducteurs, les plus répandues sont principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs. Le silicium est le matériau semi-conducteur de prédilection qui a été retenu dans la construction des modules photovoltaïques, car il est en large abondance dans la croûte terrestre et facilement exploitable. La filière de silicium est elle-même subdivisée en plusieurs technologies selon la nature du silicium employé.

i. Cellules au silicium monocristallin

Les cellules à base de silicium monocristallin sont des cellules photovoltaïques de la première génération.

Le silicium monocristallin est la forme du silicium qui donne le meilleur rendement de conversion photovoltaïque, de 12 à 18 %. Les inconvénients de cette technologie sont les faibles rendements obtenus sous un faible éclairage et le coût de production des matériaux.

ii. Cellules au silicium poly-cristallin

Le silicium polycristallin, souvent abrégé en polysilicium, est un matériau qui comprend de nombreux petits grains cristallins, avec des orientations aléatoires. Cette technologie est moins couteuse mais aussi moins performante à cause des impuretés. Elles ont un rendement de 11 à 15 %.

➤ Cellule photovoltaïque organique

Les cellules solaires organiques sont encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité. Un rendement nominal de 10 % est l'objectif de recherche pour les années à venir . Le principe de ces cellules est le même que les cellules à base des semi-conducteurs. Les paires électrons-trous sont créées grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) et des niveaux dits LUMO (Lower Unocupied Molecular Orbital) [46].

- **Utilisations des cellules photovoltaïques**

Les cellules sont assemblées en modules soit en série soit en parallèles en fonction des caractéristiques envisagées.

➤ Montage en série

Pour utiliser les cellules dans un système et afin d'augmenter la tension délivrée par les cellules, on est amené à les associer en série. Les cellules sont traversées par le même

courant (Figure 21.a) [48]. Et la tension aux bornes du module est la somme des tensions de chaque cellule (Figure 21.b). En revanche, le courant de la chaîne entière est déterminé par la cellule qui délivre le plus petit courant. Par conséquent, le courant total dans une chaîne de cellules solaires est égal au plus petit courant généré par une seule cellule solaire.

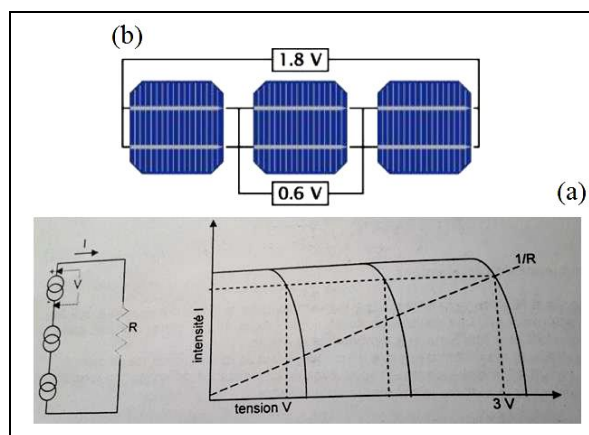


Figure 21 : Montage en séries de cellules photovoltaïques [48]

➤ Montage en parallèle

Pour accroître le courant, il suffit de placer en parallèle un certain nombre de cellules élémentaires comme l'illustre la Figure 22 qui montre trois cellules solaires connectées en parallèle. Le courant qui passe dans la résistance de charge est trois fois celui qui circule dans chacune des cellules identiques, tandis que la tension est la même sur toutes les cellules solaires [48].

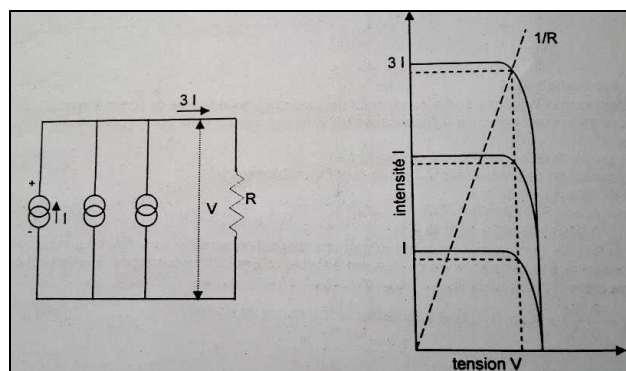


Figure 22 : Montage en parallèle de cellules photovoltaïques [48]

4.2. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne est l'énergie extraite de l'air en mouvement. Le vent avait été largement utilisé dans le passé. C'est l'exploitation de l'action du vent sur des surfaces mobiles, tant pour la puissance mécanique que pour le transport qui permet de produire ce type d'énergie.

C'est en 1888 que l'américain Charles F. Brush construit le premier aérogénérateur du monde, qu'il utilisa pour alimenter son domicile en électricité, en lui greffant des batteries de stockage [49].

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne reste la plus compétitive. Le marché mondial de l'énergie éolienne a connu une croissance de 41,7 % en 2009 et une hausse moyenne de 28,6 % par an au cours des treize dernières années. Selon le secrétaire général du Global Energy Wind Council, l'énergie éolienne pourrait fournir un cinquième de l'électricité mondiale dans vingt ans.

Dans ce chapitre, nous allons présenter de manière globale le principe physique de la conversion éolienne, ainsi que la composition typique des systèmes à énergie éolienne. Nous rappelons également quelques notions de base du potentiel éolien.

4.2.1. Principe de fonctionnement

Pour faire fonctionner une éolienne, trois paramètres doivent être réunis : une vitesse de rotation des pales constante et lente (les modèles à « vitesse variable » possèdent une rotation des pales constante à 10 ou 20 % près) ; une plage de « fonctionnement » (de rotation) des pales quasi permanentes : sur un site éolien, le pourcentage du temps où la vitesse du vent est comprise entre 5 et 90 km/h (celle déclenchant la rotation du rotor) dépasse 95 % (même si l'éolienne produit pendant moins de 70 % du temps) et une orientation de l'éolienne (nacelle et rotor) face au vent [50].

L'éolienne est donc une machine capable de capter l'énergie du vent qui la fait tourner et de la transformer en énergie électrique exploitable. Il s'agit d'un système complexe composé de deux grandes parties : une partie mécanique qui capte l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique rotative. Cette partie est en fait un axe en rotation muni de pales que le vent pousse. Une partie électrique qui se charge de transformer l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il s'agit d'une machine électrique montée en génératrice, et entraînée par l'axe (lui-même communément appelé rotor) [51].

De manière générale, une éolienne à axe horizontal est constituée de quatre grandes parties : la fondation, le mât (ou la tour), la nacelle et le rotor.

- La fondation sert à fixer le mât au sol. Pour les grandes éoliennes, elle peut être constituée de plus de 100 mètres cubes de béton armé.

- Le mât (ou la tour) est constitué d'une structure métallique tubulaire ou en treillis et comporte une échelle pour la maintenance du rotor et des systèmes situés dans la nacelle.

- La nacelle abrite les mécanismes de transmission et de transformation de l'énergie, notamment la génératrice électrique, le multiplicateur de vitesse et le système de frein. La figure ci-dessous représente la nacelle d'une turbine du fabricant français Vergnet.

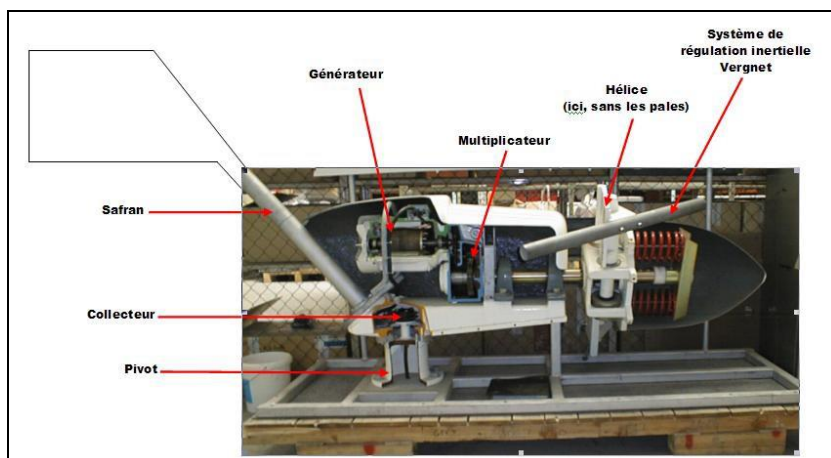


Figure 23: Intérieur d'une éolienne à axe horizontal [52]

- Le rotor de l'éolienne est composé des pales et du moyeu. Il comporte généralement trois pales, mais peut aussi en comporter deux (éolienne bipale) ou qu'une seule (éolienne monopale).

4.2.2. Applications et usages

Il existe deux types d'application de l'énergie éolienne :

- i. Les grands aérogénérateurs récents, installés dans les parcs éoliens on-shore ou off-shore, développent une puissance de quelques centaines de kW jusqu'à 7,5 MW ce qui permet d'alimenter en électricité environ 2000 foyers. Le mât est en général deux fois plus haut que la longueur des pales
- ii. Les petites éoliennes domestiques, destinées aux particuliers sur le même principe. Leur puissance varie entre 0,1 et 20 kW. Le mât mesure généralement entre 3 et 10m. elles sont utilisées pour le pompage comme elles peuvent alimenter un local isolé non reliés au réseau électrique.

Voici un tableau qui résume les caractéristiques techniques de chaque application :

Tableau 4. Caractéristiques technologiques typiques des centrales éoliennes

Type	Caractéristiques typiques		Applications usuelles
	Puissance	Hauteur (m)	
On-shore (MW)	1.5-3.5	60-100	Réseaux électriques
Off-shore (MW)	1.5-5	70-125	Réseaux électriques
Petites turbines (kW)	3-100		Electrification rurale, pompage, éclairage public
Turbines domestiques (kW)	0.1-3		Pompage, électricité isolée

Source : [50].

4.2.3. Architecture des éoliennes

Les éoliennes se divisent du point de vue de leur architecture, en deux grandes familles qui sont les suivantes :

- Les éoliennes à axe vertical : ces machines sont disposées le long d'une tour qui supporte uniquement deux pales symétriques. La génératrice, généralement accompagnée d'une boîte de vitesses, est logée sous ladite tour, au niveau du sol. Cette configuration revendique des avantages certains. D'abord, la disposition des pales permet de capter l'énergie du vent quelle que soit sa direction. De plus, la mécanique étant logée au sol, la maintenance est aisée. Enfin, son coût d'installation est relativement faible. En revanche, elle souffre d'une faible efficacité de conversion de l'énergie. L'illustration majeure de cette technique est l'éolienne Éole située à Cap-Chat en Gaspésie, au Québec. C'est la plus grande éolienne verticale du monde, avec une hauteur totale de près de 130 m. Le figure 25 représente une photo d'Éole prise par la compagnie ATI sur les lieux à Cap Chat.

- Les éoliennes à axe horizontal : elles sont composées d'une tour au sommet de laquelle est montée une nacelle qui contient les parties mécanique et électrique. Cette nacelle supporte aussi le rotor (moyeu et turbine). Les pales de la turbine sont face au vent et captent l'énergie du vent qui les frappe directement, selon leur hauteur par rapport au sol. Cette disposition permet d'aller chercher des vents hauts et puissants, et donc de produire efficacement l'énergie électrique. La figure 24 illustre un exemple d'une éolienne à axe horizontal.

Voici un tableau récapitulation présentant les avantages et les inconvénients de chaque technique (tableau 5) :

Tableau 5: Comparaison des éoliennes à axe horizontal et vertical



	Avantages	Inconvénients	Exemple
Machines à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> + Efficacité de conversion d'énergie élevée, + Autodémarrage en génératrice possible, + Possibilité de capter des vents élevés suivant la hauteur d'installation 	<ul style="list-style-type: none"> - Cout d'installation élevé, - Nécessite une tour robuste, - Nécessite de longs câbles électriques. 	
Machines à axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'installation relativement réduit + Maintenance aisée + Possibilité de capter l'énergie du vent quelle que soit sa direction 	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité de conversion d'énergie faible - Haute variation du couple et des forces exercées sur les pales - Doit démarrer en moteur ce qui implique de la consommation d'énergie. - Contrôle limité sur la vitesse et de la puissance. 	

Figure 24: Modèle réel d'éolienne à axe horizontal*

Figure 25: Modèle réel d'une éolienne à axe vertical : Éole**

Source :[51], *photographie personnelle d'un parc éolien à El Haouria et ** crédit photo : ATI.

Aujourd'hui, la majeure partie des éoliennes qui existent est à axe horizontal. Les avantages présentés dans le tableau précédent justifient cela. De plus, les éoliennes verticales sont menacées de fatigue mécanique prématurée. D'ailleurs, Éole est arrêtée depuis quelques années et ne produit plus d'énergie. Elle sert aujourd'hui de musée historique et de vitrine de la technologie canadienne.

Dans le reste du mémoire, nous allons nous intéresser aux éoliennes à axe horizontal.

4.2.4. Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de Betz)

Pour étudier l'aérodynamique des éoliennes et leur interaction avec le vent, nous avons besoin d'outils mathématiques spécifiques, et nous devons considérer différents théorèmes pour comprendre l'énergie du vent et la façon dont elle est convertie par les éoliennes.

Suivant la théorie du disque [49], nous considérons un disque parfait de surface S traversé par un courant de vent. Considérons quatre points sur une même ligne de courant (figure 26):

- un point en amont (sur A_1) ;
- un point juste avant le capteur proprement dit ;
- un autre juste après le capteur ;
- un dernier en aval (sur A_2).

Aux deux points loin du capteur, sur A_1 et A_2 , la pression est égale à la pression atmosphérique P_{atm} .

Aux deux points proches du capteur, la section est égale à la surface S . Comme le débit massique est constant, la vitesse du vent est la même en ces deux points : V . En revanche il y a une discontinuité de pression entre ces deux points.

L'écoulement est supposé parfait et stationnaire, et le fluide est supposé incompressible (masse volumique constante). L'effet du champ de pesanteur est nul (l'air capté flotte dans l'air "autour", la poussée d'Archimède équilibre exactement le poids de l'air, dont l'éventuel travail - même en supposant une variation d'altitude - est ainsi annulé). On applique le théorème de Bernoulli deux fois, d'une part entre l'amont et le point juste avant, d'autre part le point juste après et l'aval ; on a donc :

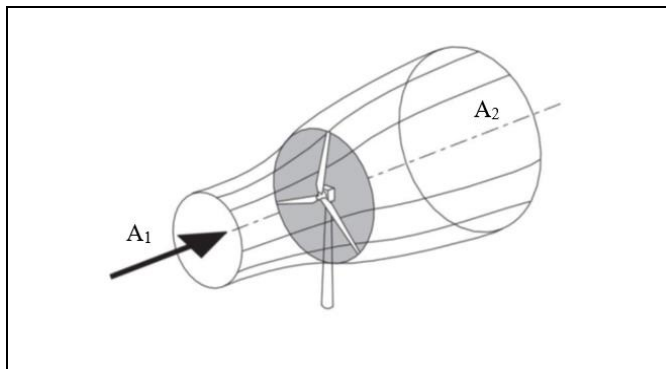


Figure 26: Théorie du disque à trois dimensions [49]

Au point A1 :

$$\frac{P_{atm}}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (\text{Équation IV.1}) [49]$$

Au point A2 :

$$\frac{P_{atm}}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (\text{Équation IV.2}) [49]$$

La soustraction des équations IV1 et IV.2 donne :

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{Équation IV.3}) [49]$$

La force exercée par le vent sur le capteur est :

$$F = (P_1 - P_2)S = \frac{\rho}{2}S(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{Équation IV.4}) [49]$$

Cette force peut aussi être écrite en utilisant l'équation de conservation de la quantité de mouvement (équation de Newton) :

$$F = \rho SV(V_1 - V_2) \quad (\text{Équation IV.5}) [49]$$

L'égalité des équations IV.4 et IV.5 donne :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{Équation IV.6}) [49]$$

La puissance développée est donc :

$$P = FV = \frac{\rho}{2}S(V_1^2 - V_2^2) \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{Équation IV.6}) [49]$$

Le maximum de puissance récupéré par le rotor est obtenu dans les conditions suivantes :

$$\frac{\partial P}{\partial V_1} = 0 \text{ et } \frac{\partial P}{\partial V_2} = 0 \quad [49]$$

La solution est obtenue pour :

$$V_2 = \frac{1}{3}V_1 \quad (\text{Équation IV.7}) [49]$$

Le vent est caractérisé par sa puissance exprimée comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho SV^3 \quad (\text{Équation IV.8}) [49]$$

où ρ est la densité de l'air, S la surface du disque et V la vitesse du vent.

En remplaçant V_1 par son expression dans l'équation IV.6, on obtient :

$$P_{max} = \frac{\rho}{2} S (V_1^2 - \left(\frac{1}{3} V_1\right)^2) \left(\frac{V_1}{2} + \frac{V_1}{6}\right) \quad (\text{Équation IV.9}) [49]$$

Ce qui nous donne finalement la puissance maximale :

$$P_{max} = \frac{16 \rho}{27} S V_1^3 \quad (\text{Équation IV.10}) [49]$$

Cette limite (environ 0.59) est appelée "limite de Betz". Ceci signifie que le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à 16/27, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Il importe de dire qu'en pratique, le rendement dépasse rarement 0.45 soit 45% pour les éoliennes les plus performantes.

En prenant en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par :

$$P_{récupérable} = 0.37 V^3 \quad (\text{Équation IV.11}) [49]$$

Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

$$P_{récupérable} = 0.37 \frac{\pi}{4} D^2 V^3 \quad (\text{Équation IV.12}) [49]$$

$$P_{récupérable} = 0.29 D^2 V^3 \quad (\text{Équation IV.13}) [49]$$

Comme nous pouvons le constater, la puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle au carré des dimensions du rotor et au cube de la vitesse du vent.

Le choix du nombre de pales de l'éolienne est déterminé à partir de plusieurs facteurs, dont : La simplicité qui diminue avec l'augmentation du nombre de pales. La symétrie et l'équilibre du rotor, qui augmente avec l'augmentation du nombre de pales. L'effet d'ombre du vent : c'est l'effet du passage d'une pale devant la tour. Chaque passage réduit l'efficacité de la conversion d'énergie. Cet effet augmente avec le nombre de pales.

Nous prenons l'exemple de la figure ci-après illustrant l'effet sur le couple électromoteur pour une éolienne à trois pales:

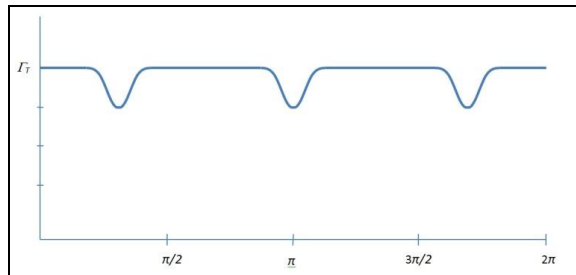


Figure 27: Effet d'ombrage de la tour sur le couple aérodynamique [53]

En définitive, la puissance d'une éolienne varie suivant sa vitesse de rotation et décrit la courbe de la figure suivante [51]:

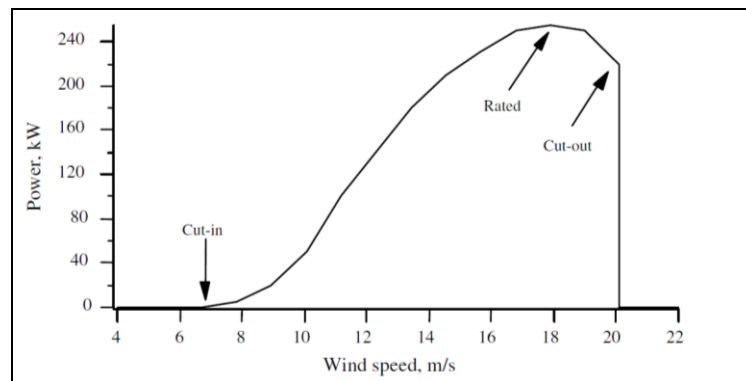


Figure 28: Courbe de puissance d'une éolienne en fonction de sa vitesse [51]

La puissance d'une éolienne dépend aussi bien de ses vitesses caractéristiques (V_d : vitesse de démarrage, V_n : vitesse nominale, V_c : vitesse de coupure) que du lieu de son implantation. En effet, la vitesse du vent dépend de la hauteur à laquelle elle est prise par rapport au sol, et par conséquent sa puissance.

Une éolienne est caractérisée par trois types de vitesses :

- Vitesse de démarrage (V_d =Cut-in) : seules les vitesses du vent supérieures à cette vitesse sont exploitables.

- Vitesse de coupure ($V_c=Cut-out$) : lorsque cette vitesse est atteinte, le système est stoppé pour éviter d'endommager l'éolienne.
- Vitesse nominale ($V_n=Rated$) : elle est comprise entre les deux premières limites. Lorsque la vitesse nominale est atteinte, l'augmentation de la vitesse de vent n'a aucun effet sur le régime de la pale.

La puissance développée par une éolienne est donnée par :

$$P_u = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_d \\ \frac{1}{2}\rho V^3 & \text{pour } V_d \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2}\rho V_n^3 & \text{pour } V_n \leq V \leq V_c \\ 0 & \text{pour } V > V_c \end{cases} \quad (\text{Équation IV.14}) [49]$$

La puissance éolienne moyenne réellement utile s'écrit :

$$P_{utile} = \eta P_u \quad [49]$$

Où η représente le rendement de la machine.

Ce dernier représente le rapport entre la puissance nominale donnée par le constructeur et la puissance électrique théorique calculée pour une vitesse du vent constante égale à la vitesse nominale. Soit :

$$\eta = \frac{P_n}{P_{théorique}} \quad (\text{Équation IV.15}) [49]$$

Avec :

$$P_{théorique} = \frac{1}{2}\rho S V_n^3 \quad (\text{Équation IV.16}) [49]$$

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont utilisés au maximum de leurs performances si leur choix est effectué, correctement, en fonction des paramètres du site d'implantation.

4.3. LES CONSTITUANTS DE BASE D'UNE INSTALLATION À ÉNERGIE RENOUVELABLE, ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

Pour produire de l'énergie grâce à l'énergie solaire et l'énergie éolienne, il faut ajouter d'autres éléments pour composer une installation à énergie renouvelable autonome et non reliée au réseau électrique. Les principaux éléments nécessaires à ajouter sont :

4.3.1. Un onduleur

L'onduleur a pour but de convertir le courant continu (DC) donné par le générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur en courant alternatif (AC). Cet outil est nécessaire dans le cas où nous avons des appareils qui travaillent en alternatif. Donc avant de faire le dimensionnement il faut distinguer les puissances AC et DC. Du côté DC il faut faire la somme des puissances maximales de chaque équipement [54].

4.3.2. Des batteries

La batterie est un élément essentiel dans les installations à ER autonomes, qui permet de stocker l'énergie solaire et éolienne. Différents types de piles peuvent être utilisées, les batteries au plomb, les batteries au lithium-ion, les batteries au lithium-polymère, etc. Les batteries au plomb sont les plus utilisées grâce à leurs faibles coûts.

Ceci est particulièrement important, car la durée de vie typique d'une batterie est inférieure à 10 ans et cela constitue une forte proportion des coûts d'une installation autonome [55].

Les batteries utilisées dans les stations d'ER sont caractérisées par les paramètres suivants [56]:

➤ La tension nominale :

La tension nominale de la batterie est la tension de fonctionnement d'une batterie. Les batteries destinées aux applications d'énergie renouvelable sont habituellement classées à 12 V, 24 V ou 48 V.

➤ Capacité de la batterie

La capacité se réfère à la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah). La capacité d'énergie d'une batterie est directement proportionnelle à la quantité de matériau d'électrode dans la batterie et elle est donnée en multipliant la tension nominale de la batterie mesurée en volts par la capacité de la batterie mesurée en ampères-heures :

$$E_{batt} = C_{batt} V \quad (\text{Équation IV.17}) [56]$$

où :

E_{batt} : Capacité d'énergie ;

C_{batt} : Capacité mesurée (Ah) ;

V : Tension nominale mesurée (V).

➤ Charge

Un autre paramètre important de batterie est l'état de charge, qui est défini comme le pourcentage de la capacité de la batterie disponible pour la décharge. Le générateur solaire recharge la batterie qui lui est couplé en débitant un courant de charge dans la batterie.

➤ Décharge

La profondeur de décharge DoD est un paramètre important défini comme le pourcentage de la capacité de la batterie qui a été déchargée. C'est ce que fait le récepteur qui lui est couplé en absorbant un courant de décharge issu de la batterie.

➤ Le cycle de durée de vie

Le cycle de durée de vie est défini comme le nombre de cycles de charge et de décharge, après lequel la capacité de la batterie est inférieure à la valeur nominale. Généralement, cette durée de vie est spécifiée par le fabricant de la batterie comme un nombre absolu. Mais au fait ce nombre dépend des paramètres cités précédemment en plus de la température. Les graphiques de la figure 29 ci-dessous indiquent respectivement de gauche à droite (a) le cycle de durée de vie d'une batterie d'acide Pb en fonction du DoD pour différentes températures et (b) l'effet de la température sur la capacité de la batterie.

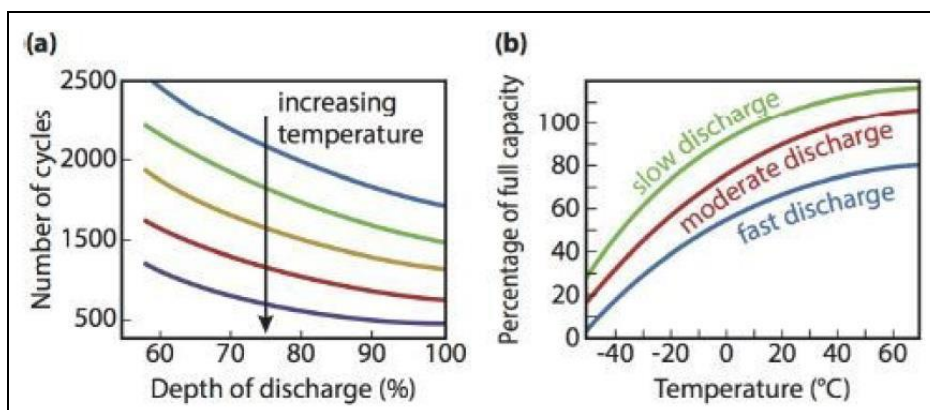


Figure 29 : Cycle de durée de vie des batteries [55]

D'après la Figure 29 (a), les températures de fonctionnement plus froides signifient des durées de vie plus longues. En outre, le cycle de durée de vie dépend fortement de la profondeur de décharge (DoD). Plus le DoD est petit, plus le cycle de durée de vie est élevé.

CHAPITRE 5

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU SYSTÈME DE FILTRATION

5.1. INSTALLATION

L'unité de dessalement par osmose inverse se compose de trois grandes parties: le prétraitement : filtration à cartouche à deux étages ; l'unité de dessalement par osmose inverse : la membrane et son module et le post-traitement : neutralisation.

Le modèle de membrane d'osmose inverse utilisé est le modèle FILMTEC XLE-4040 est illustré dans l'**annexe II**. Les membranes de ce type nécessitent normalement un remplacement ou un nettoyage chimique à tous les 3 à 5 ans. Le taux de chlore et différentes particules peuvent altérer et augmenter la fréquence de remplacement. Il faut donc que les filtres de sédiments et aux charbons soient remplacés aux fréquences recommandées selon le type d'eau traitée. Finalement, la quantité d'eau traitée jouera un grand rôle dans la rapidité du colmatage de celles-ci.

5.2. BANC D'ESSAI

Pour des fins de modélisation et à l'échelle du laboratoire de l'Université (UQAR), le système d'osmose inverse que nous avons réalisé en partenariat avec l'entreprise Puribec dans le cadre du projet CRSNG est une technologie éprouvée qui repose sur le banc d'essai suivant (photos (a) et (b) figure 30).

La figure 30 représente à gauche (a) : une vue de derrière du système de drive, des transmetteurs de conductivité et du réservoir de stockage d'eau à 35 gallons et à droite(b) :

une vue de devant de l'assemblage de la membrane d'OI de Filmtec XLE-4040, des capteurs de débit et de pression, de la pompe à haute pression et du moteur.

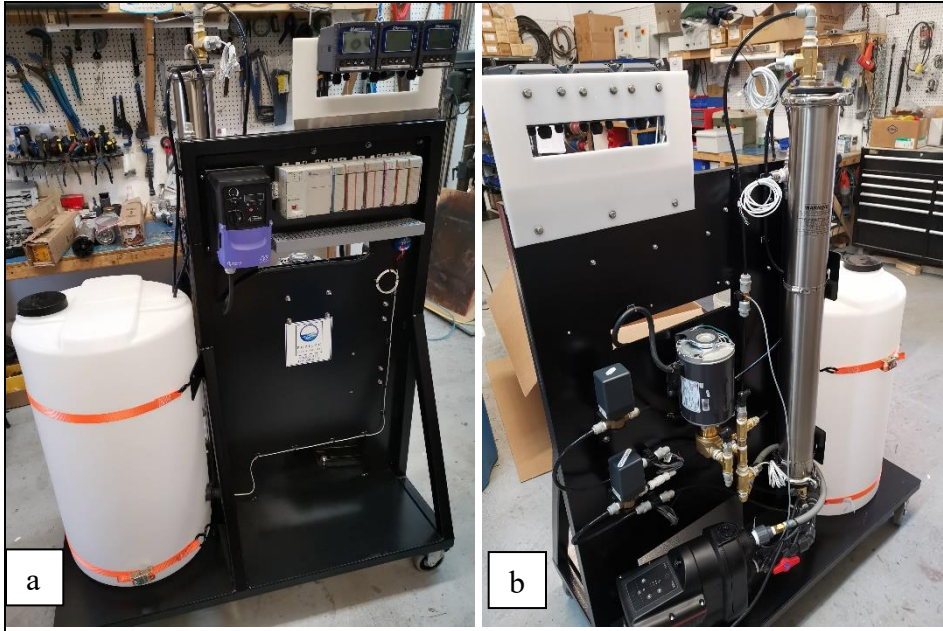


Figure 30 : Schéma du banc d'essai. Source : Puribec

Ce banc d'essai comporte un système moteur-pompe que nous pouvons voir sur la figure 30 (b). La pompe, une fois mise en marche, envoie l'eau à une pression qui doit être environ trois fois supérieure à la pression osmotique de l'eau traitée. La pression produite permet de pousser l'eau à travers la membrane d'osmose inverse, la colonne verticale en acier inoxydable représentée dans la figure 30 (b) aussi ; un réservoir à la sortie de l'unité permet de stocker l'eau dessalée, que nous pouvons voir clairement sur la figure 30 (a) à gauche. Ce système comprend un seul réservoir, car l'eau qui sera produite sera uniquement évaluée par un transmetteur de conductivité et retournée au réservoir de départ. Notre objectif est de comprendre les phénomènes qui caractérisent le processus de dessalement de l'eau par la technique de l'osmose inversée et aussi d'établir un modèle scientifique simplifié pour évaluer la capacité d'énergie renouvelable à alimenter un système de filtration par osmose inverse donné.

CHAPITRE 6

CONDITIONS D'UTILISATION ENVISAGÉES

6.1. DONNÉES POUR L'EXEMPLE DE CALCUL

Comme l'étude est menée sur un banc d'essai pilote à échelle laboratoire, et puisque le présent travail n'inclut pas de contrôle ou d'objectif quantitatif, nous allons limiter le fonctionnement du système à une durée de 6 heures par jour, qui correspond à la durée d'ensoleillement utile d'une journée moyenne en Afrique du Nord. La pompe à haute pression (HPP) sera alimentée à sa tension nominale sans plus de contrôle.

L'étude pratique de ce banc d'essai reposera sur les données climatiques réelles de la région d'El Haouaria en Tunisie. Pour rappel, l'eau souterraine exploitée a les caractéristiques suivantes présentées dans le tableau 6 [57] :

Tableau 6 : Caractéristiques chimiques de l'eau salée utilisées dans cette étude
Caractéristiques **Eau saumâtre de la région de Haouaria**

Température (°C)	$50\text{ °C} < T < 70\text{ °C}$
-------------------------	-----------------------------------

Dureté (mmol)	$\geq 10\text{ mmol}$
----------------------	-----------------------

Salinité (g/l)	$\geq 1.5\text{g/l}$
-----------------------	----------------------

A noter que, selon le conseil mondial de l'eau, une eau est considérée potable, ou bonne pour la consommation humaine, si son taux de salinité ne dépasse pas 0.5 g/L [58].

L'objectif de la partie qui suit consiste à établir un modèle représentant un système d'osmose inverse (Membrane +Moteur +pompe) schématisé dans la figure 31 ci-dessous.

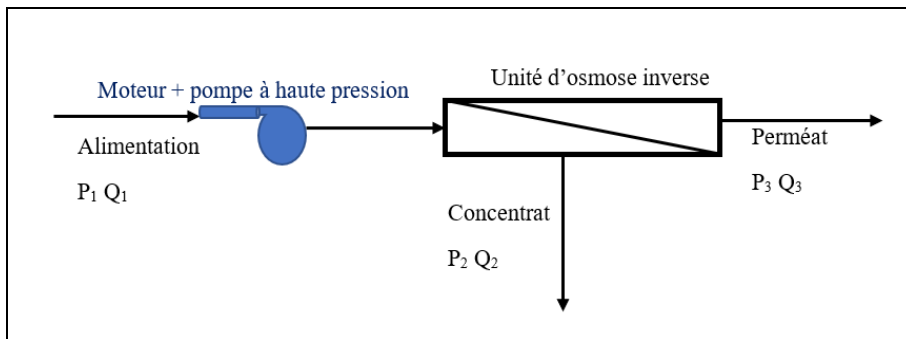


Figure 31: Schéma synoptique du système moteur + pompe + membrane d'OI

Nous allons utiliser le logiciel MATLAB/SIMULINK pour la modélisation et l'étude du comportement du système à l'étude en tenant compte des limites suivantes :

- En l'absence de réservoir à remplir en sortie, nous pouvons considérer $\Delta P = P$, P étant la pression à la sortie de la pompe.
- La solution salée considérée est composée d'eau et de NaCl comme sels dissous totaux, le sel le plus abondant dans les eaux faiblement saumâtres. Selon une étude réalisée en décembre 2016 par l'organisation de recherche scientifique « International Water Management Institut » et l'Agence des États-Unis pour le développement international « USAID » dans la région d'El Haouaria, le pourcentage de NaCl dans les eaux est supérieur à 90% [14].
- Selon cette même étude, la salinité moyenne au niveau des puits de surface observés est de 2 ± 1.03 g/l [14]. Nous avons choisi une membrane qui retient cette marge de concentration et nous avons fixé la concentration en sels dissous totaux initiale à 1500 mg/l.
- Les procédés de prétraitement et de post-traitement ne sont pas étudiés dans notre banc d'essai et ne sont pas considérés dans l'estimation des coûts.

6.2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA POMPE

Dans cette partie du chapitre 6 nous allons calculé les paramètres de l'équation de transfert qui servira à caractériser la pompe dont les détails figurent au chapitre 7 de la page 77 à la page 81.

À partir du document technique d'une pompe à haute pression de référence, nous avons les valeurs de la pression statique maximale P_{\max} et du débit maximal Q_{\max} (voir **annexe III**). Le détail des conversions se trouve dans l'**annexe I**.

$$P_{\max} = 290 \text{ psi} = 1.99 \cdot 10^6 \text{ Pa ou N/m}^2$$

$$Q_{\max} = 260 \text{ l/h} = 4.33 \text{ l/min}$$

La section transversale du réservoir est $A \text{ (m}^2\text{)}$; pour la calculer il suffit de déterminer le diamètre du réservoir utilisé en pouces à partir du tableau ci-dessous et de le multiplier par 2,54.

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} = \pi * \frac{(22 \text{ po} * 2.54 * 10^{-2})^2}{4} = 0.877 \text{ m}^2$$

Tableau 7 : Dimensions du réservoir à 35 gallons

FICHE TECHNIQUE	35 GALLONS
Matériel utilisé	polyéthylène alimentaire pour emballage à chaud
Épaisseur des parois	moyenne de 5/16 pouce
Hauteur	30 po
Diamètre	22 po
Poids	35 lb
Capacité	35 gall Imp (42 gall US)
2 choix d'ouverture de 2 po	
- 1 centrale sur le dessus	✓
- 2 centrales : 1 sur le dessus + 1 sur le côté	✓

Ainsi nous avons tous les paramètres de calcul pour déterminer l'équation de transfert qui caractérise la pompe : $A= 0.877 \text{ m}^2$, $g= 9.807 \text{ m/s}^2$, $\rho= 1000 \text{ kg/m}^3$, $Q_{\max}= 4.33 \text{ l/min}$ et $P_{\max}= 1.99 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.

De ce fait nous calculons K_p et τ comme suit :

$$K_p = \frac{P_{\max}}{Q_{\max} \rho g} = \frac{1.99 \cdot 10^6}{4.33 \cdot 9.807 \cdot 10^3} = 46.86 \text{ et } \tau = \frac{AP_{\max}}{Q_{\max} \rho g} = \frac{0.877 \cdot 1.99 \cdot 10^6}{4.33 \cdot 9.807 \cdot 10^3} = 41.09$$

Pour déterminer le débit qui sera appliqué à l'entrée de la pompe il faut multiplier la vitesse angulaire par la cylindrée du moteur de la pompe :

$$Q_i = C * \omega(t) \quad (\text{Équation VI.16})$$

où:

$\omega(t)$: le nombre de tours du moteur asynchrone par min fourni dans le document technique

(voir **annexe III**) $\omega_{\max}(t)=1725 \text{ tr/min}$ et C : la cylindrée du moteur. $C=Q_{\max}/\omega_{\max}(t)=0.0025 \text{ l/tr}$.

6.3. EXTRACTION DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

Pour obtenir les résultats du modèle énergétique, nous avons besoin de sortir les données météorologiques à partir du logiciel de gestion de l'énergie propre que nous pouvons nous le procurer de l'UQAR **RETScreen**.

RETScreen est un outil de conception et de simulation des microsystèmes lié à l'énergie propre, élaboré par le gouvernement du Canada, permettant d'analyser la faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération, ainsi que d'analyser en permanence le rendement énergétique. Les données climatiques obtenues à partir du satellite de la NASA et enregistrées sur le logiciel RETScreen pour le site d'El Haouaria sont représentées dans la figure 32 suivante :

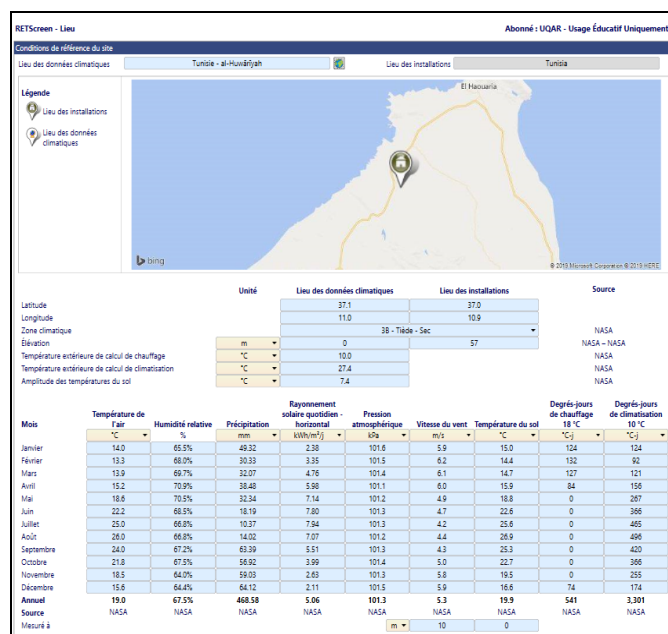


Figure 32: Données climatiques de la région d'El Haouaria

À partir de ces données climatiques nous avons établi la courbe de variation de la vitesse du vent par mois du site d'El Haouaria ci-dessus qui indique des vents moyens allant de 4.2m/s à 6.2m/s. Ceci correspond à une moyenne annuelle de 5.3 m/s. La figure 33 en retrace les données générées.

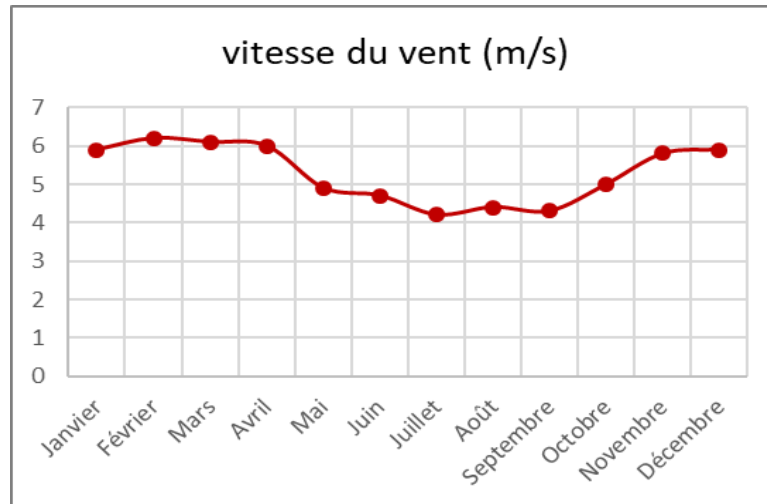


Figure 33 : Courbe de variation de la vitesse moyenne du vent

D'un autre côté, le site web Windfinder, un site web spécialisé dans les prévisions météorologiques, indique pour cette région des vents plus forts assez présents tout au long de l'année. Cette région du globe est aussi connue pour ses vents chargés d'embruns salés, des rafales très violentes et soudaines, ils peuvent atteindre un maximum de 20 m/s et peuvent être dangereuses pour la navigation.

La figure 34 ci-dessous présente les prévisions de vent de Windfinder pour le mois de novembre 2019, de vagues et météo pour El Houaria en Nābul, Tunisie. Les prévisions se fondent sur le modèle GFS et la résolution horizontale est d'environ 13 km. Les prévisions sont calculées 4 fois par jour, à environ 06:00, 12:00, 18:00 et 00:00 heure normale d'Europe centrale. Les prévisions sont disponibles en pas de temps de 3 heures jusqu'à 10 jours après. Les flèches pointent dans la direction dans laquelle le vent souffle. Les unités de mesure qui sont utilisées par défaut sont le nœud et le degré Celsius.

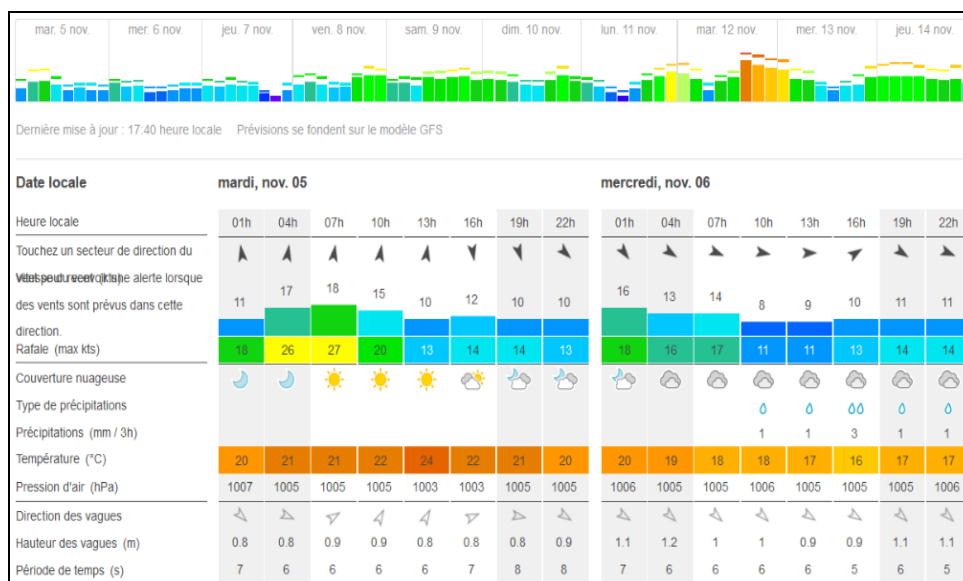


Figure 34 : Vitesses du vent (en nœuds), Windfinder au site d'El Haouaria

La figure 35 ci-après montre la variation de la température dans la région de Haouaria sur une année.

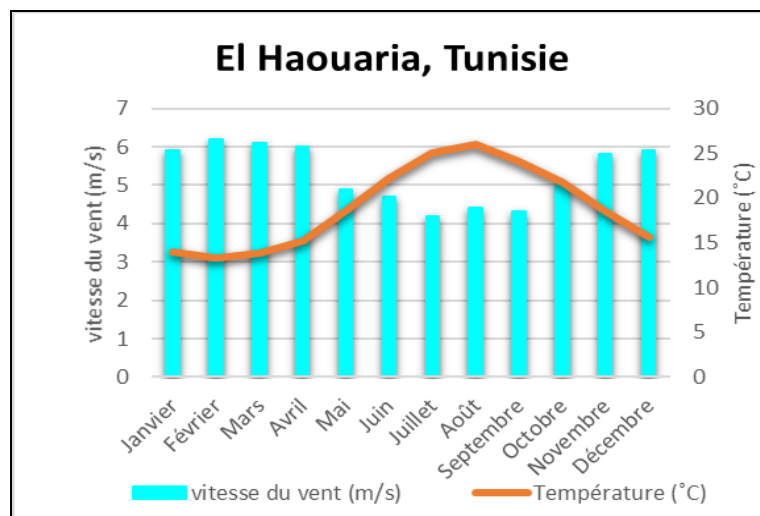


Figure 35 : Variation de la température à El Haouaria sur une année

Sachant qu'en été le nombre d'heures d'ensoleillement est 12h, le rayonnement solaire réellement capté est égal à 8h. Ainsi l'énergie que le panneau photovoltaïque peut collecter se situe dans cet intervalle de 8h et par conséquent l'énergie que la pompe peut

consommer se retrouve encore plus restreinte. D'autre part, le courant de démarrage peut être 7 fois supérieur au courant nominal. Ainsi, il nous faut une source d'énergie qui est toujours égale à cette valeur, d'où l'intérêt d'aller la capter dans cet intervalle.

Dans le dimensionnement, nous aurons besoin de plusieurs paramètres parmi lesquels l'irradiation solaire et l'inclinaison. L'irradiation prise dans le dimensionnement est celle du mois le moins favorable, en l'occurrence décembre. L'inclinaison optimale des panneaux est obtenue en fonction des coordonnées géographiques du site ; dans le cas de El Haouaria, l'angle d'inclinaison des panneaux solaires est de 37° .

CHAPITRE 7

ÉLABORATION DU MODÈLE DU SYSTÈME DE FILTRATION

7.1. ÉLABORATION DU MODÈLE DE LA MEMBRANE D'OSMOSE INVERSE

Une membrane est une barrière sélective qui selon le diamètre de ses pores, permet de séparer les constituants d'un mélange en fonction de leur taille. Le transfert entre les deux milieux séparés par la membrane est induit par une variation de pression [26]. Comme le montre plus haut la figure 31 qui représente un schéma illustrant le passage de l'eau de part et d'autre de la membrane et qui nous sera utile pour la définition des paramètres de la modélisation, l'eau brute arrive en surface de la membrane. L'eau et les éléments de faible poids moléculaire traversant la membrane avec un débit proportionnel à la pression appliquée, l'ensemble est appelé perméat ou filtrat. En sortie de membrane, on obtient une solution concentrée en composés de haut poids moléculaire appelée rétentat ou concentrât.

Dans la suite du développement de ce mémoire nous attribuons le chiffre 1 pour désigner l'eau d'alimentation, le chiffre 2 pour désigner le concentrât et le chiffre 3 pour désigner l'eau fraîche ou perméat.

Comme discuté plus haut dans le chapitre 3 « L'osmose inverse », nous nous basons sur le modèle de solution-diffusion pour modéliser notre membrane d'osmose inverse (voir équations III.6.2 et III.6.3.).

Hyun-J.O. et al., Greenlee L.F. et al. et Rohlf's W. et al. [29, 31, 32] ont déjà utilisé ce modèle dans leurs travaux de recherche pour décrire le transport de matière à travers la membrane dense d'osmose inverse.

Le flux de solvant à travers la membrane d'osmose inverse s'écrit alors :

$$J_w = \left[\left(\frac{D_{wm} C_{wm} V_m}{RT\delta} \right) * (\Delta P - \Delta\pi) \right] \quad (\text{Équation VII.1})$$

$$J_w = A_w * (\Delta P - \Delta\pi) \quad (\text{Équation VII.2})$$

où :

J_w = flux du solvant (l'eau dans notre cas) à travers la membrane (kg/s.m^2).

D_{wm} = diffusion de l'eau dans la membrane (m^2/s)

C_{wm} = concentration de l'eau dans la membrane (kg de solvant/m^3)

V_m = volume molaire du solvant (m^3)

A_w = perméabilité de l'eau (constante)

$\Delta P = P_1 - P_3$ est la différence de pression hydrostatique avec P_1 exercée sur l'alimentation et P_3 sur la solution de produit (Pa)

$\Delta\Pi$: Pour la pression osmotique (Pa)

Voici ci-après un diagramme schématique (figure 36) du transport de solvant et de soluté dans le processus d'osmose inverse où C_1 et C_3 sont respectivement la concentration de soluté du côté de l'alimentation et du côté du perméat.

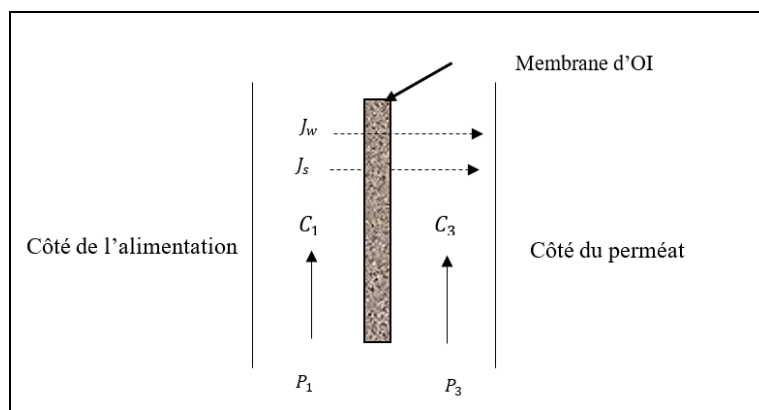


Figure 36 : Diagramme du transport du solvant et du soluté

Selon le modèle de solution-diffusion, le flux du soluté (le sel) à travers la membrane peut être approché comme :

$$J_s = \left[\left(\frac{D_{sm} K_s}{\delta} \right) * (C_1 - C_3) \right] \quad (\text{Équation VII.3})$$

Puisque le flux est défini comme le débit par la surface de la membrane, on peut approximer le flux total de perméat à :

$$J_s = A_s * (C_1 - C_3) \quad (\text{Équation VII.4})$$

où:

D_{sm} = diffusion du soluté dans la membrane (m^2/s), qui est inversement proportionnelle à la pression

K_s = coefficient de distribution (sans unité)

J_s = flux du soluté ($kg/s.m^2$)

A_s = constante de perméabilité du soluté (m/s)

$$A_s = \frac{D_{sm} K_s}{\delta} \quad (\text{Équation VII.5})$$

En régime stable, le soluté diffusant à travers la membrane doit être égal à la quantité de soluté quittant la solution de perméat. Ainsi, le principe de conservation de la masse nous permet d'écrire [30, 38]:

$$J_s = (J_w C_3) / C_{w3} \quad (\text{Équation VII.6})$$

où:

C_{w3} est la concentration du solvant dans le perméat (kg de solvant/ m^3). Dans notre cas, vu les faibles concentrations de sel à traiter, nous considérons C_{w3} comme étant la concentration de l'eau en sortie, qui est égale à ρ . Nous avons donc :

$$J_s = \frac{J_w \cdot C_3}{\rho} = \frac{A_w \cdot (\Delta P - \Delta \pi)}{\rho} \cdot C_3 \quad (\text{Équation VII.7})$$

Comme $J_s = A_s \cdot (C_1 - C_3)$, alors on peut écrire l'équation pour la concentration de l'eau en sortie C_3 :

$$C_3 = \frac{C_1}{1 + \frac{A_w \cdot (\Delta P - \Delta \pi)}{\rho \cdot A_s}} \quad (\text{Équation VII.8})$$

Pour la modélisation sur Simulink, les valeurs suivantes ont été considérées :

Valeur de ΔP : Pour des fins de simplification nous allons négliger la chute de pression de part et d'autre de la membrane et la pression du perméat, et la différence de pression ΔP sera approximée à la pression de sortie de la pompe à haute pression : $\Delta P = P_1$.

Valeurs de A_w et A_s : Les constantes de perméabilité de la membrane sont déterminées expérimentalement pour un type particulier de membrane. Pour les membranes en polyamide à couche mince, telle que la membrane Filmtec XLE-4040 (voir **annexe II**), les constantes de perméabilité à l'eau (A_w) et au soluté (A_s) sont égales respectivement à : $5 \cdot 10^{-4}$ kg de solvant / s.m².atm et $5.5 \cdot 10^{-7}$ m / s [28].

Valeur de $\Delta \Pi$: Pour la pression osmotique, différentes formules sont disponibles dans la littérature. Une approximation courte valide et pratique extraite du manuel technique de DOW Filmtec [27] est:

$$\Delta \pi = \frac{C_{fc}(T+320)}{491000} \quad \text{pour } C_{fc} < 20000 \text{ mg/l}$$

et

$$\Delta \pi = \frac{0.0117 \cdot C_{fc}^{-44}}{14.23} \cdot \frac{T+320}{345} \quad \text{pour } C_{fc} > 20000 \text{ mg/l}$$

où:

C_{fc} = concentration de l'eau à l'entrée - concentrât

L'eau à l'entrée est chargée de 1500 ppm de sels dissous totaux, ainsi la première approximation peut être appliquée :

$$\Delta\pi = \frac{C_{fc}(T+320)}{491000} \quad (\text{Équation VII.9}) [27]$$

C_{fc} peut être calculée à partir de l'approximation suivante [27]:

$$C_{fc} = C_1 \frac{\ln \frac{1}{1-Y}}{Y} \quad (\text{Équation VII.10})$$

où :

Y = taux de récupération = Débit du perméat (Q_3) / Débit d'alimentation (Q_1)

C_1 = Concentration des TDS en alimentation en mg / l ou ppm

À partir du document technique de la membrane Filmtec XLE 4040 (voir **annexe II**), nous extrayons les débits d'alimentation et du perméat maximaux. Ainsi nous pouvons calculer le taux de conversion.

Le débit de perméat maximal que la membrane peut produire est 9.8 m³/jour qui correspond à 0.408 m³/h, le débit d'alimentation maximal est 3.2 m³/h. Ainsi, nous avons un taux de récupération : $Y = (0.408/3.2) * 100 = 12.75\%$.

- CONSTRUCTION DU MODELE DANS SIMULINK

Le modèle sur Simulink est composé, comme le suggère le travail de modélisation, de deux blocs, un pour la pompe (moteur à courant continu) et l'autre pour l'unité d'osmose inverse.

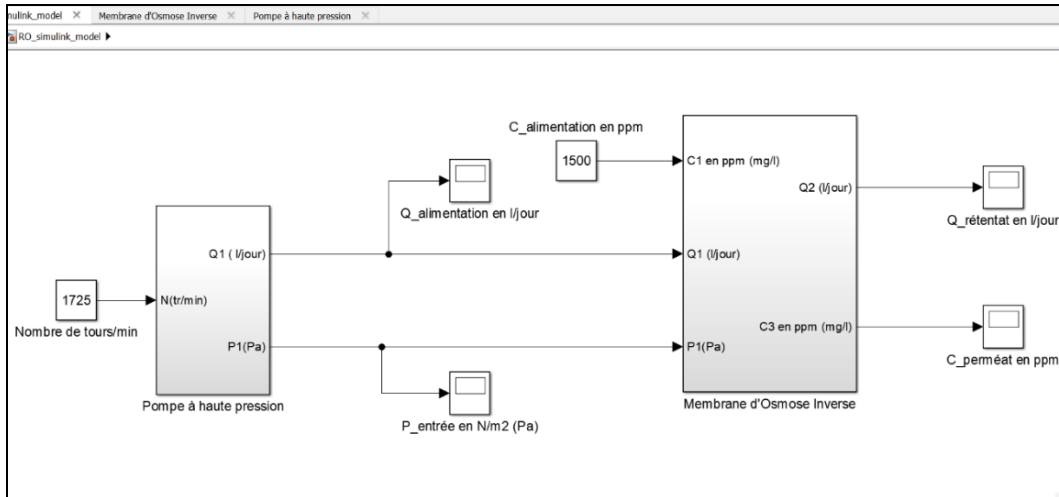


Figure 37: Construction du modèle de simulation du système pompe-membrane

Le modèle de la pompe est excité par une entrée échelon de 240 V au niveau de la tension d'alimentation de l'induit, correspondant à une vitesse de rotation de 1725 rpm.

Les sorties de ce bloc sont :

- Le débit (en litres par jour)
- La pression (en Pa)

Le bloc modélisant l'unité d'osmose inverse en régime permanent est le suivant :

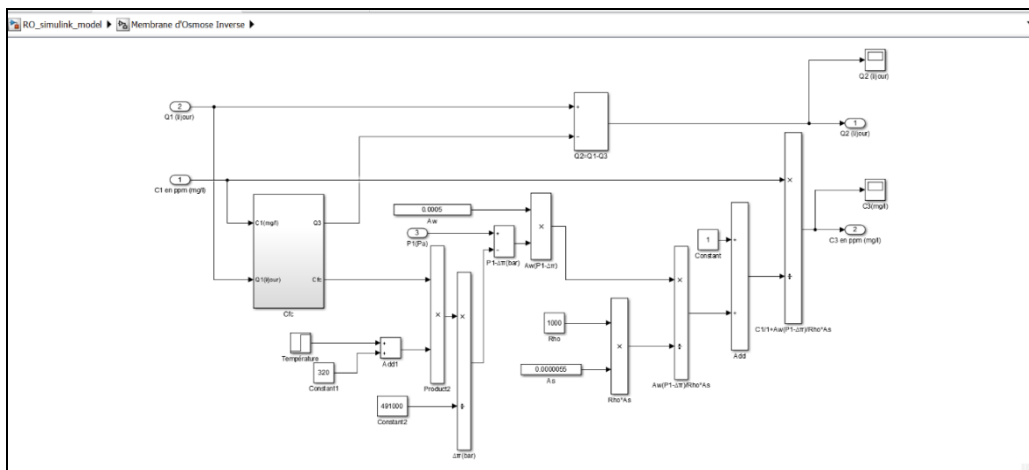


Figure 38 : Construction du modèle de la membrane dans Simulink

Le système reçoit en entrée la concentration en sel dans l'eau à traiter, en ppm. Ce choix d'unité au lieu du g/L vise à offrir une meilleure visibilité au niveau des courbes plus tard.

Le débit du rétentat est calculé à partir de la loi de conservation du débit :

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (\text{Équation VII.41}) [38]$$

Ceci est représentatif de la réalité puisqu'en théorie, le débit d'eau salée étant considéré comme incompressible, les débits d'eau et de sel sont conservés. Même s'il n'intervient pas dans le système d'équations servant à modéliser la membrane d'osmose inverse, le débit du rétentat (saumure) est quand-même représenté comme une sortie du système car il est suivi comme l'un des paramètres principaux du système d'osmose inverse. Et voici la loi de conservation de la masse qui le régit :

$$C_1Q_1 = C_2Q_2 + C_3Q_3 \quad (\text{Équation VII.42}) [38]$$

Ainsi comme stipulé dans les hypothèses de départ, ce bloc a comme sorties le débit du perméat et la concentration du sel dans le perméat.

- ÉTUDE DE L'UNITE D'OSMOSE INVERSE

Le modèle de l'unité d'osmose inverse représentant uniquement le régime permanent, nous remarquons que l'évolution de la concentration du soluté en sortie suit directement celle de la pression à l'entrée.

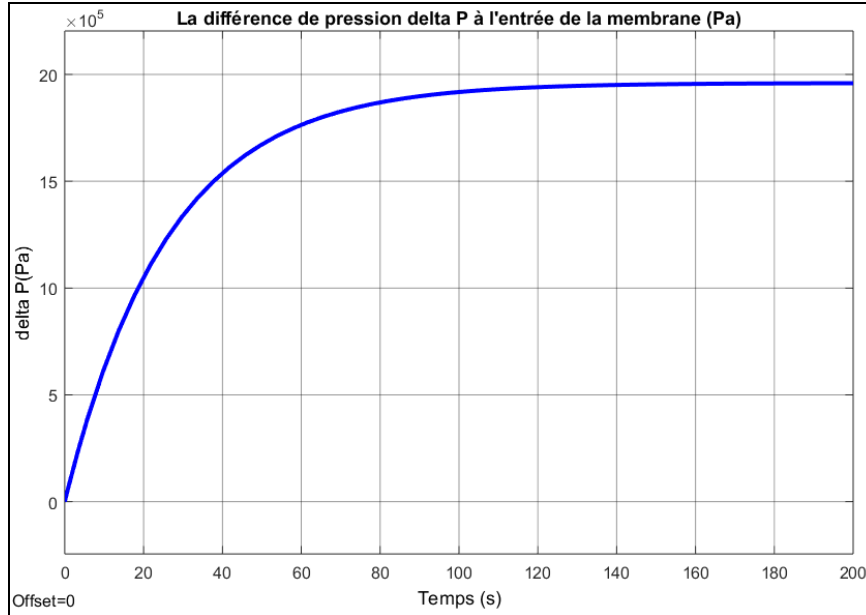


Figure 39 : Évolution de la pression à l'entrée de l'unité d'osmose inverse

La figure 39 illustre la courbe représentant l'évolution de la pression à l'entrée de l'unité d'osmose inverse. Nous remarquons que la pression maximale que la pompe peut fournir est 19.82×10^5 Pa ce qui correspond à 287.5 psi. Cette valeur correspond à la marge de fonctionnement de la pompe à haute pression dont la pression maximale selon la fiche technique est 290 psi.

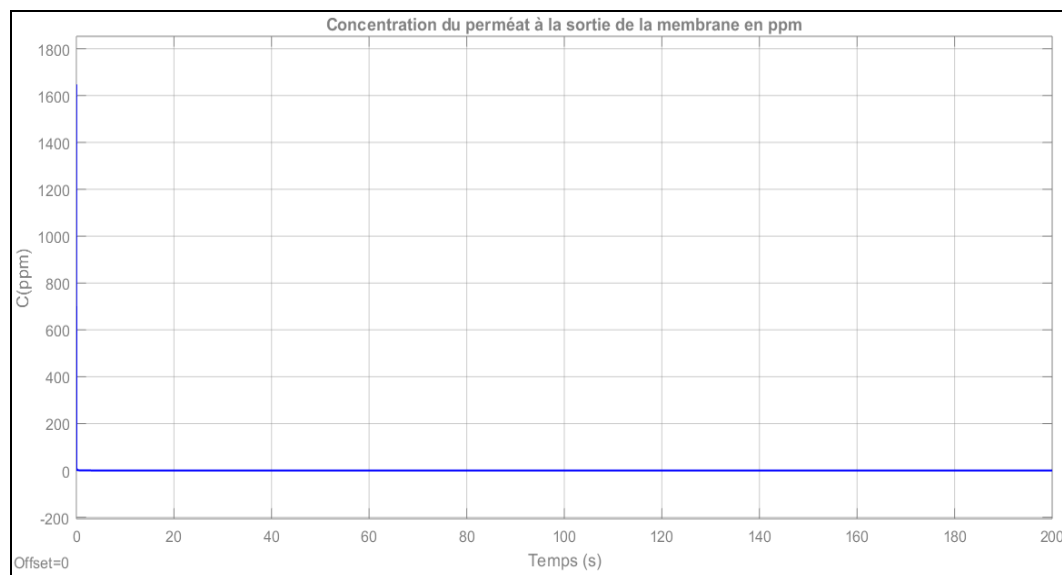


Figure 40 : Évolution de la concentration de sel dissous totaux dans l'eau en sortie

La courbe décrivant la concentration du sel dans l'eau en sortie est représentée dans la figure 40, en effet, nous remarquons que la concentration diminue drastiquement pour se stabiliser à 0 ppm (ou 0 mg/L). Nous remarquons d'abord que cette valeur en régime stable correspond à l'objectif initial qui consistait à atteindre une concentration de 0.5 g/L et nous le dépassons largement. Ceci est dû probablement au fait que nous commençons à partir d'une concentration initiale d'eau saumâtre faible 1.5 g/l. Nous observons également une dynamique dans cette courbe qui n'est pas due au modèle de la membrane d'OI mais à la variation du P_1 . Comme P_1 est en fonction du système de premier ordre $h(t)$, nous avons donc une sortie exprimée en fonction du temps, d'où cette évolution dynamique.

Finalement, la simplification que nous avons entreprise pour établir le modèle du système nous a permis de comprendre le comportement de ce dernier. Ce modèle inclut la pression osmotique, ainsi que l'effet des dimensions de la membrane sur l'évolution des sorties du système. En effet, le degré de filtration repose non seulement sur la puissance de la pompe et la pression qu'elle peut générer, mais également sur la différence entre celle-ci et la pression osmotique qui caractérise le liquide traité, ainsi que son évolution dans le temps. De ce fait, le travail de modélisation, réalisé dans le cadre de ce projet pourra bien

nous être utile pour une étude ultérieure du système de contrôle dans le but d'optimiser son efficacité.

7.2. ÉLABORATION DU MODÈLE DE LA POMPE À HAUTE PRESSION

En raison des pressions et des débits impliqués dans le système à osmose inverse, les pompes centrifuges sont couramment utilisées.

Pour inclure une pompe centrifuge dans un modèle dynamique linéaire, nous déterminons le point de fonctionnement pour la vitesse de pompe particulière en calculant les valeurs de $\overline{\Delta p}$ et \overline{w} . Nous trouvons ensuite la pente de la tangente à la courbe de la pompe au point de fonctionnement et la définissons comme étant -k, qui a comme unité le newton-secondes par mètre. Après avoir fait cela, nous exprimons la différence de pression différentielle $\widehat{\Delta p}$ (N/m²) en fonction du débit incrémental \widehat{w} (m³/s) comme :

$$\widehat{\Delta p} = -k \widehat{w} \quad (\text{Équation VII.11}) [59]$$

où:

$$\widehat{w} = w - \overline{w}$$

$$\widehat{\Delta p} = \Delta p - \overline{\Delta p}$$

La constante -k est toujours positive. En résolvant l'équation VII.11 pour \widehat{w} on aura l'équation VII.12:

$$\widehat{w} = -\frac{1}{k} \widehat{\Delta p} \quad (\text{Équation VII.12}) [59]$$

Afin de développer un modèle linéarisé, nous devons trouver un point de fonctionnement, définir les variables incrémentales et retenir les deux premiers termes dans

une série de Taylor. Nous pouvons écrire l'expansion de la série Taylor pour une pompe à une vitesse constante comme suit :

$$w = \bar{w} + \left. \frac{dw}{d\Delta p} \right|_{\bar{\Delta p}} (\Delta p - \bar{\Delta p}) + \dots \quad (\text{Équation VII.13}) [59]$$

Ainsi le modèle incrémental devient :

$$\widehat{w} = \frac{1}{R} \widehat{\Delta p} \quad (\text{Équation VII.14}) [59]$$

où :

$$\frac{1}{R} = \left. \frac{dw}{d\Delta p} \right|_{\bar{\Delta p}}$$

En suivant les étapes préliminaires, le modèle du système pompe-réservoir d'eau peut s'écrire comme suit :

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{C} (w_i - w_0) \quad (\text{Équation VII.15}) [59]$$

où :

C la capacitance hydraulique (F)

Le débit approximatif à travers la vanne est décrit dans l'équation VII.16:

$$w_0 = \bar{w}_0 + \frac{1}{R} \widehat{\Delta p} \quad (\text{Équation VII.16}) [59]$$

Et le débit approximatif à travers la pompe est décrit dans l'équation VII.17:

$$w_i = \bar{w}_i - \frac{1}{k} \widehat{\Delta p} \quad (\text{Équation VII.17}) [59]$$

En substituant l'équation VII.16 et l'équation VII.17 dans l'équation VII.15 on trouve :

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{C} \left(-\frac{1}{k} - \frac{1}{R} \right) \widehat{\Delta p} \quad (\text{Équation VII.18}) [59]$$

Nous pouvons l'écrire comme l'équation différentielle homogène de premier ordre :

$$\dot{\hat{p}}_1 + \frac{1}{c} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{R} \right) \hat{p}_1 = 0 \quad (\text{Équation VII.19}) [59]$$

L'inspection de l'équation VII.19 indique que l'amplitude de la pente de la courbe de la pompe au point de fonctionnement entre dans l'équation exactement de la même manière que la résistance $R_{\text{éq}}$ selon :

$$R_{\text{éq}} = \frac{Rk}{R+k} \quad (\text{Équation VII.20}) [59]$$

i) Théorème de Bernoulli appliqué à la pompe

Ci-après nous rappelons l'équation de Bernoulli entre deux points d'un circuit hydraulique :

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_p = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \sum_i K_{Li} \frac{V_i^2}{2g} \quad (\text{Équation VII.21}) [59, 60]$$

où :

P_i = Pression au point i (N/m^2)

Z_i = élévation du point i (m)

V_i = Vitesse du fluide au point i (m/s)

H_p = tête de pompe entre les deux points (m)

K_{Li} = Coefficient de perte (restriction) associé à la restriction i (sans unité)

γ = poids spécifique du fluide = $\rho \cdot g = \text{kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2 = \text{N/m}^3$

La vitesse moyenne d'un fluide à un point est :

$$V_{\text{moy}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\text{débit}}{\text{section du tuyau}} = \frac{Q(\text{m}^3/\text{s})}{A(\text{m}^2)} \quad (\text{Équation VII.22}) [60]$$

De ce fait, le débit volumique sortant est donné par la loi de Bernoulli appliquée à la pompe à haute pression. La pression à l'entrée de la pompe est appelée P_1 et la pression à la sortie est appelée P :

$$\frac{P_1}{\gamma} + z + \frac{V_1^2}{2g} + h = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{V_1^2}{2g} + \mathcal{O} \quad (\text{Équation VII.23}) [60]$$

P_1 est à l'air libre donc $P_1=0$, le débit est le même de part et d'autre de la pompe comme la vitesse moyenne est égale au débit divisé par la section donc le terme $\frac{V_1^2}{2g}$ s'annule dans l'équation VII.23, il n'y a pas de différence de niveau alors $z = 0$ et il n'y a pas de restrictions au niveau de la pompe.

Ainsi l'équation simplifiée s'écrira : $\frac{P}{\rho g} = h(t)$ et nous pouvons en déduire la pression de sortie de la pompe P .

$$P = \rho g h(t) \quad (\text{Équation VII.24}) [60]$$

ii) Résistance hydraulique

La résistance hydraulique se produit chaque fois qu'il y a une différence de pression, comme le liquide qui coule d'un tuyau d'un diamètre à un diamètre différent. Si les pressions de chaque côté d'une résistance hydraulique sont P_1 et P_2 , la résistance hydraulique R est définie comme [61, 62]:

$$P_1 - P_2 = R \cdot Q \quad (\text{Équation VII.25}) [61, 62]$$

où :

Q est le débit volumique du fluide.

iii) Capacitance hydraulique

La capacitance hydraulique est une mesure du stockage d'énergie dans un système hydraulique. Si q_1 et q_2 sont l'entrée et la sortie, respectivement, et V est le volume du fluide à l'intérieur du réservoir, nous pouvons écrire [61]:

$$q_1 - q_2 = \frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} \quad (\text{Équation VII.26}) [61]$$

Maintenant la différence de pression est donnée par :

$$P_1 - P_2 = h\rho g = P \text{ où } h = \frac{P}{\rho g} \quad (\text{Équation VII.27}) [61, 62]$$

En substituant l'équation VII.27 dans l'équation VII.26 on trouve : $q_1 - q_2 = C \frac{dP}{dt}$

avec C est la capacitance = $\frac{A}{\rho g}$

On note que cette équation est similaire à l'expression d'un condensateur et elle peut s'écrire :

$$P = \frac{1}{C} \int (q_1 - q_2) dt \quad (\text{Équation VII.28}) [59]$$

Selon l'équation VII.26, on trouve :

$$q_i = A \frac{dh}{dt} + q_o \quad (\text{Équation VII.29})$$

$$q_o = \frac{(P_1 - P_2)}{R} = \frac{\rho g h(t)}{R} \quad (\text{Équation VII.30})$$

On pose $Q_{max} = \text{le débit maximal}$ et $P_{max} = \Delta P \text{ maximale}$ on trouve donc :

$$R = \frac{\Delta P}{q_o} = \frac{P_{max}}{Q_{max}} \quad (\text{Équation VII.31})$$

$$A \dot{h}(t) + \left(\frac{Q_{max} \rho g}{P_{max}} \right) h(t) = q_i(t) \quad (\text{Équation VII.32})$$

Dans le domaine de Laplace on a :

$$sAH(s) + \left(\frac{Q_{max}\rho g}{P_{max}}\right)H(s) = Q_i(s) \quad (\text{Équation VII.33})$$

$$H(s) \left[As + \left(\frac{Q_{max}\rho g}{P_{max}}\right)\right] = Q_i(s) \quad (\text{Équation VII.34})$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{As + \left(\frac{Q_{max}\rho g}{P_{max}}\right)} \quad (\text{Équation VII.35})$$

Ainsi l'équation de transfert qui définit la pompe est la suivante et elle définit un système de 1er ordre :

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{\frac{P_{max}}{Q_{max}\rho g}}{1 + \frac{AP_{max}}{Q_{max}\rho g}s} = \frac{K_p}{1 + \tau s} \quad (\text{Équation VII.36})$$

où:

Le gain $K_p = \frac{P_{max}}{Q_{max}\rho g} = 46.86$ et la constante du temps $\tau = \frac{AP_{max}}{Q_{max}\rho g} = 41.09$ (dont le détail

de calcul se trouve au chapitre 6 dans le paragraphe « caractéristiques de la pompe à haute pression »).

En régime permanent :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(s) = \frac{P_{max}}{\rho g} \quad (\text{Équation VII.37})$$

En appliquant l'inverse de Laplace à H(s) on trouve la réponse temporelle de la hauteur h pour tout $t \geq 0$: $h(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{P_{max}}{Q_{max}\rho g} \left(1 - e^{-\frac{Q_{max}\rho g}{AP_{max}}t}\right)$ déterminée

comme suit :

$$H(s) = \frac{K_p}{1 + \tau s} Q_i(s) \quad (\text{Équation VII.38})$$

$$H(s) = \frac{K_p}{s} + \frac{K_p}{1+\tau s} \quad (\text{Équation VII.39})$$

$$h(t) = K_p - K_p e^{-\frac{t}{\tau}} = K_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (\text{Équation VII.40})$$

7.3. ÉLABORATION DU MODÈLE DU MOTEUR ASYNCHRONE

Les moteurs asynchrones sont constitués d'un stator diphasé ou triphasé (pour les puissances plus élevées) qui crée un champ tournant. La vitesse angulaire du champ tournant est déterminée par la pulsation du courant circulant dans les bobinages du stator, en fonction du nombre de paires de pôles. Le rotor comporte plusieurs bobinages en court-circuit qui ne reçoivent aucun courant de l'extérieur. Ces circuits fermés sont le siège d'une force électromotrice, si le rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ tournant. Il en résulte un courant qui interagit avec le flux qui traverse les bobines et qui engendre un couple. En réalité, le rotor est polyphasé en cage d'écureuil dont les barreaux constituent les spires des bobinages. Dans le cas d'un stator triphasé, il est obtenu de la manière suivante :

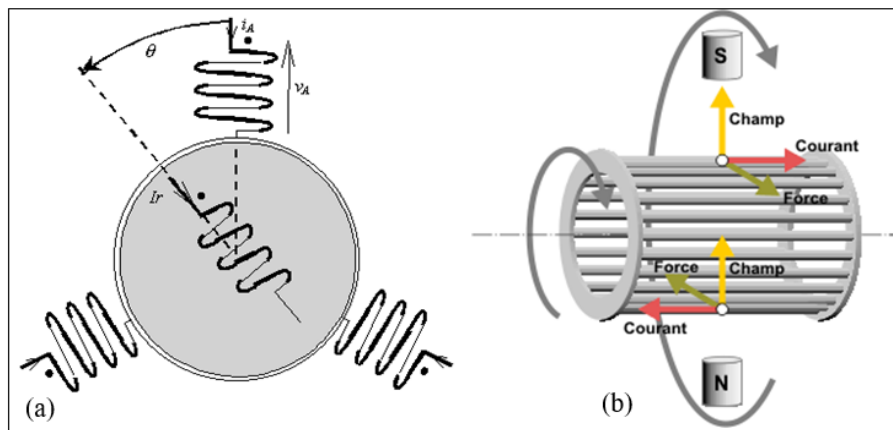


Figure 41 : Moteur asynchrone, (a) Stator triphasé et (b) Rotor polyphasé [63]

Ainsi, comme le montre la figure 41, lorsque le flux inducteur tourne à la même vitesse que le rotor, le circuit élémentaire est traversé par un flux constant qui n'engendre

pas de force électromotrice ; un décalage se crée. On définit le glissement g , comme l'écart relatif entre les vitesses angulaires du champ tournant et du rotor [63].

- CALCUL DE L'ENERGIE ABSORBEE PAR LA POMPE

Lors de notre choix de la pompe, nous aurons besoin de la puissance absorbée par la pompe qui détermine la puissance délivrée par le moteur. Il faut donc prendre garde à ce que le moteur ait une puissance suffisante pour satisfaire toutes les situations de fonctionnement de l'installation.

Nous allons donc commencer par calculer l'énergie absorbée par la pompe qui se traduit par l'énergie mécanique fournie au fluide. En réalité, c'est la puissance hydraulique communiquée au liquide lors de son passage à travers la pompe.

Cette puissance mécanique est donnée par la formule suivante : $P=Q*h*\rho*g$ [59].

Avec: P = Puissance transmise au fluide par la pompe en Watt, Q = débit en m^3/s , $\rho*g = 1000*9.807 = 9807 \text{ kg/m}^2\text{s}^2$ et h = énergie volumique ou perte de charge du réseau hydraulique exprimé en m.

Nous avons ensuite appliqué cette équation à notre système moteur-pompe sur Simulink. Voici les blocs sur la figure 42 ci-après présentant en entrée la vitesse de rotation du moteur en tours/min et en sorties le débit journalier, la puissance hydraulique et la différence de pression à la sortie de la pompe:

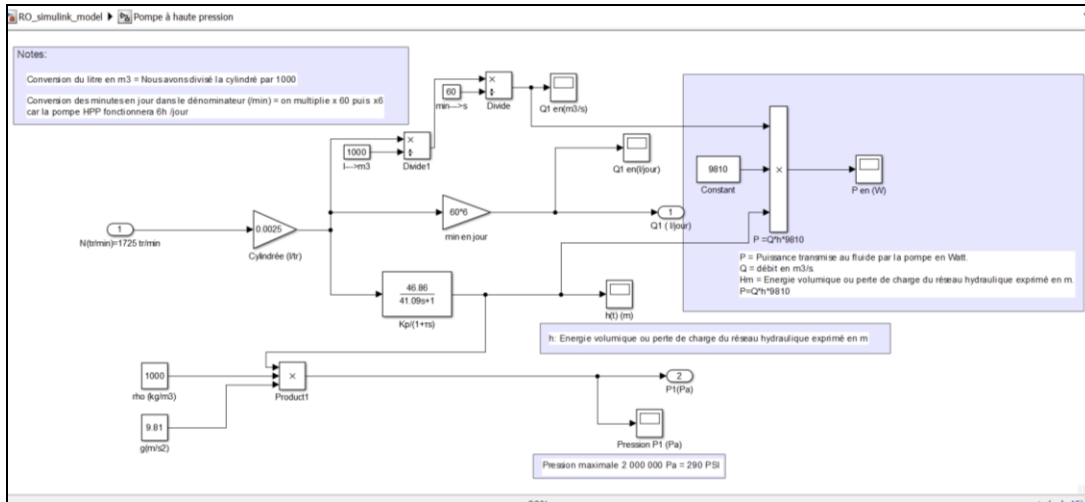


Figure 42 : Simulation sur Simulink de la charge (moteur-pompe)

Une fois la pression hydraulique calculée, nous pouvons déduire l'énergie consommée exprimée par le rendement de la pompe (Puissance à l'arbre de la pompe). C'est la puissance mesurée au niveau de l'arbre de la pompe. Voici le résultat de la simulation concernant la puissance transmise au fluide sur la figure 43 ci-après :

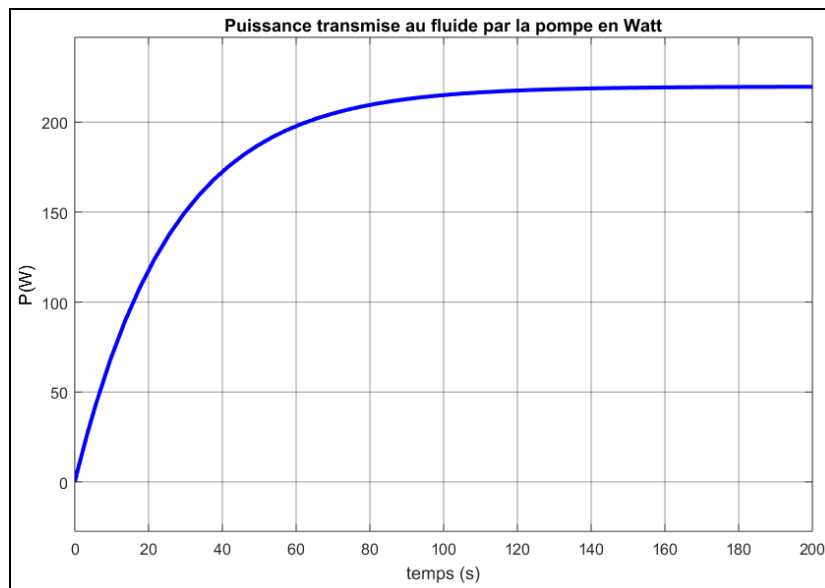


Figure 43: Puissance transmise au fluide par la pompe

Selon le graphe précédent, nous voyons que la puissance transmise au fluide s'établit en régime stable à environ 220 W.

L'énergie mécanique nécessaire à une pompe est toujours supérieure à l'énergie transmise au fluide, à cause des différents frottements des organes de rotation et elle est donnée par la formule suivante : $P_{mec} = P_{fl} / R_v + R_t$.

Avec : P_{mec} = Puissance mécanique nécessaire à la pompe, P_{fl} = Puissance transmise au fluide, R_v = rendement mécanique du ventilateur et R_t = rendement de la transmission.

Les rendements généralement admis sont : Pompes à piston = 0,6 à 0,7 et Pompes centrifuges = 0,4 à 0,8. Ainsi, la pompe est choisie telle que sa puissance soit supérieure ou égale à P_{mec} multiplié par le rendement. Nous pouvons appliquer le rendement de 0,4 car la pompe que nous allons utiliser dans notre cas est une pompe centrifuge (voir **annexe III**). Ainsi, la puissance mécanique nécessaire à la pompe est égale à 550 W.

7.4. MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DE L'UNITÉ D'OSMOSE INVERSE INSTALLÉE

7.4.1. Estimation des besoins en énergie électrique (Wh/j)

Pour faire le dimensionnement de notre installation, nous avons choisi de déterminer tout d'abord le nombre de panneaux photovoltaïques et/ou d'éoliennes nécessaires en suivant les étapes mentionnées ci-dessous.

Comme première étape, nous avons établi un bilan de puissance, en considérant les appareils utilisés avec leurs puissances et leurs durées de fonctionnement. Nous calculons la puissance totale et l'énergie totale quotidienne nécessaire à l'installation. Le Tableau 8 ci-dessous regroupe toutes ces informations.

Comme mentionné plus haut, l'étude étant menée sur un banc d'essai pilote à échelle laboratoire, nous allons limiter le fonctionnement du système à une durée de 6 heures par jour, indépendamment de la quantité d'eau à traiter.

Tableau 8: Estimation des besoins en puissance électrique Watt heure

Appareil	Qté	Tension alimentation	Puissance totale* (W)	Temps d'utilisation /24h (h)	Charge totale (Wh/j)
Électrovanne 1/4	2	12 Vdc	7	6	84
Lampe Ultra-violet**	1	120 Vac	22	6	132
Électrovanne 1/2	1	120 Vac	6.1	6	36.6
Électrovanne 3/8	1	120 Vac	6.4	6	38.4
Moteur 3/4 HP pour pompe à haute pression	1	115/230 Vac	550	6	3300
Pompe pour l'arrivée d'eau	1	Mono 230 V	559.275	6	3355.65
Total			1150.775		6946.65

* Données obtenues des fiches techniques des composants commandés

** Puisque l'eau purifiée est destinée à la boisson un traitement de désinfection par UV est recommandé.

7.4.2. Estimation du besoin en nombre maximal de panneaux photovoltaïques ou en éoliennes

Tenant en compte les variations des gisements éolien et solaire, comme montré dans le chapitre 4 de ce mémoire, le dimensionnement sera basé sur le mois le plus défavorable vis-à-vis de l'irradiance solaire, qui correspond au mois de décembre. Pour pouvoir assurer une autonomie totale, nous nous basons en premier lieu sur deux cas de figure : deux simulations sur le logiciel RETScreen dans la première nous calculerons combien nous allons avoir besoin de panneaux photovoltaïques pour un système d'énergie solaire photovoltaïque seule et dans la deuxième simulation nous déterminerons combien d'éoliennes nous seront nécessaires pour une alimentation en énergie éolienne seule. La simulation nous servira seulement à cerner à peu près les besoins de notre station et puis une analyse détaillée sera réalisée dans le prochain chapitre de notre mémoire.

- Calcul de la puissance crête requise du générateur photovoltaïque

L'estimation de la puissance crête du champ photovoltaïque dépend essentiellement de l'irradiation du site de l'installation. On la calcule par l'équation suivante [43]:

$$P_c = E_c / k \cdot I_r \quad (\text{Équation VII.41})$$

où :

P_{ch} : Puissance crête du champ photovoltaïque (Wc) ;

I_r : Irradiation moyenne mensuelle reçue par le capteur photovoltaïque (kWh/m²/j) ;

E_c : Energie consommée par jour (Wh/jour) ;

k : Coefficient correcteur.

Le coefficient correcteur k est généralement compris entre 0,55 et 0,75, et dépend de plusieurs paramètres :

- L'incertitude météorologique ;
- L'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison ;
- Le rendement moyen charge/décharge de la batterie ;
- Le rendement de régulateur.

La figure 44 ci-dessous présente un histogramme schématique du rayonnement solaire quotidien en kWh/m²/jour en une année, généré par le logiciel RETScreen.

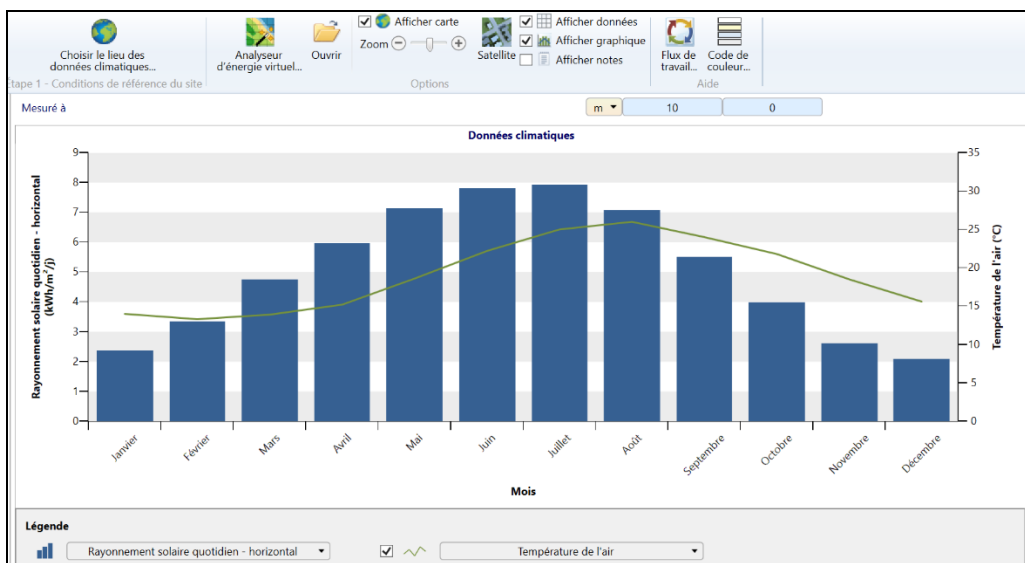


Figure 44 : Conditions de référence du site d'El Haouaria en Tunisie

Les modules vont produire de l'électricité qui sera stockée dans les batteries pendant toute la durée de la charge. Mais ils vont également en produire durant la décharge.

Nous venons de calculer la quantité d'énergie que les modules doivent produire chaque jour. Pour connaître la puissance crête à installer, il ne reste plus qu'à diviser E_c qui est égale à 6946.65 Wh/j (extraite du tableau 9) par le coefficient d'ensoleillement qui est égal à l'irradiation quotidienne annuelle 5.06, extraite de la figure 44 ci-dessus, multipliée par le coefficient de correction 0.55.

La puissance crête mesurée est égale à : $P_c = 2\,496.10\text{ Wc}$

Il faudra donc installer une puissance photovoltaïque d'au moins 2 496.10 Wc.

- Détermination du nombre de modules photovoltaïques

Connaissant la puissance crête P_c pour une installation photovoltaïque, et sachant que le module disponible au marché a une puissance crête unitaire P_u , nous pouvons déterminer le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour notre installation. Le nombre total de modules à installer se calcule par [2] :

$$N_{pv} = P_c / P_u \quad (\text{Équation VII.42})$$



Figure 45: Interface de l'installation sur RETScreen

Voici ci-dessus une illustration de l'interface de RETScreen en naviguant vers l'onglet « Installation ». Nous avons rempli toutes les informations concernant notre projet en choisissant un item dans la liste déroulante ou en remplissant la case si nous y trouvons le curseur. Pour passer à l'étape de modélisation énergétique, il suffit d'aller à la case comparaison en haut à gauche. En ce qui suit, nous allons présenter des captures écran des deux modèles énergétiques de notre choix à savoir respectivement photovoltaïque puis éolien.

Pour pouvoir visualiser ce qui s'affiche dans la figure 46 nous avons choisi selon notre besoin énergétique et selon sa disponibilité dans le site concerné le type de panneau

PV Polycristallin-Silicium et le fabricant Jinko Solar. Ce type représente les panneaux solaires les plus vendus au monde.

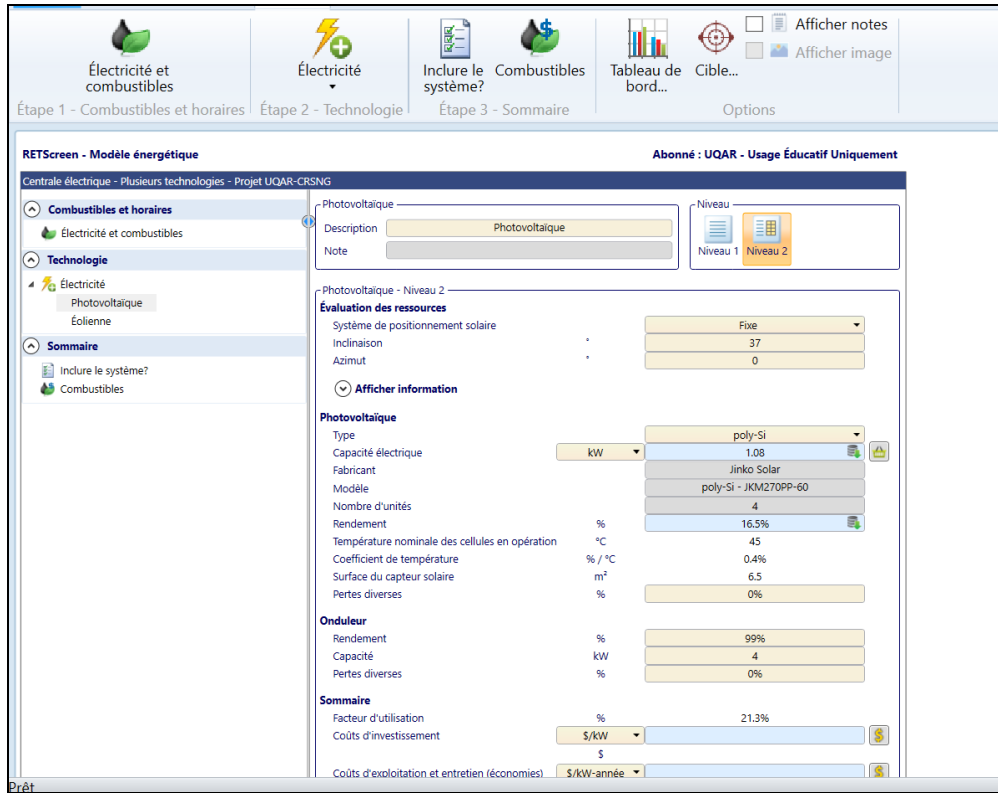


Figure 46 : Résultats de simulation du modèle PV pour le site d'El Haouaria

La figure 46 représente le modèle énergétique pour la technologie du photovoltaïque. Les panneaux choisis de la marque Jinko Solar ont une puissance crête égale à 270 Wc. Donc le nombre de panneaux PV maximal que nous pouvons inclure est égal à : $NPV=9.24$ que nous arrondissons à 10.

- Détermination du nombre d'éoliennes

Passons maintenant au système éolien. Avec RETScreen nous avons choisi le type d'éolienne le plus utilisé pour les stations de type petit-éolien qui est Berguey Wind power [52]. Le résultat de cette simulation est représenté dans la figure 47 qui illustre l'interface énergie dans le cas d'une station alimentée à une éolienne de 6 kW.

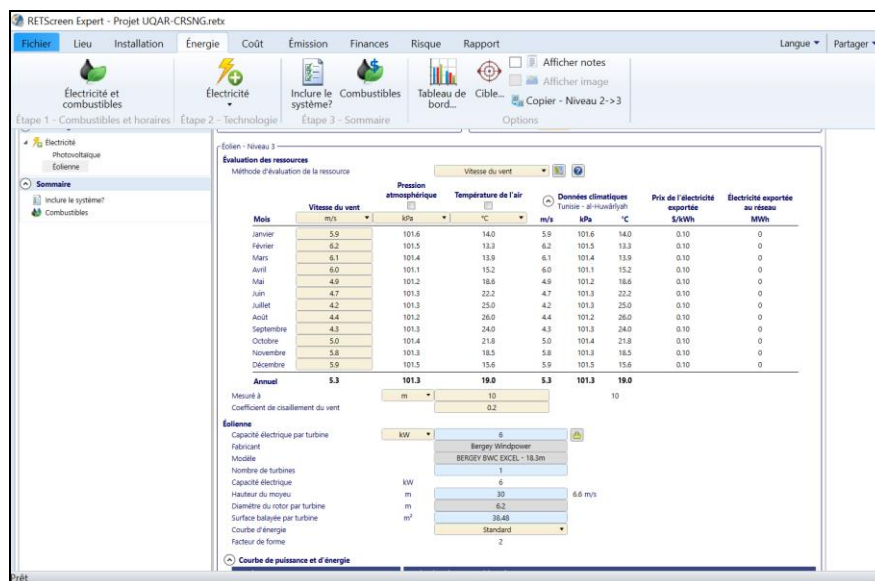


Figure 47: Résultats de simulation du modèle éolien pour le site d'El Haouaria

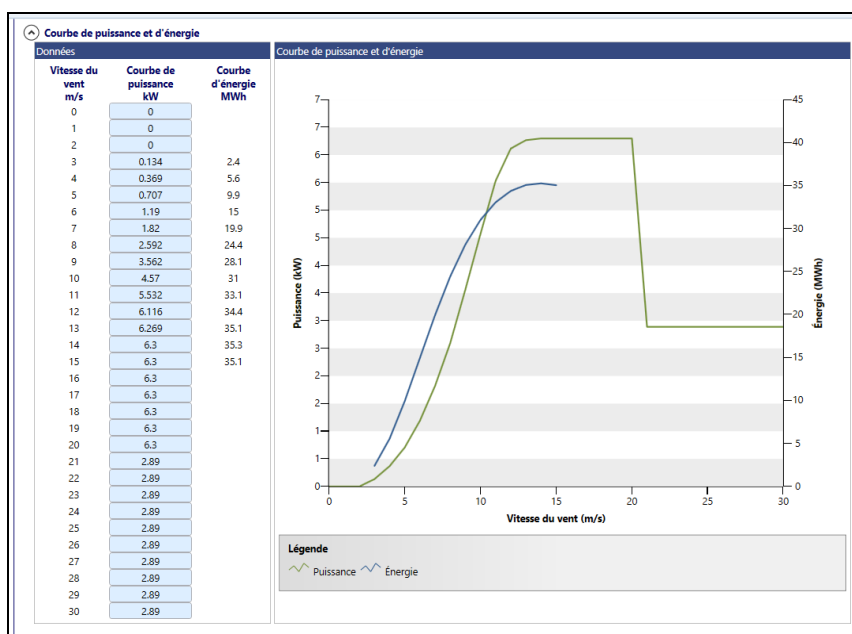


Figure 48: Courbe de puissance et d'énergie sur RETScreen

Les résultats de simulation pour un système 100% éolien montrent que pour ce type d'éolienne Berguey Windpower de 6 kW, il sera judicieux d'utiliser une seule éolienne. En effet, selon la courbe de puissance (figure 48), l'énergie annuelle produite en MWh sera

égale à environ 13.1 MWh ce qui est largement suffisant et cela nous permettra même d'exporter l'excès d'électricité produite en hiver.

- **Choix des accumulateurs**

Le système de stockage est composé de batteries afin d'assurer la continuité de l'alimentation pendant les jours à faible irradiation ou à faibles vents.

Le choix du système de stockage d'énergie est plutôt ardu. En effet, parmi toutes les technologies employées pour le stockage, chacune présente des avantages et des inconvénients par rapport à un critère donné. Nous citons :

- Les systèmes inductifs supraconducteurs et les supercondensateurs sont les seules technologies qualifiées de « systèmes de stockage direct », autrement dit, ils stockent l'énergie telle qu'elle est, sous sa forme d'électricité alternative. En revanche, ces technologies sont encore au stade de développement (développement de la cryogénie) et quelques imperfections persistent encore. De plus, ces systèmes sont défavorisés à nos yeux à cause de leur faible densité d'énergie (1 à 5 Wh/kg pour le premier et 5 à 10 Wh/kg pour le deuxième) [64, 65].

- Le stockage à air comprimé présente de nombreux avantages, ce qui lui prévaud un intérêt confirmé dans le milieu de recherche scientifique [66, 67]. De plus, il s'agit d'une méthode de stockage plutôt « écologique » puisque seul l'air que l'on respire est mis en œuvre pour stocker de l'énergie. Cependant, à l'échelle de notre projet, et à son stade préliminaire, cette technologie implique des complexités dues à l'ajout de matériel conséquent (convertisseur, machine électrique, conduites, bombones de stockage et parfois exigences par rapport à l'endroit d'exploitation). De plus, il s'agit d'un matériel cher.

Comme nous avons pour but de concevoir un premier prototype du projet, qui est demandé à évoluer continuellement, et comme nous sommes limités par une contrainte de coût qui doit être la plus raisonnable possible, nous avons opté pour deux bancs de batteries

au plomb- acide. Cette technologie présente une bonne cyclabilité (environ 1000 cycles de charge/ décharge), une constante de temps (environ une dizaine d'heures) et une densité de puissance (jusqu'à 120 Wh/kg) acceptables dans le cadre de notre projet, ainsi qu'un prix bas comparé à d'autres technologies telles que l'air comprimé.

Les batteries acide-plomb présentent de plus un rendement relativement haut de près de 50% et elles ont l'avantage de pouvoir générer de l'électricité directement dans le réseau, sur le bus à courant continu, sans passer par un quelconque étage de commande ou de conversion d'énergie. Elles sont désignées par leur capacité qui s'exprime généralement en Ah (Ampères-heures).

- **Choix de l'onduleur**

Le dimensionnement des onduleurs repose sur trois critères [54]:

Premier critère : la compatibilité en tension

Chaque onduleur est caractérisé par la tension d'entrée maximale admissible U_{max} . Si les modules photovoltaïques délivrent une tension supérieure à U_{max} , l'onduleur sera détruit. Cette valeur apparaît sur la fiche technique de l'onduleur.

Dans le dimensionnement, une attention particulière doit être accordée à la tension délivrée par les modules. Lors des mesures, nous devons prendre en considération que les tensions des modules photovoltaïques s'ajoutent lorsqu'on les branche en série.

Deuxième critère : la compatibilité en courant

Le courant maximal admissible en entrée est une caractéristique importante pour les onduleurs. Lorsque le courant d'entrée de l'onduleur côté DC est supérieur au courant maximal admissible par l'onduleur, celui-ci continue de fonctionner, mais il fournit uniquement au réseau la puissance correspondant à son courant maximal. Donc on doit s'assurer que le courant délivré par les modules photovoltaïques ne dépasse pas la valeur du courant maximal admissible I_{max} par l'onduleur.

Troisième critère : la compatibilité en puissance

Les onduleurs sont aussi caractérisés par leur puissance maximale admissible en entrée. Comme pour la tension et le courant, la puissance débitée par les modules photovoltaïques ne doit pas dépasser la puissance maximale d'entrée d'onduleur auquel ils sont associés. La plage de puissance nominale de l'onduleur peut être indiquée par l'intervalle suivant [44]:

$$0,8*P_{pv} < P_{AC} < 1,2*P_{pv} \quad (\text{Équation VII.43})$$

Et la puissance de l'onduleur est exprimée par la relation suivante :

$$P_{AC} = 1,1*P_{pv} \quad (\text{Équation VII.44})$$

Avec :

P_{AC} : la puissance nominale AC de l'onduleur ;

P_{PV} : la puissance du générateur photovoltaïque.

Le choix de l'onduleur dépend des spécifications électriques de la pompe telles que la tension et la puissance.

CHAPITRE 8

RÉSULTATS ET DISCUSSION

8.1. CARACTÉRISATION DE LA CHARGE

Les données météorologiques relatives au lieu d'implantation (El Haouaria, Tunisie) nous guident vers la piste de l'énergie éolienne. Or, même si la région est plutôt venteuse, la vitesse du vent reste fluctuante, induisant une fluctuation de la puissance éolienne produite. Pour éviter la déstabilisation du réseau autonome que nous allons installer, nous épaulerons l'éolienne avec un système photovoltaïque (PV). Nous ajouterons un moyen de stockage de l'énergie, qui viendra combler le manque de puissance de l'éolienne dans les moments d'interruption, et qui, en cas d'arrêt de cette dernière, fournira de la puissance.

Pour une installation composée de plusieurs appareils, l'énergie consommée par jour (Wh/jour) est obtenue en multipliant la puissance (W) de chaque appareil par le nombre d'heures de fonctionnement (h/jour), puis nous sommes les valeurs obtenues. L'expression de l'énergie consommée est donnée par l'équation suivante : $E = \text{Puissance de l'appareil} * \text{Durée de fonctionnement}$ (tableau 7). Dans notre cas, la consommation d'énergie du banc d'essai cumule 6946.65 Wh pour les 6 heures de fonctionnement. Ceci nous donne une puissance moyenne consommée de 1157.77 W.

Dans ce qui suit, nous allons dimensionner la puissance des organes principaux du système que nous nous proposons de concevoir, à savoir l'éolienne, les panneaux solaires et le système de stockage d'énergie.

8.2. ANALYSE ET MODÉLISATION DU POTENTIEL ÉOLIEN

8.2.1. Analyse du potentiel éolien

Puisque nous partons d'une feuille blanche, et vu le potentiel éolien et solaire que nous laissent voir les premières informations collectées, nous visons un système de jumelage éolien photovoltaïque. Cette résolution nous permet d'espérer une disponibilité maximale de l'énergie. Pour cela, le choix des composants du système d'énergie devra correspondre à la vitesse du vent mesuré localement, pour pouvoir tirer profit de l'énergie éolienne disponible.

Le vent, bien que très fluctuant et instable, peut être classé suivant sa vitesse, en trois classes [52, 68] :

- Les vents faibles : la vitesse est inférieure à 4 m/s,
- Les vents moyens : la vitesse est inférieure à 9 m/s,
- Les vents forts : la vitesse est supérieure à 9 m/s.

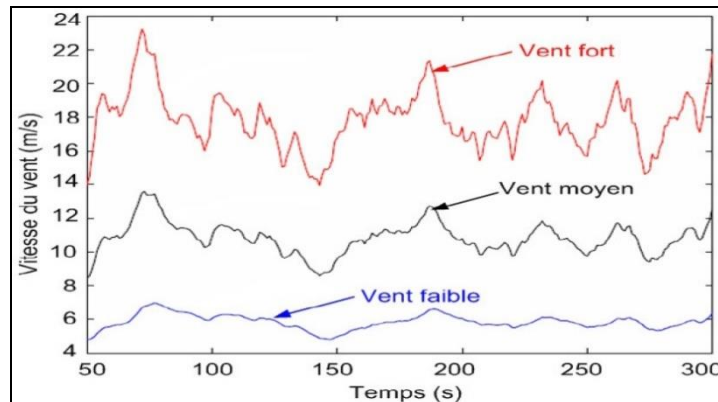


Figure 49 : Classification des vitesses du vent [69]

Pour augmenter l'indépendance par rapport au solaire, nous optons pour un système de stockage de l'énergie qui, dans le cas de surplus de production de l'éolienne, où la

puissance produite sera supérieure à celle requise par la charge, récupérera ce surplus. Ensuite, il va restituer cette énergie stockée en cas de baisse de production de l'éolienne.

L'analyse du potentiel éolien vise à aller plus loin que la collecte d'informations météorologiques. Elle aboutit à une caractérisation des variations que subit la vitesse du vent sur une année, ce qui nous permet ensuite de prévoir l'énergie que transporte le vent et par conséquent ce que nous allons pouvoir en rendre utile par le biais d'une éolienne. Ce travail permettra de choisir finalement la bonne éolienne parmi celles qui existent sur le marché.

Pour caractériser le profil du vent de manière scientifique, nous devons nous fier à des moyens mathématiques et probabilistes appropriés. Une des méthodes appropriées à notre projet consiste à dessiner la caractéristique de Weibull. Il s'agit d'une étude probabiliste qui aboutit à une représentation graphique de la probabilité des différentes vitesses de vent à long terme. Les investisseurs en parcs éoliens se réfèrent à cette étude pour connaître le potentiel éolien d'un site et pour optimiser le choix des éoliennes à utiliser.

La distribution de Weibull a pour expression [70]:

$$f(v, \lambda, k) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k \right] \quad (\text{Équation VIII.1})$$

où:

v est la vitesse en m/s, k est le facteur de forme. Il est sans dimension et a pour expression : $k = 1 + 0.483(V_{moy} - 2)^{0.51}$ et λ est le facteur d'échelle, donné par :

$$\lambda = \frac{1.125 V_{moy}}{(1-B)} \quad (\text{Équation VIII.2})$$

Avec

$$B = 1 - 0.81(V_{moy} - 1)^{0.089} \quad (\text{Équation VIII.3})$$

Dans le cas d'El Haouaria, ces formules donnent : $k=1.89$ et $\lambda= 6.46$ m/s.

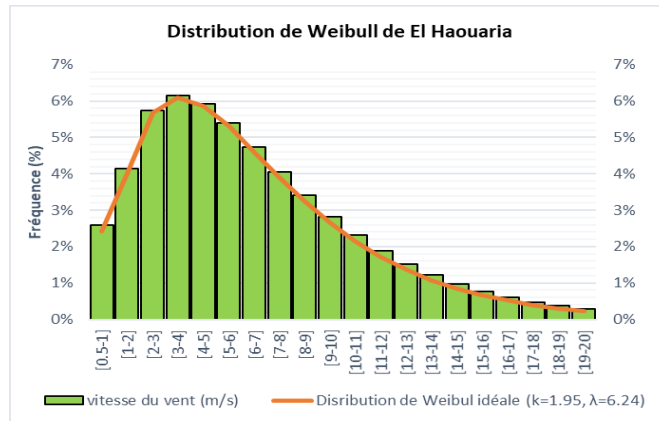


Figure 50 : Distribution de Weibull pour la région d'El Haouaria

Le graphe 50 illustre la distribution de Weibull des vitesses du vent, établie pour le site d'El Haouaria à partir des données mensuelles du vent extraites de RETScreen et en intégrant les valeurs de k et λ précédemment calculées.

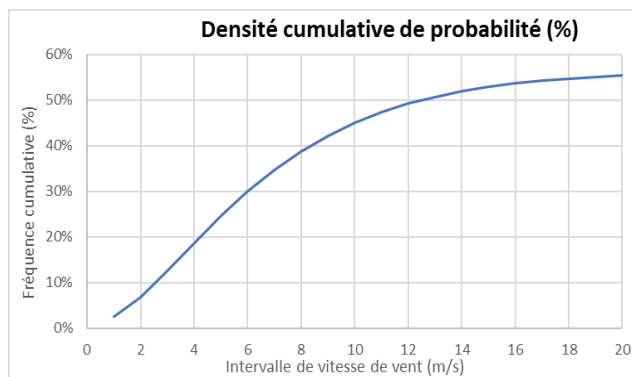


Figure 51: Densité cumulative de probabilité d'El Haouaria

Le graphe 51 ci-dessus illustre la densité cumulative de probabilité des vitesses du vent, établie pour le site d'El Haouaria à partir des données de RETScreen et en utilisant les

valeurs de k et λ précédemment calculées pour calculer la fréquence cumulative avec l'équation VIII.1

Nous constatons, d'après les figures 50 et 51, que les vitesses les plus probables seront de l'ordre de 5 m/s. Si nous multiplions chaque vitesse par sa fréquence (en %) et que nous sommes le tout, nous obtenons la vitesse moyenne d'environ 5.73 m/s. On remarque qu'elle est relativement différente de la moyenne analytique des données de RETScreen, qui s'élève à 5,3 m/s. Cette dernière nous donne en effet une appréciation pessimiste de la vitesse moyenne et sous-estime le potentiel éolien de la région étudiée.

D'après la figure précédente, les vitesses en dessous de 8m/s ont une densité de probabilité de plus de 40%. Ces vitesses sont donc prédominantes et elles détermineront nos choix par rapport à l'éolienne à installer et même par rapport aux proportions d'énergie solaire/éolienne attendues du système qui sera proposé.

La distribution de Weibull est un outil de prévision théorique. Il nous renseigne certes sur les tendances, mais des valeurs mesurées sont toujours plus parlantes et plus représentatives. Malheureusement, dans notre cas, aucune étude du vent n'a été faite à El Haouaria, ou du moins, nous n'en disposons pas. Nous nous baserons alors sur les résultats que nous détenons pour choisir l'éolienne la plus adaptée aux circonstances du projet. Afin de corroborer le calcul effectué, nous pouvons utiliser un des outils informatiques disponibles spécialisés dans l'évaluation et le dimensionnement des systèmes d'énergie renouvelable.

Le logiciel **HOMER** est un allié de choix pour la conception de notre système. Prenant en considération les données du vent à El Haouaria recueillies sur le logiciel RETScreen, HOMER, à partir de sa base de connaissances, nous fournit une étude estimative du potentiel éolien. À partir des moyennes mensuelles que nous avons entrées, HOMER crée une estimation de la vitesse du vent sur toute une année, heure par heure.

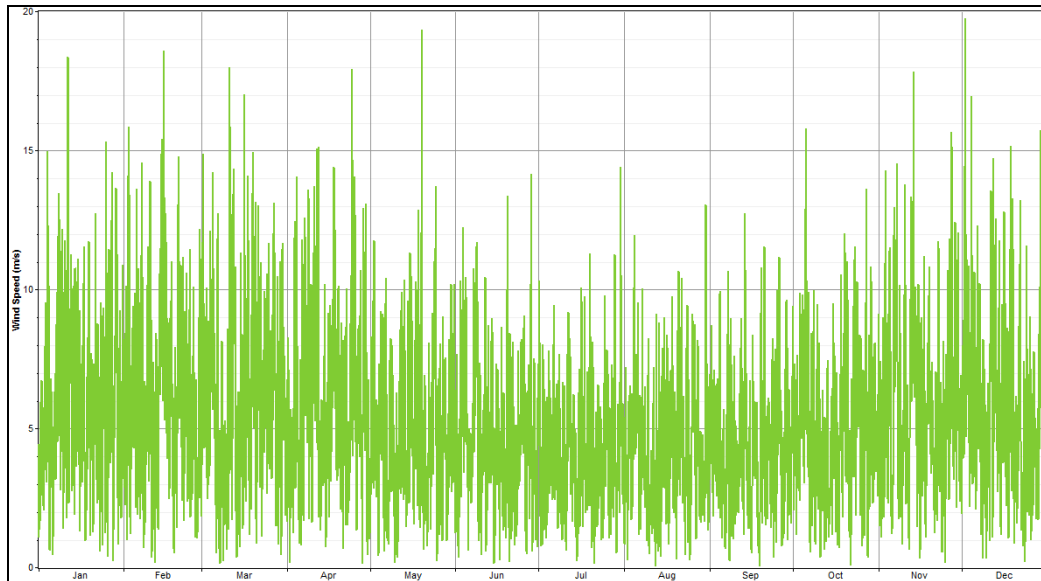


Figure 52 : Simulation de la variation de la vitesse du vent sur une année (HOMER)

Cette courbe (figure 52) montre les vitesses éventuelles que le vent peut avoir au cours d'une année. Plus qu'une courbe traçant les moyennes mensuelles, cette courbe nous donne une idée claire du potentiel éolien dans la région. Nous constatons qu'à priori, les vitesses du vent seront plus intenses en hiver qu'en été.

8.2.2. Choix de l'éolienne

Dans un cas idéal, le choix de l'éolienne est fait de telle sorte que la puissance moyenne produite soit supérieure à la puissance des appareils à alimenter. Dans notre cas, nous devons alimenter une charge nominale de 1.16 kW composée de différents appareillages électriques formant l'unité de désalinisation d'eau par osmose inverse. À cette charge pourra s'ajouter d'autres appareils utilisés au besoin, citons à titre d'exemple un ordinateur portable, des rallonges. Il s'agit d'un local de travail. Si nous ajoutons l'appel de courant au démarrage de la pompe du système de dessalement, cette charge totale pourra atteindre un pic de 3 kW de puissance instantanée. Afin de choisir la bonne éolienne, nous proposons de comparer plusieurs modèles disponibles, décrits selon le tableau 10.

De nombreux modèles dans cette gamme de puissance existent sur le marché. Au sein du LREE, plusieurs de ces modèles ont déjà été essayés et utilisés. Nous en avons retenu quelques-uns pour les comparer. Ces modèles sont :

- Bergey XL-S 10 kW
- Bergey XL-6R 6 kW
- Bergey XL-1 1 kW
- HY 3000 3 kW

Les spécifications techniques de chaque modèle sont fournies dans le tableau 9.

Nous nous sommes limités à cette gamme de puissance (1 – 10 kW) car notre projet est orienté vers l'optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables, et non la maximisation de la puissance installée.

Tableau 9 : Spécifications techniques des éoliennes retenues

Modèle*	Bergey XL-S	Bergey XL-6R	Bergey XL-1	HY 3000
Puissance nominale (kW)	10	6	1	3
Vitesse de vent nominale (m/s)	11.6	12.4	12	12
Type de génératrice	Synchrone à aimants permanents	Synchrone à aimants permanents	Synchrone à aimants permanents	Synchrone PMA sans balais à trois phases avec aimants en néodyme haute performance
Diamètre du rotor (m)	7m (23ft)	6.2m (20ft)	2.5m (8.2ft)	3m (9.84ft)
Nombre de pales	3	3	3	5
Surface balayée (m²)	38.48	30.2	4.91	7.07
Vent de démarrage (m/s)	2.2	3.1	3	2
Système d'orientation	Passif (gouvernail arrière)	Passif (gouvernail arrière)	Passif	Passif

* Caractéristiques techniques dans **annexe VI**

Source : [71].

Nous avons comparé ces éoliennes, dont les fiches techniques sont présentées à l'**annexe VI** de ce rapport, en nous basant sur les données des constructeurs, la comparaison s'est portée sur les paramètres suivants :

- Type de la tour : une tour cylindrique est plus simple et moins perturbante pour l'éolienne qu'une tour en treillis.
- Hauteur de la tour : Plus la tour est courte, plus elle est légère et moins les haubans occupent de la place au sol
- Poids de la nacelle : Plus la nacelle est légère, plus l'installation est fiable,
- Compatibilité avec la nature du projet : Une éolienne conçue pour le pompage d'eau ou une machine multi-usage,
- Température minimale de fonctionnement : toutes les éoliennes choisies fonctionnent très bien dans la marge de température du lieu d'implantation (10° à 26°),
- Exigence en maintenance : une machine haute perchée sera plus facile à maintenir qu'une machine posée sur une petite tour. De même, une éolienne à machine synchrone ne nécessitera quasiment pas de maintenance, contrairement à une éolienne à machine asynchrone (maintenance du réducteur...),
- Disponibilité opérationnelle : elle traduit la fiabilité de la machine,
- Rendement : peut être tiré des courbes de puissance des éoliennes testées,

Grace à des mesures pratiques effectuées sur ces modèles d'éoliennes sur le logiciel HOMER, nous avons pu les comparer notamment au niveau de leur courbe respective de puissance, ainsi que leur rendement respectif, montré dans les graphiques de la figure 53 de la page suivante.

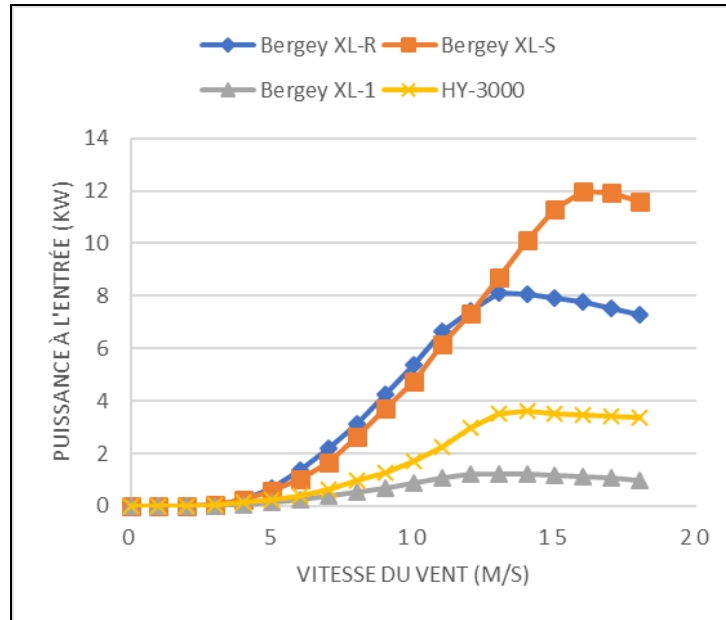


Figure 53 : Courbes de puissance des éoliennes comparées

Les vents de vitesse inférieure à 5 m/s ont une densité assez forte d'après HOMER. La puissance disponible à ces vitesses- là est alors un paramètre décisif. D'après la figure 53, nous pouvons d'ores et déjà éliminer les deux modèles HY-3000 et Bergey XL-1. Au-delà de 11 m/s, on remarque aussi que la Bergey XL-S produit plus de puissance que la Bergey XL-6R.

D'après la figure 53, nous remarquons que, même si elle n'affiche pas les rendements les plus élevés, la Bergey XL-6R revendique les meilleurs rendements à basse vitesse de vent. D'ailleurs, elle est la seule de la sélection à produire de l'énergie à partir de 3 m/s, ce qui est très influent, vu la prépondérance des vents faibles sur le lieu d'implantation de notre système autonome d'ER.

Nous avons rassemblé les résultats de ces comparaisons dans une matrice de décision. Il s'agit d'un outil scientifique qui attribue des coefficients aux paramètres de comparaison et note chaque modèle sur sa performance relativement aux autres modèles. La matrice de choix obtenue est représentée dans le tableau 10.

Tableau 10 : Tableau comparatif des éoliennes évaluées

Eolienne	Type tour	Hauteur tour	Poids de la nacelle	Compatibilité	Temps. Min.	Exigence de maintenance	Disponibilité	Rendement	Total
Coef.	1	1	2	2	2	3	3	3	20
Bergey XL-6R	3	3	3	3	3	3	3	1	2.55
Bergey XL-S	3	1	3	2	3	2	1	2	2.2
Bergey XL-1	1	1	2	2	3	1	1	1	1.5
HY-3000	1	1	3	2	3	1	1	1	1.4

La matrice de décision nous dicte le choix de la Bergey XL-6R. Notre choix est de plus soutenu par les arguments suivants :

- La Bergey XL-6R est l'une des petites éoliennes les plus vendues du marché [72],
- D'après les spécifications du constructeur, la Bergey XL-6R est plus simple à installer et à utiliser surtout que le projet est à échelle réduite [71].
- La Bergey XL-6R vient avec un chargeur spécifique de même marque, adapté à sa puissance et son comportement dynamique, ce qui nous facilitera la tâche de commande ensuite. De plus elle peut être commandée par un dispositif de contrôle spécifique (VCS control) qui gère sa production d'énergie de manière appropriée et optimale (démarrage, arrêt, freinage, gestion des puissances active et réactive...).

Pour toutes ces raisons réunies, nous fixons notre choix sur la Bergey XL-6R de 6 kW. Cette éolienne affiche une courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent représentée dans la figure qui suit :

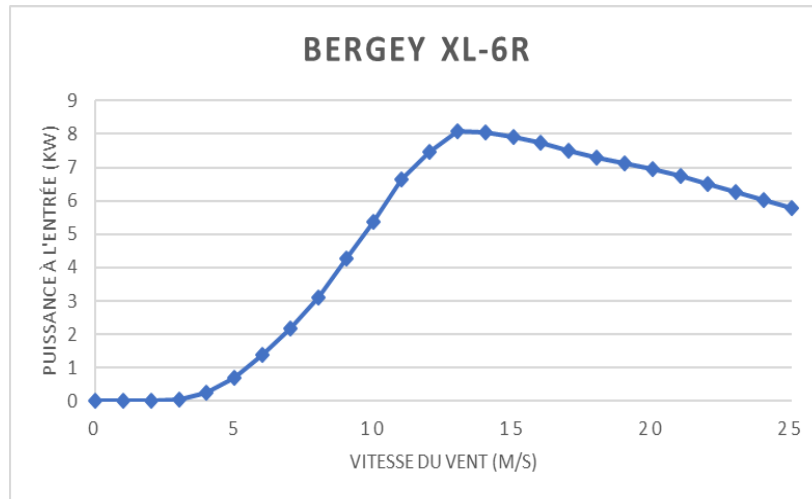


Figure 54 : Courbe de puissance de la Bergey XL-6R

Pour modéliser le comportement de l'éolienne donc la puissance n'est pas à commander ou à asservir, puisque la logique de fonctionnement d'un système autonome d'ER repose sur le fait qu'il s'adapte uniquement à la puissance fournie instantanément par l'éolienne, nous pouvons étudier sa courbe de puissance (figure 54).

8.3. DIMENSIONNEMENT DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

D'après HOMER, nous remarquons que la production mensuelle moyenne d'électricité à partir de l'éolienne est inférieure à 1 kW durant les mois de juin, juillet, août et septembre comme le montre la figure 55 :

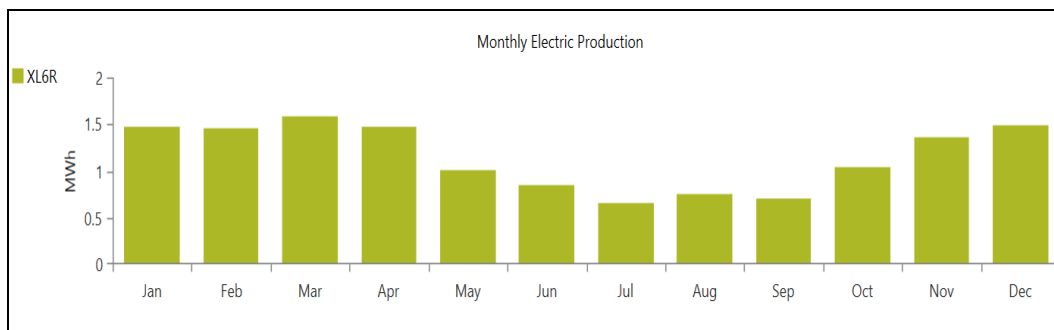


Figure 55 : Résultats de simulation par HOMER du système tout éolien

Comme nous l'avons établi au début de ce travail de conception, la puissance moyenne du système de dessalement d'eau qui constitue notre banc d'essai absorbe une puissance moyenne de 1.16 kW durant les 6 heures de fonctionnement par jour. Nous estimons donc que nous avons besoin de 500 W en moyenne afin de compenser le manque d'énergie pendant la période estivale. Nous avons choisi les panneaux solaires les plus répandus en Tunisie : Polycristallin 60 cellules 270 W (voir **annexe VIII**), ils ont une superficie de 1.6 m² et un rendement de 17.2 %.

Pour connaître le nombre total de panneaux solaires que nous allons installer, nous cherchons d'abord la production/ jour d'un panneau solaire. En étant positionné sur l'angle de 37° par rapport à la verticale (figure 56), notre panneau solaire va produire 17.2% du taux d'ensoleillement en été qui est égal à peu près à 7.6 kWh/m²/jour, soit un total d'énergie produite par jour de 2,1 kWh par panneau photovoltaïque. Sachant qu'en été le nombre d'heures d'ensoleillement est 12h, la puissance est alors calculée comme suit :

$$P(W) = \frac{\text{Énergie produite}}{\text{Nombre d'heure d'ensoleillement}} = \frac{7.6 * 1.6 * 17.2\%}{12} = \frac{2.1}{12} = 175$$

La puissance nécessaire est alors égale à 175 W par panneau solaire. Afin de fournir les 500W manquants, le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire est :

$$NPV = 500/175 = 2.85, \text{ que nous arrondissons à } 3.$$



Figure 56 : Données de l'ensoleillement fournies par le logiciel HOMER

Ainsi, afin de combler le déficit en énergie, nous avons opté à ajouter 4 panneaux solaires produisant ensemble 700 W, en moyenne, ce qui couvre totalement le manque produit par l'éolienne. Pour que leur fonctionnement soit optimisé, nous avons choisi les critères suivants :

- Favoriser la production en été et minimiser la production en hiver (pour limiter l'excès de production)
- Orienter suivant l'azimut plein sud: 0 degrés en Tunisie
- Inclinaison des panneaux : 37 degrés par rapport à l'horizontale

8.4. DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR

Notre choix s'est porté sur le modèle Schneider SW 4 kW qui est un onduleur connu sur le marché mondial, très robuste et possède une garantie de 5 ans. Les critères de choix sont :

- Disponibilité sur le marché tunisien
- Facilité d'installation

- Qualité
- Puissance supérieure à 3 kW

8.5. SIMULATION DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ÉOLIEN OBTENU

Afin de pouvoir tirer profit des fonctionnalités de HOMER, nous passons par deux étapes :

- Premièrement, la charge est caractérisée. Nous indiquons à HOMER qu'entre 9h et 15h, une puissance moyenne de 1.157 kW est consommée. Nous annulons par la même occasion la variabilité journalière (Day-to-day variability) et la variabilité du pas de temps (Timestep variability). L'interface utilisée est illustrée dans la figure 57 ci-après.

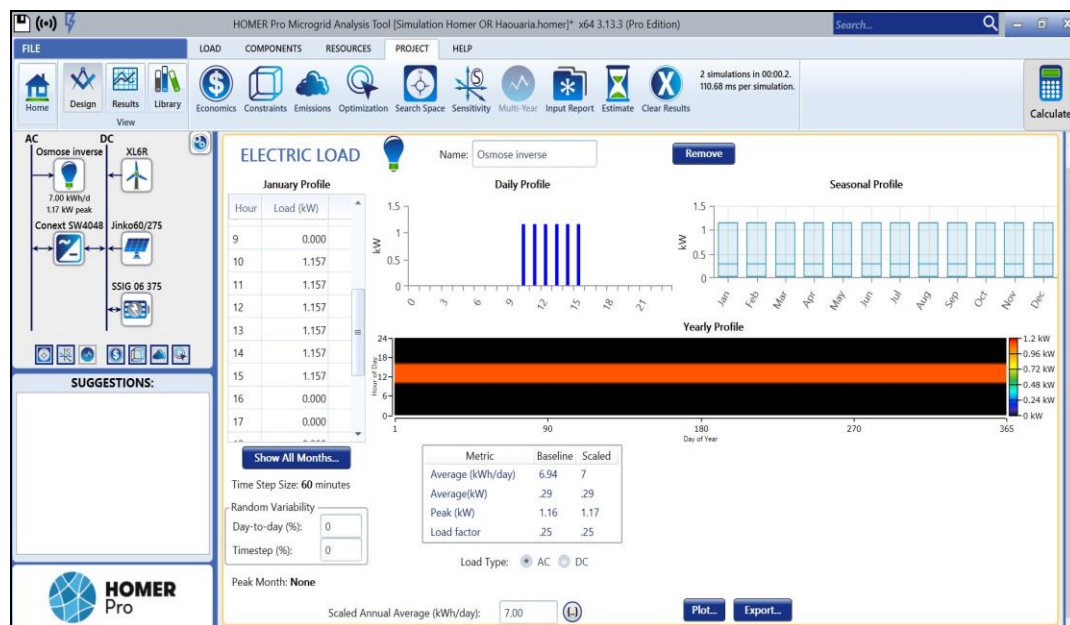


Figure 57: Simulation du système photovoltaïque dans HOMER

- Deuxièmement, nous spécifions à HOMER le type et nombre de composants utilisés dans la configuration de notre système d'énergie renouvelable.

Une fois ces étapes effectuées, HOMER calcule un scénario et nous donne accès aux résultats. Parmi ceux-ci, nous pouvons examiner l'amélioration de la production d'énergie, comme décrite par le graphique suivant (figure 58) :

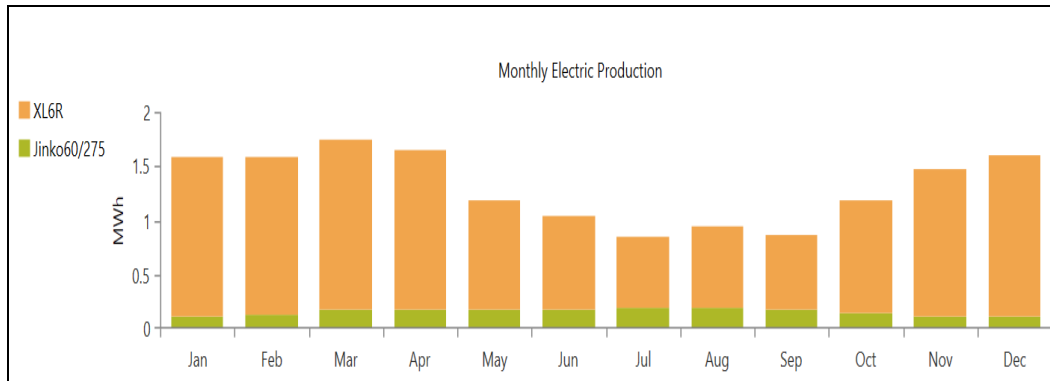


Figure 58: Production d'électricité moyenne mensuelle du système éolien-solaire

Comme le démontre la figure 58, l'ajout de panneaux solaires permet d'augmenter la puissance moyenne produite au niveau souhaité. Nous constatons par ailleurs que l'éolienne produit plus pendant la saison froide que pendant les mois chauds de l'année. Ceci confirme notre remarque du début de la conception, lors de l'évaluation du potentiel éolien. En effet, la moyenne des vitesses du vent est plus élevée pendant la saison froide. Cette variation de la production de l'éolienne n'est pas seulement due à celle de la vitesse. Notons aussi que la densité du vent augmente avec la baisse de la température. Par conséquent, le vent transporte plus d'énergie pendant la saison froide que pendant la saison chaude.

Comme nous pouvons le constater également, les panneaux photovoltaïques produisent plus pendant les mois de juin, juillet et août, la période pendant laquelle notre éolienne est la moins performante. Ceci correspond parfaitement au résultat escompté, puisque le manque de vent est plutôt en été, on a orienté les panneaux PV en position ÉTÉ pour qu'ils produisent plus l'été que l'hiver.

Sachant que le besoin annuel d'énergie pour notre système de dessalement d'eau est de 2555 kWh, cette première simulation HOMER nous montre pour la configuration

‘éolienne + panneaux PV’ choisie une grande quantité d’énergie annuelle produite (15710 kWh), mais une demande d’énergie annuelle non satisfaite de 194 kWh. En d’autres termes, 7.61% du temps de fonctionnement normal, notre système de dessalement d’eau ne sera pas alimenté. En revanche, nous notons que 84.2% de l’énergie produite par la configuration ‘éolienne + panneaux PV’ est perdue, et ce précisément, car la plupart du temps, l’énergie produite par l’éolienne et les panneaux solaires est supérieure à la demande instantanée d’énergie.

8.6. DIMENSIONNEMENT D’UN SYSTÈME DE STOCKAGE

Vu les résultats de la première simulation, la solution pour mieux fructifier l’énergie produite et améliorer le taux d’alimentation de notre système de dessalement consiste à ajouter un banc de stockage d’énergie. Dans le cadre de notre projet, des bancs de batteries devront stocker le surplus de production de l’éolienne et des panneaux PV et garantir la disponibilité de l’énergie quand l’irradiation solaire et le vent ne sont pas suffisants.

Les énergies renouvelables sont par défaut fluctuantes et il y aura des moments dans la journée où la puissance fournie ne suffira pas pour alimenter la charge principale. Les batteries interviennent à ce moment en se déchargeant pour pallier le manque de puissance. Dans notre cas, nous nous proposons de mettre assez de batteries pour assurer une alimentation continue pendant les 6 heures de fonctionnement planifié pour notre banc d’essai, ce qui correspond à un besoin énergétique de 6.946 kWh.

Le calcul de la capacité C des accumulateurs en ampère heure (Ah) est donné par la relation suivante [73]:

$$C = E_c \cdot N_{jours} / D \cdot U \quad (\text{Équation VII.2})$$

où :

E_c : énergie consommée par jour (Wh/j), il s'agit de l'énergie quotidienne nécessaire pour alimenter les appareils électriques ;

N_{jours} : le nombre de jours d'autonomie ;

U : la tension de la batterie ;

D : la décharge maximale admissible.

Notre choix de batterie s'est porté sur un modèle acide-plomb de type AGM avec $D=50\%$ (voir **annexe X**). La tension U de ce banc de stockage devra être comme expliquée précédemment, de 48V. Nous fixons N à 1 jour d'autonomie. Ainsi, la capacité des accumulateurs nécessaire à ce système est égale à : $C=6946.65 \cdot 1 / 0.5 \cdot 48 = 289.44 \text{ Ah}$.

Donc, nous aurons besoin d'un accumulateur de capacité minimale de 289.44 Ah sous 48 V.

Il n'existe pas de batterie sur le marché présentant les caractéristiques citées. Nous devons donc composer un banc de stockage avec plusieurs batteries identiques de sorte d'approcher les nombres recherchés. L'assemblage des batteries se fait de deux manières :

- En série pour obtenir un multiple de la tension unitaire, la capacité totale en Ah étant égale à celle de chacune des batteries
- Ou en parallèle pour additionner les capacités en Ah, tout en gardant la tension du banc égale à celle de chacune des batteries.

Deux modèles de batteries retiennent notre attention :

- Un modèle 12V 100Ah. Afin d'obtenir les caractéristiques souhaitées pour le banc de stockage, nous allons disposer en parallèle 3 bancs, chacun ayant 4 batteries reliées en série. De cette façon, nous obtenons un banc total de 48V 300Ah
- Un modèle 6V 390Ah. Nous en disposons 8 batteries en série pour former un banc total de 48V 390 Ah

Nous choisissons donc la deuxième solution, car plus simple à mettre en œuvre.

Afin de pouvoir connecter les batteries au reste du système d'énergie renouvelable, nous devons utiliser un chargeur dédié. Cet équipement permet de réduire la fluctuation de la tension provenant des énergies renouvelables et de l'adapter en continu à celle des batteries. De cette façon le bon fonctionnement de ces dernières est assuré. Dans notre cas, l'éolienne Bergey XL-6R produit une tension continue de 48V. Le chargeur et les batteries doivent fonctionner également autour de cette tension.

8.6. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE

Une fois tous les composants choisis dans HOMER, ce dernier dresse un schéma du système d'énergie que nous venons de concevoir, représenté dans la figure 59:

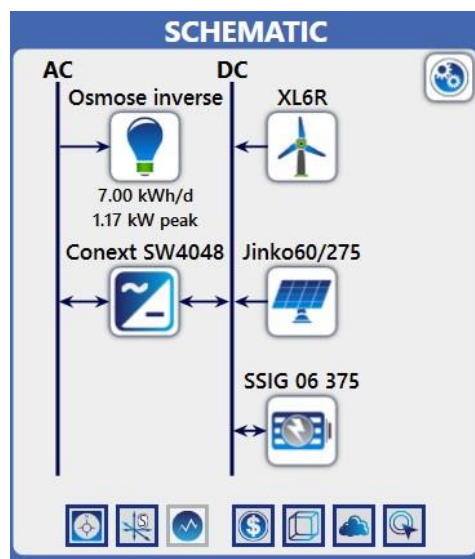


Figure 59: Architecture du système d'ER envisagé

Le calcul via HOMER permet d'obtenir plusieurs scénarii qui résultent de la combinaison des différents composants introduits. Les scénarii incluent une partie ou l'ensemble des composants avec une variation de certains paramètres (hauteur de l'éolienne, nombre de batteries etc...). Nous examinons directement le scénario solaire-éolien-batteries que nous désirons évaluer.

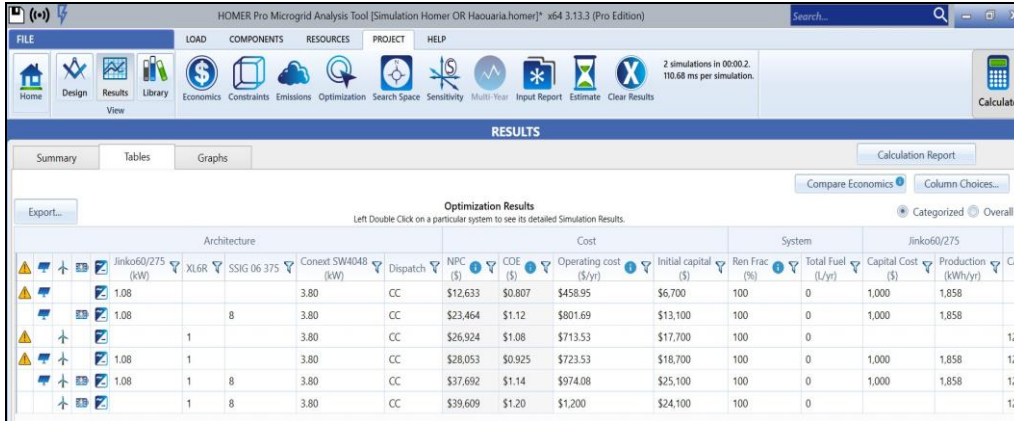


Figure 60: Résultats de la simulation avec 8 batteries de marque Trojan 6V 390 Ah

Cette deuxième simulation sur le logiciel HOMER avec les nouveaux composants ajoutés (8 batteries de marque Trojan 6V 390 Ah) permet d’obtenir les résultats suivants :

L’énergie fournie à la charge (notre système de dessalement) est : 2555 kWh/an (100%) et la demande d’énergie non satisfaite est : 0 kWh/an (0%).

Nous pouvons donc conclure qu’avec l’ajout des batteries, les interruptions d’alimentation sont pratiquement éradiquées.

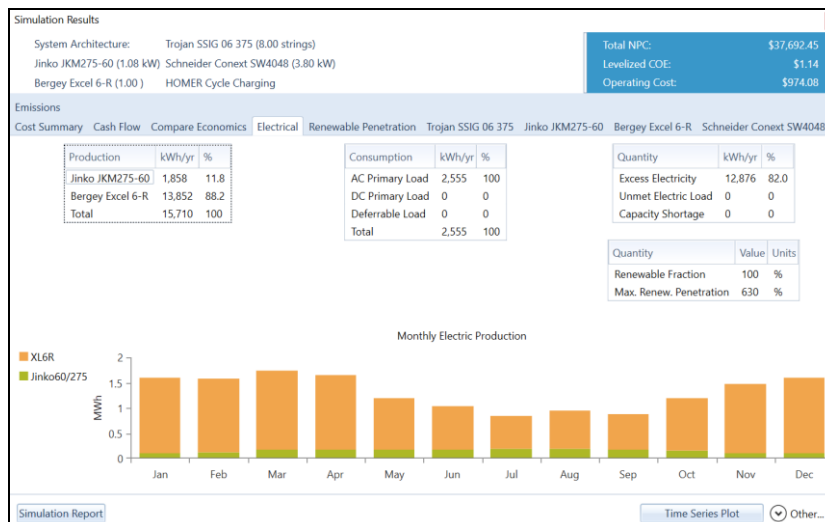


Figure 61: Production d’électricité moyenne du système PV-éolien-batteries

En examinant le graphe en bas de la figure 61 nous remarquons que la production d'énergie annuelle perdue (Excess electricity) a diminué par rapport au scénario sans batteries. Cette réduction correspond à la quantité d'énergie emmagasinée puis restituée par les batteries.

Il faut noter que l'énergie emmagasinée dans les batteries est en partie consommée par celles-ci, et ce phénomène est attribué généralement à leur inertie chimique ainsi qu'aux pertes par effet joule.

8.7. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ PAR RAPPORT AU NOMBRE DES BATTERIES

Même si les batteries ont permis d'éradiquer les coupures d'énergie dans notre système, nous remarquons quand même que la capacité du banc de stockage est surdimensionnée par rapport au besoin réel.



Figure 62: État de charge avec 8 batteries

Comme le montre la figure 62, le banc de stockage permettra de restituer à la charge 242 kWh par an seulement, alors que sa capacité utile totale est de 9.03 kWh. Il restera chargé à 100% pendant 86% du temps et sa présence permet une autonomie de 31 heures, alors que nous avions visé une autonomie de l'ordre de 6 heures. Sa durée de vie estimée

est de 42.9 ans. Compte tenu du coût généralement très élevé des batteries, il est judicieux de chercher un moyen de réduire leur quantité.

Pour ce faire, nous nous proposons de recalculer le scénario de notre système avec 4 batteries seulement. Le résultat de ce changement est démontré dans la figure suivante :



Figure 63: État de charge avec 4 batteries

Comme le montre la figure 63, nous avons réduit le banc de stockage à de 8 à 4 batteries 6V 390 Ah seulement. L'autonomie est passée de 31 heures à 15.5 heures, mais ceci est encore satisfaisant dans notre cas car notre système ne fonctionnera pas plus que 6 heures par jour. Le graphe « State of Charge » qui nous indique que les batteries seront totalement chargées pendant 82% du temps, prouve qu'elles trouveront toujours de l'énergie pour se recharger avant le jour suivant.

L'énergie restituée est également en baisse par rapport à la configuration avec 8 batteries. Ceci implique 0.3 % de rupture d'alimentation de notre système, contre 0% dans le cas précédent. Ce résultat correspond à 6 heures et 39 minutes d'interruption cumulée sur toute l'année et ceci n'est pas mauvais dans notre cas non plus, surtout comparé aux 7% (153 heures) dans le cas où le système ne comporterait pas de batteries du tout. La durée de vie de ce banc réduit tombe à 20.8 années, mais ceci n'est pas grave compte-tenu que la

durée de vie du projet est estimée à 25 ans. Reste un seul point à considérer : le passage de 8 à 4 batteries implique que le banc de stockage aura une tension de 24V seulement. Ceci impose :

- L'ajout d'un convertisseur DC-DC qui modifie la tension de l'éolienne et des panneaux solaires de 48V à 24V
- Le changement de l'onduleur pour un modèle compatible avec une tension continue de 24V (ex : Schneider SW 4024)

A noter que ces changements impliquent généralement des coûts très minimes. Dans la figure 64 suivante, nous exposons un modèle de convertisseur DC-DC disponible dans le marché (Amazon).



Figure 64: convertisseur DC-DC 48 V à 24 V

En conclusion, en réduisant le nombre de batteries de 8 à 4 seulement, nous divisons par deux le coût relatif au stockage et à sa maintenance, tout en gardant presque le même niveau de performance globale.

8.8. ANALYSE ÉCONOMIQUE DE LA SOLUTION SIMULÉE

Lors de la caractérisation de notre configuration dans HOMER, nous introduisons les données relatives au coût d'achat et à la maintenance de chaque composant. Ces informations sont tirées de plusieurs sources dont des catalogues constructeurs et d'anciens projets réalisés au sein du LREE [55]. Ces prix sont détaillés comme suit :

Tableau 11 : Nomenclature du système autonome à ER conçu

Composant	Marque	Puissance (kW)	Prix (\$)	Main d'œuvre (\$/année)
Onduleur	Schneider SW	4	5100	50
PV (4)	Polycristallin	0.7	1000	100
Eolienne	Bergey XL-6R	6	12000	100
Batteries (4)	Trojan	Capacité : 390 Ah, Tension : 6 V	1600	75
Coût total de l'installation			19700	

Le calcul effectué par HOMER permet de générer des informations intéressantes relatives aux aspects financiers de la solution que nous avons conçue. Ces données doivent être analysées dans un contexte de projet en milieu isolé. Voici les résultats de l'analyse économique sur le logiciel HOMER :

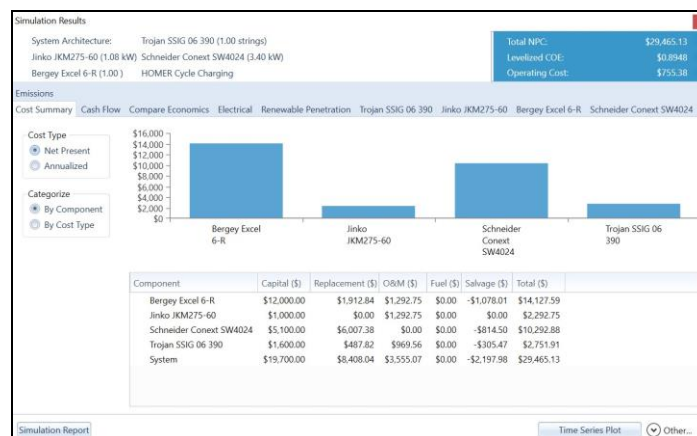


Figure 65: Résultats de la simulation des prix des composants

Nous pouvons calculer d'après les données dont nous disposons déjà que le système d'énergie renouvelable impliquera des coûts d'opération et de maintenance de l'ordre de 3555 \$ sur toute la durée de vie du système. Ces coûts ne sont pas étalés uniformément sur toutes les années, mais seront débités principalement à chaque fois qu'une révision ou qu'un remplacement d'équipement aura lieu. En tenant compte de la valeur résiduelle des composants à la fin de la vie du système, nous obtenons une Valeur Présente Nette (NPC) de 29465\$, sachant qu'il n'y a aucune facture d'électricité à payer. Le coût du kWh généré par notre système s'élève à 0.89\$. Ce prix peut paraître cher, mais il est incomparable par rapport aux coûts relatifs aux problèmes de santé et aux pertes agricoles qu'une eau trop saline peut causer, sans parler des coûts relatifs à l'acheminement d'eau douce.

Par comparaison, on note que la connexion d'un site isolé au réseau électrique public coûte extrêmement cher, de l'ordre de 50000\$ pour l'acheminement de l'électricité sur 500 m. Il faut ajouter à cela le coût de l'énergie qui se situe aux alentours de 0.10\$ par kWh (d'après le site web de la STEG). Pour le moment, notre charge n'implique pas un coût exorbitant de l'énergie mais la disponibilité de l'énergie renouvelable perdue peut permettre de combler des besoins beaucoup plus importants qui peuvent aller de l'extension de notre système de dessalement d'eau à l'ajout d'autres charges comme une maison ou une usine. Dans ce cas, nous pourrions imaginer un avantage financier très important pour notre solution d'énergie renouvelable par rapport à l'énergie du réseau.

8.8. DISCUSSION

Le travail décrit dans ce chapitre a eu pour but de concevoir un projet pilote d'une petite station de désalinisation de l'eau saumâtre dans un site isolé alimentée aux énergies renouvelables solaire-photovoltaïque et éolienne. Notre projet se base sur des bases de données reconnues, donc le système doit être implanté dans un lieu qui se rapproche de ces données-là.

Notre projet pourrait enfin être adapté pour être réalisé en Tunisie. La région d'El Haouaria est reconnue pour son potentiel éolien qui a justifié la construction d'un parc éolien de 60 MW. Plusieurs études et communications scientifiques ont démontré le potentiel solaire d'autres régions en Tunisie. De plus, son potentiel solaire favorise la piste de l'intégration du photovoltaïque avec l'éolien dans le but de réaliser des systèmes 100% autonomes en électricité basés sur les énergies renouvelables, donc sur des énergies plus propres et plus écologiques.

La rentabilité économique de notre projet a été démontrée dans la dernière partie de ce chapitre. Nous pouvons tabler sur une réalité encore meilleure, car la chute des prix de l'énergie renouvelable est en train de s'accélérer. Cependant, cette même rentabilité est tributaire des habitudes de consommation d'énergie.

CHAPITRE 9

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de recherche de ce projet est de développer un concept de petite station de dessalement d'eau saumâtre, basée sur l'osmose inverse et alimentée en énergie propre par des panneaux photovoltaïques et des éoliennes [10, 74, 75]. Des modèles de chaque partie du système, illustrés dans la littérature et les données hydriques et climatiques du site de Haouaria en Tunisie, ont été utilisés pour créer un modèle du système entier et pour étudier son comportement et ses performances.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons procédé suivant les étapes suivantes :

- Nous avons constitué une base de connaissance relative aux techniques de dessalement de l'eau et à l'électrification des milieux isolés à partir de la littérature disponible.
- Nous avons élaboré un modèle scientifique simplifié du système de dessalement d'eau saumâtre par osmose inverse sur Matlab/Simulink qui nous a permis de caractériser le profil de consommation d'énergie de ce type de technologie
- Nous avons caractérisé le besoin énergétique d'un banc d'essai d'OI développé à l'UQAR en partenariat avec le milieu industriel (compagnie rimouskoise Puribec). Le besoin énergétique journalier pour notre système de dessalement d'eau était estimé à 7 kWh/jour d'où un besoin annuel de 2555 kWh.
- Nous avons étudié le système d'alimentation en énergies renouvelables en utilisant le logiciel de gestion d'énergies propres RETScreen pour extraire les données climatologiques et le logiciel de conception des projets d'énergies renouvelables HOMER. La première simulation HOMER nous a montré pour la configuration

‘éolienne + panneaux PV’ choisie une grande quantité d’énergie annuelle produite (15710 kWh), mais une demande d’énergie annuelle non satisfaite de 194 kWh. En revanche, nous avons noté que 84.2% de l’énergie produite par la configuration ‘éolienne + panneaux PV’ est perdue, et ce précisément, car la plupart du temps, l’énergie produite par l’éolienne et les panneaux solaires est supérieure à la demande instantanée d’énergie. Ainsi, une deuxième simulation a été étudiée avec la configuration éolienne-panneaux photovoltaïque-batteries.

- Finalement, la configuration retenue, car la plus performante était la suivante : une éolienne de type Bergey XL-6R+ 4 panneaux photovoltaïques de type Jinko solar 270 Wc + 8 batteries de type AGM Trojan 6V 390Ah. Avec cette configuration, nous pouvons garantir que notre système de dessalement d’eau sera fonctionnel pendant 6 h tous les jours de l’année dans un site isolé et d’une manière autonome, autrement dit, la batterie sera toujours déchargée par l’unité de dessalement d’eau, mais en même temps chargée par les panneaux solaires et l’éolienne.

Ce travail nous a permis d’élaborer les recommandations suivantes reproductibles pour des cas similaires à celui de la ville d’El Haouaria : nous recommandons l’implantation de l’éolienne à 30 m au-dessus du sol. Ce choix favoriserait l’écoulement unidirectionnel du vent et réduirait les perturbations. Une autre solution serait de trouver un couloir entre deux monts qui serait disposé dans la direction des vents dominants. Implanter l’éolienne dans un tel lieu favoriserait la captation de vents bien dirigés et accélérés par la nature du lieu. Et puis, pour tirer le maximum profit de l’énergie photovoltaïque, il faut favoriser la production en été et minimiser la production en hiver (pour limiter l’excès de production), orienter suivant l’azimut de l’été à 0 degré, et suivant l’inclinaison des panneaux à 37 degrés par rapport à l’horizontale.

Enfin, nous avons dressé un bilan financier positif de la solution étudiée. Outre le coût qui peut être considéré raisonnable en comparaison d’une solution basée sur l’extension du réseau électrique public, nous avons conclu que l’avantage financier de cette solution d’électrification par l’énergie renouvelable était encore plus significatif et plus

évident dans le cas d'une augmentation du besoin énergétique, soit par l'augmentation de la capacité en dessalement d'eau, soit par l'ajout de nouvelles charges électriques au système étudié.

ANNEXES

I. Équivalents unitaires et conversions

Paramètre	Valeur	Valeur équivalente
Masse	1 lb _m	=453.593 g = 0.453593 kg
Longueur	1 pied	=0.3048 m = 30.38 cm
Volume	1 pieds ³	=7.4805 gal = 28.317 l = 0.028317 m ³
Pression	1 psig	=0.06895 bar = 6895 Pa
Puissance	1 hp	=754 watts
Débit	1 GPJ	=0.58865 l/m ² h = 0.0005887m/h
Température	1 °F	= °C*1.8+32

Conversion :

$$\text{m}^3/\text{s} \leftrightarrow \text{gal (US)}/\text{min} \quad \frac{1 \text{ m}^3}{\text{s}} = \frac{60 \text{ min} \cdot 1000 \text{ L}}{3.78542 \text{ G}} = 15850.32314 \text{ gal (US)}/\text{min}$$

Pour obtenir le débit en GPM, nous multiplions la valeur "volume / temps" par 15850,32314.

$$\text{Psi} \leftrightarrow \text{N}/\text{m}^2 \quad 1 \text{ psi} = 6894.757 \text{ Pa}, \quad 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$


Pour obtenir la pression en N/m², nous multiplions la valeur "pression" par 6894.757.

$$1 \text{ gallon} = 3.78541 \text{ L}$$


$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$$

II. La membrane FILMTEC XLE-4040

La fiche technique de la membrane FILMTEC XLE-4040, téléchargée à partir du site internet du constructeur, est la suivante :



Product Information



info@lenntech.com Tel. +31-152-610-900
www.lenntech.com Fax. +31-152-616-289

FILMTEC™ XLE-4040 Membranes

FILMTEC Tape-Wrapped 4040 Elements for Commercial Applications

Features

A complete range of FILMTEC™ 4040-size elements is available to meet a wide variety of customer needs for commercial applications, from the highest purity water to the lowest total system costs.

- FILMTEC XLE-4040 is the most productive, lowest pressure RO membrane available, delivering the lowest total system cost.
- FILMTEC LP-4040 delivers high quality water at low pressure operation. LP-4040 replaces many "first generation" low pressure membrane elements and will purify more water in many older systems, especially on cold water feeds.
- FILMTEC TW30-4040 is the industry standard for reliable operation and production of the highest quality water.

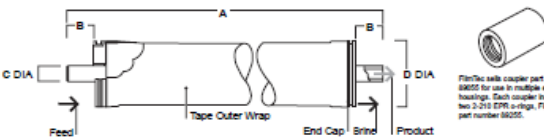
Tape-wrapped elements are built with the same high quality membranes and materials of construction as industrial elements, except for the hard outershell, and are more economical for commercial systems with one or two elements per housing.

Product Specifications

Product	Part number	Active Area ft ² (m ²)	Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flow Rate gpd (m ³ /d)	Stabilized Salt Rejection (%)
XLE-4040	154546	87 (8.1)	28	2,600 (9.8)	99.0
LP-4040	212819	78 (7.2)	34	2,900 (11.0)	99.2
TW30-4040	80610	78 (7.2)	34	2,400 (9.1)	99.5

- Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 77°F (25°C), 15% recovery and applied pressure: 100 psig (6.9 bar) for XLE-4040, 145 psig (10 bar) for LP-4040 and 225 psig (15.5 bar) for TW30-4040. FILMTEC TW30-4040 specifications are based on a 2,000 ppm NaCl feed stream. FILMTEC LP-4040 and FILMTEC XLE-4040 specifications are based on a 500 ppm NaCl feed stream.
- Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.
- For the purpose of improvement, specifications may be updated periodically.

Figure 1



FilmTec seals coupler part number 88255 for use in multiple element housings. Each coupler includes two 2.215 ODN o-rings. FilmTec part number 88255.

Dimensions – Inches (mm)

Product	A	B	C	D
XLE-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
LP-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
TW30-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)

1. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element systems. 1 inch = 25.4 mm

2. FILMTEC TW30-4040, FILMTEC LP-4040 and FILMTEC XLE-4040 elements fit nominal 4-inch I.D. pressure vessel.

Page 1 of 2

™ Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow

Form No. 609-00364-0408

Operating Limits

• Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
• Maximum Operating Temperature	113°F (45°C)
• Maximum Operating Pressure	600 psig (41 bar)
• Maximum Feed Flow Rate	14 gpm (3.2 m ³ /hr)
• Maximum Pressure Drop	13 psig (0.9 bar)
• pH Range, Continuous Operation ^a	2 - 11
• pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) ^b	1 - 13
• Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
• Free Chlorine Tolerance ^c	<0.1 ppm

^a Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

^b Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.

^c Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, FilmTec recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-23010 for more information.

Important Information

Proper start-up of reverse osmosis water treatment systems is essential to prepare the membranes for operating service and to prevent membrane damage due to overfeeding or hydraulic shock. Following the proper start-up sequence also helps ensure that system operating parameters conform to design specifications so that system water quality and productivity goals can be achieved.

Before initiating system start-up procedures, membrane pretreatment, loading of the membrane elements, instrument calibration and other system checks should be completed.

Please refer to the application information literature entitled "Start-Up Sequence" (Form No. 609-02077) for more information.

Operation Guidelines

Avoid any abrupt pressure or cross-flow variations on the spiral elements during start-up, shutdown, cleaning or other sequences to prevent possible membrane damage. During start-up, a gradual change from a standstill to operating state is recommended as follows:

- Feed pressure should be increased gradually over a 30-60 second time frame.
- Cross-flow velocity at set operating point should be achieved gradually over 15-20 seconds.
- Permeate obtained from first hour of operation should be discarded.

General Information

- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- If operating limits and guidelines given in this bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void.
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution.
- The customer is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements.
- Maximum pressure drop across an entire pressure vessel (housing) is 30 psi (2.1 bar).
- Avoid static permeate-side backpressure at all times.

Regulatory Note

These membranes may be subject to drinking water application restrictions in some countries; please check the application status before use and sale.

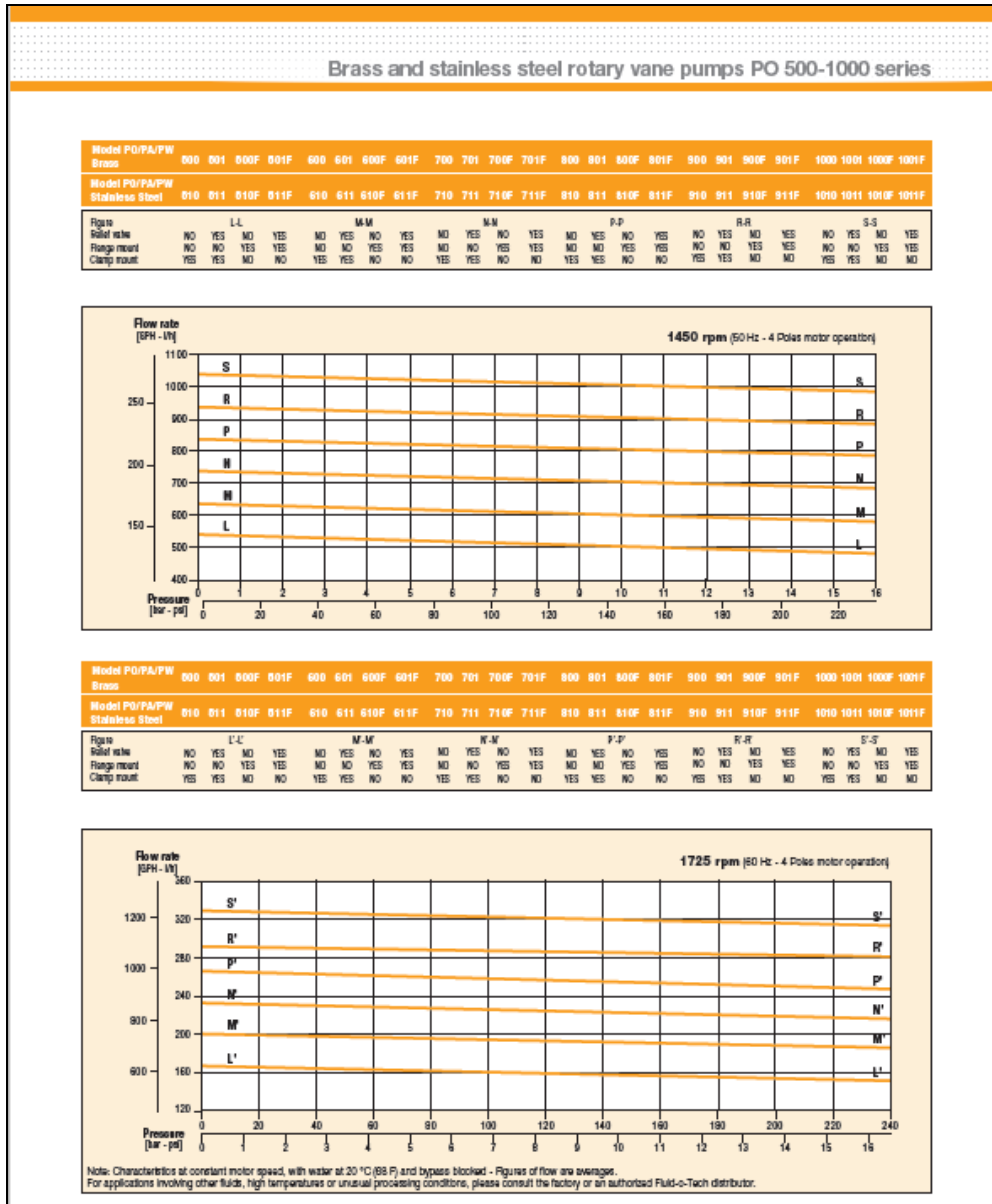
Notice: The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

Notice: No freedom from any patent owned by Seller or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Seller assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



III. Pompe à haute pression

L'annexe III affiche la fiche technique d'un exemple donné d'une pompe à haute pression extraite à partir d'un catalogue disponible pour téléchargement sur le site internet du fournisseur :



IV. Pompe pour l'arrivée d'eau

L'annexe IV affiche la fiche technique d'un exemple d'une pompe d'entrée de l'eau extraite d'un catalogue disponible pour téléchargement sur le site internet du fournisseur :


POMPES À JET CONVERTIBLES PREMIUM EN FONTE


APPLICATIONS

Idéales pour l'approvisionnement en eau douce des maisons rurales, fermes et chalets, disposant d'une capacité d'aspiration jusqu'à une hauteur de 27,4 m (90 pi).

CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

- Pompe à jet convertible avec injecteur pour puits profonds idéale pour les applications de puits peu profonds (moins de 7,6 m (25 pi)) ainsi que les puits profonds (entre 7,6 et 27,4 m (25 et 90 pi))
- Bottier en fonte robuste pour des années de service et de fiabilité
- Moteur de qualité supérieure, robuste et bitension (115/230) bobinages en cuivre pour garantir une haute efficacité et une durée de vie fiable du moteur
- Inclut un pressostat de 30 à 50 PSI préréglé en usine jproduit jusqu'à 50 PSI avec arrêt automatique
- Impulseur et diffuseur en thermoplastique armé de verre pour un débit d'eau efficace et un rendement élevé



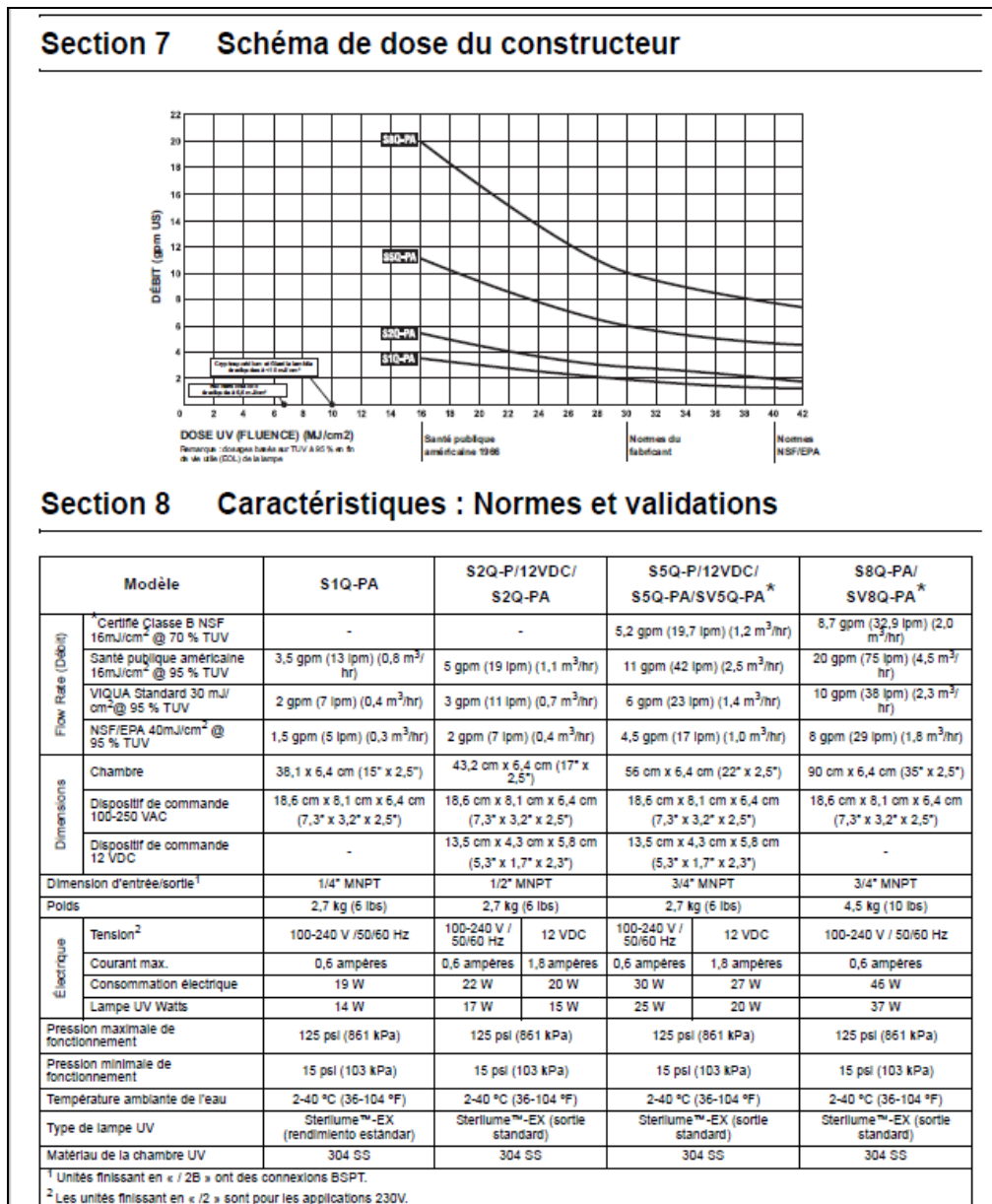


Modèle	Numéro d'article	UPC	HP	V	A	Prise	Refolement	Nombre de tuyaux	Hauteur d'aspiration	Pression de refolement				Pression max. PSI	Charge hydr. max.	Debit max. GPM
										30	40	50	60			
											Gallons par minute					
RJC-50-PREM	602136	0 10121 15110 9	1/2	115/230	14,4 A à 115 V 7,2 A à 230 V	1,25 po FNPT	1 po FNPT	1	5 pi	14,2	10,2	5,9	1,8	64	149 pi	14,2
								1	15 pi	13,5	9,1	4,4	-	60	139 pi	
								2	25 pi	9,6	7,4	2,4	-	56	129 pi	
								2	30 pi	5,8	3,7	1,8	0,2	62	143 pi	
								2	60 pi	4,3	2,7	1,4	0,3	63	146 pi	
								2	90 pi	1,6	0,7	0,1	-	51	119 pi	
RJC-75-PREM	602137	0 10121 15111 6	3/4	115/230	17,6 A à 115 V 8,8 A à 230 V	1,25 po FNPT	1 po FNPT	1	5 pi	16,2	12,2	8	3,7	68	158 pi	16,2
								1	15 pi	14,3	10,6	6,1	1,3	64	147 pi	
								2	25 pi	9,8	8,9	4,7	-	61	141 pi	
								2	30 pi	7,2	4,8	2,8	1,2	69	159 pi	
								2	60 pi	5,4	3,7	2,2	1,1	73	169 pi	
								2	90 pi	2,2	1,3	0,4	-	58	133 pi	
RJC-100	602038	0 10121 12284 0	1	115/230	16,4 A à 115 V 8,2 A à 230 V	1,25 po FNPT	1 po FNPT	1	5 pi	19,9	16,7	11,1	5,6	71	164 pi	20*
								1	15 pi	14,1	13,6	8,7	3,3	67	154 pi	
								2	20 pi	10,5	7,3	5,2	3	87	201 pi	
								2	50 pi	7,2	5	3,4	1,9	74	171 pi	
								2	90 pi	3,4	1,9	0,7	-	57	131 pi	

* à 20 PSI

V. Lampe UV

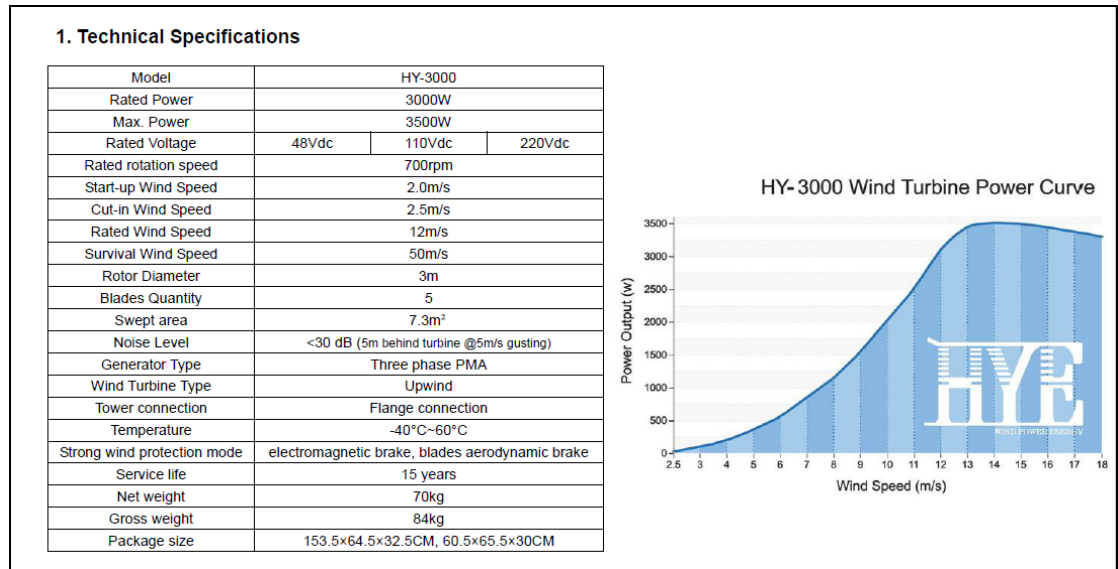
L'annexe V affiche la fiche technique d'un exemple donné d'une lampe UV extraite à partir d'un catalogue disponible pour téléchargement sur le site internet du fournisseur :



VI. Manuels techniques des éoliennes

Voici les spécifications techniques extraites des manuels techniques des 4 éoliennes étudiées téléchargés à partir du site internet de chaque constructeur :

1. HY-3000



2. BERGUEY EXCEL 1

9. Specifications

EXCEL 1 TURBINE:

	Metric	Imperial
ROTOR DIAMETER	2.5 m	8.2 ft.
OVERALL LENGTH	2.1 m	6.9 ft.
TURBINE WEIGHT	34 kg	75 lbs.
TURBINE THRUST	890 N	200 lbs.
RATED POWER	1,000 W	
RATED WINDSPEED	11 m/s	24.6 mph
RATED ROTOR SPEED	490 rpm	
START-UP WINDSPEED	3 m/s	6.7 mph
CUT-IN WINDSPEED	2.5 m/s	5.6 mph
FURLING WINDSPEED	13 m/s	29 mph
MAX DESIGN WINDSPEED	54 m/s	120 mph
MAX RUNNING CURRENT	11 Amps AC	

3. BWC EXCEL

2. SYSTEM OPERATION

A. NORMAL OPERATION

The rotor of the BWC EXCEL should begin to rotate when the wind speed reaches approximately 3.6 m/s (8 mph). Battery charging should commence shortly after the rotor spins up to speed, but this may vary with battery state of charge. Once turning, the rotor may continue to turn in winds below 3.6 m/s (8 mph), but the system will probably not be charging the batteries.

NOTE

All operational wind speeds given assume steady winds, sea-level conditions and moderate temperatures. Hot weather, high altitude, turbulence and gusting winds will reduce system performance.

The rotor speed will increase with increasing wind speed and the system will produce a higher output. This output increases rapidly because the energy available in the wind varies as the third power (cube) of the wind speed. For example, if the wind speed increased from 5 m/s to 10 m/s, a factor of two, the energy in the wind would increase from one unit to eight units, a factor eight (2 to the third power equals 8). One result of this relationship is that there is very little energy available in light winds. For the average site, winds in the range of 5.5 - 9m/s (12-20 mph) will provide most of the system's energy production.

Lower Peak Power: To obtain optimum output from a permanent magnet alternator its output voltage must rise as its speed increases. In a battery charging application, however, the output voltage is constrained over a narrow range by the battery bank. Without sophisticated power electronics in the system the performance of the wind turbine can be optimized for low wind conditions or high wind conditions, but not both. The BWC EXCEL-R is optimized for low wind performance and, therefore, the peak output power is sacrificed. Depending upon the specific voltage and configuration, the BWC EXCEL-R can be expected to have a peak power output between 7 and 8.5 kW.

4. BERGUEY EXCEL 10

Owner's Manual

Bergey EXCEL 10 Turbine

2. SYSTEM OPERATION

A. NORMAL OPERATION

The Bergey EXCEL 10 produces utility compatible power in the form of 240VAC, 60 Hz, single phase electricity (208 VAC/60Hz and 220 VAC/50 Hz options are available). It is connected through the Powersync II inverter to the utility distribution network in the same manner as household appliances. When the wind speed is too low to operate the wind turbine, all of the electrical power needed for the home will be supplied by the utility company. During these idle periods the Powersync II will consume approximately 0.3 kilowatt-hours of electricity per day.

When the system begins producing power, the amount of power which must be purchased from the utility is reduced by an amount equal to the output of the wind system. From the perspective of the utility company the wind system output reduces the electrical load they have to supply, just as if you turned off lights and appliances. The output of the wind system fluctuates with the speed of the wind so the instantaneous amount of electricity being saved will be constantly changing. Quite often your home will be served simultaneously by the utility and your Bergey wind turbine.

When the output of the wind system exceeds the power requirements of the house the excess electricity is sold back to the utility. Both the consumer's right to interconnect a wind system and the utilities obligation to purchase excess power are prescribed by federal law (PURPA, Section 210). The amount you will be credited or paid for this excess production varies state-to-state and sometimes utility-to-utility. If your utility company offers "net metering" then your meter is allowed to turn backwards so that you essentially bank energy, at full value, for less windy periods. This banking can be done over a month or over a year depending on the policy of your state or your utility. If you do not get "net metering" then you will have a second utility meter to register excess production and your utility will pay or credit you for this, typically at less than full value.

If your utility experiences an outage (blackout) the wind system will cease to produce power so that it does not present an electrical safety hazard to utility repair crews. Although the wind turbine will continue to operate, no power will be transferred from the Powersync II inverter to your circuit breaker panel. When utility power is restored, the Powersync II will automatically return the wind system to full working status following a five minute delay and then a two minute countdown. These time delays are dictated in the UL standards required by the utilities.

The rotor of the EXCEL 10 should begin to rotate when the wind speed reaches approximately 8 mph (3.6 m/s). Once started, the rotor may continue to turn in winds below 5 mph (2.2 m/s), but the system will not be producing power below this wind speed.

VII. Fiche technique du panneau photovoltaïque Jinko Solar JKM275P-60-A

L'annexe VII affiche la fiche technique du type de panneau PV utilisé Jinko Solar téléchargée à partir du site internet du constructeur :

Engineering Drawings

Electrical Performance & Temperature Dependence

Current-Voltage & Power-Voltage Curves (255W)

Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax

Packaging Configuration

(Two boxes=One pallet)
25pcs/ box, 50pcs/pallet, 700 pcs/40'HQ Container

Mechanical Characteristics

Cell Type	Poly-crystalline 156×156mm (6 inch)
No. of cells	60 (6×10)
Dimensions	1650×992×40mm (65.00×39.05×1.57 inch)
Weight	19.0 kg (41.9 lbs)
Front Glass	3.2mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² , Length:1200mm

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM255P		JKM260P		JKM265P		JKM270P		JKM275P	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	255Wp	189 Wp	260Wp	193Wp	265Wp	197Wp	270Wp	200Wp	275Wp	204Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	30.8V	28.5V	31.1V	28.7V	31.4V	29.0V	31.7V	29.4V	32.0V	29.8V
Maximum Power Current (Imp)	8.28A	6.63A	8.37A	6.71A	8.44A	6.78A	8.52A	6.80A	8.61A	6.85A
Open-circuit Voltage (Voc)	38.0V	35.2V	38.1V	35.2V	38.6V	35.3V	38.8V	35.4V	39.1V	35.4V
Short-circuit Current (Isc)	8.92A	7.26A	8.98A	7.31A	9.03A	7.36A	9.09A	7.38A	9.15A	7.44A
Module Efficiency STC (%)	15.57%		15.88%		16.19%		16.50%		16.80%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	15A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.41%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.31%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.06%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5

NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

Please send your enquiries to Australiasales@jinkosolar.com
The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. AU-JKM-275P-60-A_V1.0_rev2016

VIII. Caractéristiques techniques de l'onduleur Schneider 4 kW 40-48


L'annexe VIII affiche la fiche technique de l'onduleur utilisée dans notre étude extraite du site internet du constructeur Schneider et disponible pour téléchargement :

Caractéristiques techniques de l'onduleur			
REMARQUE : toutes les caractéristiques techniques de l'onduleur correspondent aux caractéristiques observées dans les conditions nominales : température ambiante de 77 °F (25 °C), phase auxiliaire 120/240 VCA, 60 Hz, sauf indication contraire			
Sortie CA	SW 2524 120/ 240 phase auxiliaire	SW 4024 120/ 240 phase auxiliaire	SW 4048 120/ 240 phase auxiliaire
Onde sinusoïdale de sortie	onde sinusoïdale pure	onde sinusoïdale pure	onde sinusoïdale pure
Puissance de sortie continue (CA) - maximum - 30 minutes	3 000 W ^a 3 300 W ^b	3 400 W 4 000 W ^c	3 800 W ^a 4 400 W ^a
Chargement maximale puissance sur une phase unique (L1/N ou L2/N)	1 800 W	2 550 W	2 700 W
Puissance de sortie continue maximale	12,5 A	15 A	15,2 A
Surtension nominale (5 secondes)	5 000 W ^d	7 000 W ^e	7 000 W
Courant de sortie de crête de l'onduleur	24,3 A	41 A	41 A
Connexion de SORTIE CA	phase auxiliaire(L1, L2)	phase auxiliaire(L1, L2)	phase auxiliaire(L1, L2)
Rendement de crête	91,5 %	92 %	98 %
Facteur de puissance de sortie (capacitive ou inductive)	0,6 - 1,0	0,6 - 1,0	0,6 - 1,0
Plage de tension de fonctionnement monophasé/phase auxiliaire	104/208 VCA to 127/254 VCA	104/208 VCA to 127/254 VCA	104/208 VCA to 127/254 VCA
Tension nominale	120/240 VCA	120/240 VCA	120/240 VCA
Plage de fréquences de fonctionnement	sélectionnable 50 ou 60 Hz	sélectionnable 50 ou 60 Hz	sélectionnable 50 ou 60 Hz
Fréquence de sortie par défaut	60 Hz	60 Hz	60 Hz

a. Lorsque NoLoadVD est activé.
b. Cycle de service 3 300 W pendant 30 minutes, 0 W pendant 45 minutes, NoLoadVD est activé.
c. Cycle de service 4 000 W pendant 30 minutes, 0 W pendant 45 minutes.
d. Cycle de service 5 000 W pendant 5 secondes, 3 000 W pendant 300 secondes.
e. Cycle de service 7 000 W pendant 5 secondes, 3 400 W pendant 300 secondes.

IX. Caractéristiques techniques des batteries Trojan 6V 390 Ah

L'annexe IX affiche la fiche technique des batteries utilisées dans cette étude téléchargée à partir du site internet du constructeur :



DATA SHEET

L16G-AC

MODEL L16G-AC with Bayonet Cap
VOLTAGE 6
MATERIAL Polypropylene
DIMENSIONS Inches (mm)
BATTERY Deep-Cycle Flooded/Wet Lead-Acid Battery
COLOR Maroon
WATERING HydroLink™ Watering System



6V

PRODUCT + PHYSICAL SPECIFICATIONS

BCI Group Size	Type	Voltage	Cell(s)	Terminal type ⁶	Dimensions ⁴ Inches (mm)			Weight Lbs. (kg)
					Length	Width	Height ⁵	
903	L16G-AC	6	3	7	12.14 (308)	6.85 (174)	16.41 (417)	101 (46)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Cranking Performance		Capacity ⁸ Minutes		Capacity ⁸ Amp-Hours (AH)				Energy (kWh)	Internal Resistance (mΩ)	Short Circuit Current (amps)
CCA ⁹ @ 0°F (-18°C)	CA ³ @ 32°F (0°C)	@ 25 Amps	@ 75 Amps	5-Hr	10-Hr	20-Hr	100-Hr	100-Hr		
—	—	789	200	320	359	390	433	2.60	—	—

CHARGING INSTRUCTIONS

Charger Voltage Settings (at 77°F/25°C)					
System Voltage	6V	12V	24V	36V	48V
Bulk Charge	7.41	14.82	29.64	44.46	59.28
Float Charge	6.75	13.50	27.00	40.50	54.00
Equalize Charge	8.10	16.20	32.40	48.60	64.80

Do not install or charge batteries in a sealed or non-ventilated compartment. Constant under or overcharging will damage the battery and shorten its life as with any battery.

CHARGING TEMPERATURE COMPENSATION




Add	Subtract
0.005 volt per cell for every 1°C below 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F below 77°F	0.005 volt per cell for every 1°C above 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F above 77°F

STATE OF CHARGE MEASURE OF OPEN-CIRCUIT VOLTAGE



Percentage Charge	Specific Gravity	Cell	6 Volt
100	1.277	2.122	6.37
90	1.258	2.103	6.31
80	1.238	2.083	6.25
70	1.217	2.062	6.19
60	1.195	2.040	6.12
50	1.172	2.017	6.05
40	1.148	1.993	5.98
30	1.124	1.969	5.91
20	1.098	1.943	5.83
10	1.073	1.918	5.75

OPERATIONAL DATA

Operating Temperature	Self Discharge
-4°F to 113°F (-20°C to +45°C). At temperatures below 32°F (0°C) maintain a state of charge greater than 60%.	5 – 15% per month depending on storage temperature conditions.

Designed in compliance with applicable BCI, DIN, BS and IEC standards.
 Tested in compliance to BCI and IEC standards.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. K. W. Chih Ted Yang 1, *Advances in Water Resources Engineering*. Springer International Publishing Switzerland 2015: Springer, Cham, 2015.
- [2] s. a. Degrémont, *Mémento technique de l'eau*. Reuil-Malmaison, France, 1989, p. 1578.
- [3] (2004). *Directives de qualité pour l'eau de boisson. Vol. 1 : 3e éd. .*
- [4] M. Overman, *L'eau dans le monde Problèmes et solutions* (Collections techniques d'aujourd'hui). 17 rue du Montparnasse, Paris VIe: Librairie Larousse (Canada), 1970.
- [5] S. Fang, W. Tu, L. Mu, Z. Sun, Q. Hu, and Y. Yang, "Saline alkali water desalination project in Southern Xinjiang of China: A review of desalination planning, desalination schemes and economic analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109268, 2019/10/01/ 2019.
- [6] J. E. MILLER, "Review of Water Resources and Desalination Technologies, report, March 1, 2003; Albuquerque, New Mexico. (<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc737585/>: accessed July 8, 2019), University of North Texas Libraries, ," no. Digital Library, <https://digital.library.unt.edu>; crediting UNT Libraries Government Documents Department. , 2003.
- [7] M. L. Francis Gassert, Research Scientist, ISciences LLC and Matt Landis Research Scientist, ISciences LLC. (2015) Aqueduct Water Stress Projections: Decadal Projections of Water Supply and Demand Using CMIP5 GCMs. *Word Ressources Institute*. 20.
- [8] U. Caldera, D. Bogdanov, and C. Breyer, "Local cost of seawater RO desalination based on solar PV and wind energy: A global estimate," *Desalination*, vol. 385, pp. 207-216, 2016/05/02/ 2016.
- [9] L. C. Farzaneh Roudi-Fahimi, and Roger-Mark De Souza, "FINDING THE BALANCE: Population and Water Scarcity in the Middle East and North Africa," *1875 Connecticut Ave., NW, Suite 520, Washington, DC 20009 USA*, 2002.
- [10] A. Gotor, I. D. I. N. Pestana, and C. A. Espinoza, "Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies," *Desalination*, vol. 156, no. 1, p. 351, 2003/08/01/ 2003.
- [11] M. Asayesh, A. Kasaeian, and A. Ataei, "Optimization of a combined solar chimney for desalination and power generation," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 72-80, 2017/10/15/ 2017.
- [12] S. Saad, *Les ressources en eau de la Tunisie*. Tunisie, 2015.

- [13] (2009). *Etude d'impact sur l'environnement de la 3ème tranche de la centrale éolienne de Sidi Daoud*.
- [14] (2016). *Les ressources en eaux souterraines de la plaine de Haouaria, Tunisie*. .
- [15] F. B. A. Imen Jarraya, Mustapha Elamouri, Rachid Dhifaoui, "Choix des systèmes éoliens appropriés pour les sites tunisiens," in *International Renewable Energy Congress*, Tunisie, 2010.
- [16] A. Al-Karaghoul and L. L. Kazmerski, "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 343-356, 2013/08/01/ 2013.
- [17] A. Maurel, *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres: Et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*. Tec & Doc Lavoisier, 2006.
- [18] C. Mata-Torres, A. Zurita, J. M. Cardemil, and R. A. Escobar, "Exergy cost and thermoeconomic analysis of a Rankine Cycle + Multi-Effect Distillation plant considering time-varying conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 192, pp. 114-132, 2019/07/15/ 2019.
- [19] C. Hanshik, H. Jeong, K.-W. Jeong, and S.-H. Choi, "Improved productivity of the MSF (multi-stage flashing) desalination plant by increasing the TBT (top brine temperature)," *Energy*, vol. 107, pp. 683-692, 2016/07/15/ 2016.
- [20] P. B. Feraud, "Le dessalement de l'eau de mer - une solution a faible consommation d'énergie: ia compression de vapeur. ," *Desalination*, vol. 30, no. Elsevier scientific Publishing Compagny, Amesterdam - Printed un the Netherlands, p. 14, 1979.
- [21] H. M. N. AlMadani, "Water desalination by solar powered electro dialysis process," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 12, pp. 1915-1924, 2003/10/01/ 2003.
- [22] M. A. Abdelkareem, M. El Haj Assad, E. T. Sayed, and B. Soudan, "Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants," *Desalination*, vol. 435, pp. 97-113, 2018/06/01/ 2018.
- [23] F. E. Ahmed, R. Hashaikeh, and N. Hilal, "Solar powered desalination – Technology, energy and future outlook," *Desalination*, vol. 453, pp. 54-76, 2019/03/01/ 2019.
- [24] V. Belessiotis and E. Delyannis, "The history of renewable energies for water desalination," *Desalination*, vol. 128, no. 2, pp. 147-159, 2000/04/15/ 2000.
- [25] M. Henmi, Y. Fusaoka, H. Tomioka, and M. Kurihara, "High performance RO membranes for desalination and wastewater reclamation and their operation results," *Water Science and Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 2134-2140, 2010.
- [26] J. Kucera, *Reverse Osmosis: Industrial applications and processes*. United States of America: Scrivener, 2010.
- [27] D. W. solutions, "FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes, Technical manual," ed, 2011.
- [28] F. R. Georges DAUFIN, Pierre AIMAR, *Les Séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire*. 11, rue Lavoisier-F 75384 Paris cedex 08: Lavoisier TEC7DOC, 1998, p. 592.

- [29] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, and P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges," *Water Research*, vol. 43, no. 9, pp. 2317-2348, 2009/05/01/ 2009.
- [30] A. Maurel, "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres," *Tec et Doc - Lavoisier*, p. 286, 2006 (2ème édition).
- [31] H.-J. Oh, T.-M. Hwang, and S. Lee, "A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination," *Desalination*, vol. 238, no. 1, pp. 128-139, 2009/03/01/ 2009.
- [32] W. Rohlf, G. P. Thiel, and J. H. Lienhard V, "Modeling reverse osmosis element design using superposition and an analogy to convective heat transfer," *Journal of Membrane Science*, vol. 512, pp. 38-49, 2016/08/15/ 2016.
- [33] M. Li, "Reducing specific energy consumption in Reverse Osmosis (RO) water desalination: An analysis from first principles," *Desalination*, vol. 276, no. 1, pp. 128-135, 2011/08/02/ 2011.
- [34] H. M. E. a. A. C. Lucio Rizzuti, Ed. "Solar Desalination for the 21th century." P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands.: Springer, 2007, p. 391.
- [35] R. W. Baker, *Membrane Technology and Applications*. Wiley, 2012.
- [36] J. G. Wijmans and R. W. Baker, "The solution-diffusion model: a review," *Journal of Membrane Science*, vol. 107, no. 1, pp. 1-21, 1995/11/15/ 1995.
- [37] D. R. Paul, "Reformulation of the solution-diffusion theory of reverse osmosis," *Journal of Membrane Science*, vol. 241, no. 2, pp. 371-386, 2004/10/01/ 2004.
- [38] J. P. BRUN, *Procédés de séparation par membranes*. Paris Milan Barcelona Mexico, 1989.
- [39] D. Mentis *et al.*, "Desalination using renewable energy sources on the arid islands of South Aegean Sea," *Energy*, vol. 94, pp. 262-272, 2016/01/01/ 2016.
- [40] M. d. R. a. C. N. R. S. Roger Peyturaux, *L'ÉNERGIE SOLAIRE*. 108, Boulevard Saint-Germain, Paris: Presses universitaires de France, 1968.
- [41] G. M. e. M. S. Roger Bernard, *Le rayonnement solaire conversion thermique et applications*. 11, rue Lavoisier, 75008 PARIS, 1980, p. 255.
- [42] H. Shawky, A. A. Abdel Fatah, M. M Abo Alfadl, and A.-H. M. El-Aassar, *Design of a small mobile PV driven RO water desalination plant to be deployed at the north west coast of Egypt*. 2014.
- [43] N. C. Wright and A. G. Winter, "Justification for community-scale photovoltaic-powered electro dialysis desalination systems for inland rural villages in India," *Desalination*, vol. 352, pp. 82-91, 2014/11/03/ 2014.
- [44] A. Ilinca, "Cours Énergies Rnouvelables: Chapitre 1: Énergie Photovoltaïque," Université du Québec à Rimouski (UQAR), 2018.
- [45] M. Thomson and D. Infield, "Laboratory demonstration of a photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries," *Desalination*, vol. 183, no. 1, pp. 105-111, 2005/11/01/ 2005.
- [46] U. o. N. S. W. U. Martin A. Green: ARC Photovoltaics Centre of Excellence, Sydney, NSW 2052, Australia, "The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution," *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, 2009.

- [47] P. Gandhidasan and S. A. Al-Mojel, "Effect of feed pressure on the performance of the photovoltaic powered reverse osmosis seawater desalination system," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2824-2830, 2009/12/01/ 2009.
- [48] J. Bernard, *Génie énergétique, Énergie Solaire: calcul et optimisation* (TECHNOSUP). France: Ellipses 2004.
- [49] J. G. M. a. A. L. R. J.F. Manwell, *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [50] J.-M. PAGES, *M A N U E L PRÉLIMINAIRE DE L'ÉTUDE D'IMPACT DES PARCS ÉOLIENS*. 2000.
- [51] I. A. Beaudoin Pierre, Louis Jean, "Évaluation des impacts environnementaux des projets éoliens," 2009.
- [52] J. L. A. Ilinca, "Le petit éolien," presented at the Complément en énergie éolienne, Université du Québec à Rimouski (UQAR), 2010.
- [53] D. Guerette, "Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration," *Maîtrise en Sciences Appliqués (M.Sc.A.)*, Université du Québec à Rimouski (UQAR), Rimouski (QC), Canada, Order No. MR81241, 2010.
- [54] I. VECHI, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome," Thèse de doctorat, Université du Havre, France, 2005.
- [55] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems—Characteristics and comparisons," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1221-1250, 2008/06/01/ 2008.
- [56] M. Götz *et al.*, "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371-1390, 2016/01/01/ 2016.
- [57] K. Touati, E. Alia, H. Zendah, H. Elfil, and A. Hannachi, "Sand filters scaling by calcium carbonate precipitation during groundwater reverse osmosis desalination," *Desalination*, vol. 430, pp. 24-32, 2018/03/15/ 2018.
- [58] Konrad-Adenauer-Stiftung, "LA MEDITERRANEE FACE A LA RAREFACTION DES RESSOURCES EN EAU," Tunis, 2017.
- [59] J. C. N. D. H. F. Charles M. Close, "Modeling and analysis of dynamic systems. Third Edition," 2002.
- [60] J. S. Deschênes, "Cours 3 CI H12," Université du Québec à Rimouski (UQAR), 2019.
- [61] C. M. C. D. K. F. J. C. Newell, "Modeling and Analysis of Dynamic Systems," pp. pp 396-408, 2012.
- [62] A. M. Gilau and M. J. Small, "Designing cost-effective seawater reverse osmosis system under optimal energy options," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 617-630, 2008/04/01/ 2008.
- [63] C. I. René Husson, Jean François Aubry, Jamal Daafouz Didier Wolf, *Automatique Du cahier des charges à la réalisation de systèmes*. Paris, 2007.
- [64] H. B. A. B. Multron, "Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ?," *Revue 3E.I.*, vol. n°48,, pp. 18-29, 2007.

- [65] R. Y. H. Ibrahim, A. Ilinca, "Optimal Conception of a Hybrid Generator of Electricity," presented at the Reference Number : CANCAM07-ETS-39, le 21^{ème} congrès canadien de mécanique appliquée, Toronto, Canada, 2007.
- [66] W. E. Fahem, "Alimentation en électricité d'une station de télécommunication avec un système hybride avec stockage d'air comprimé," in *Mémoire de projet de fin d'études*, I. N. d. S. A. e. d. T. (INSAT), Ed., ed. Tunisie, 2009.
- [67] (Consulté en 2019/12/10). *Le mode des accus* : www.ni-cd.net/.
- [68] J. S. H. Faïda, M. Khaïder, S. El Alami et M. Monkade, "Etude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne. Cas d'un site au nord du Maroc.," *Revue des Energies Renouvelables* vol. Vol. 13 N°3 477 – 483, 2010.
- [69] S. K. e. K. Agbossou, "Nonlinear model identification of wind turbine with a neural network," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. vol. 19, n°3, pp. 607- 612, 2004.
- [70] R. C. M. Jacob, "Etude éolienne de préfaisabilité – Base de Jubany," Aout 2009.
- [71] (Consulté en 2019/12/07). <http://bergey.com/>.
- [72] (2004). *Éoliennes en milieu urbain - État de l'art*.
- [73] E. Koutroulis and D. Kolokotsa, "Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources," *Desalination*, vol. 258, no. 1, pp. 171-181, 2010/08/01/ 2010.
- [74] W. Hickman, A. Muzhikyan, and A. M. Farid, "The synergistic role of renewable energy integration into the unit commitment of the energy water nexus," *Renewable Energy*, vol. 108, pp. 220-229, 2017/08/01/ 2017.
- [75] N. Ghaffour, J. Bundschuh, H. Mahmoudi, and M. F. A. Goosen, "Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems," *Desalination*, vol. 356, pp. 94-114, 2015/01/15/ 2015.