

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider - Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département: Genie Electrique  
Réf : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم : الهندسة الكهربائية  
المرجع : .....

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du Diplôme de

**Doctorat en sciences**

Spécialité (Option) : ELECTROTECHNIQUE

**Commande et Optimisation D'un Système de Dessalement Hybride :  
Solaire-Eolien**

Présentée par : CHARROUF Omar

Soutenue publiquement le : 02/07/2018

**Devant le jury composé de**

<b>Dr Ghamri Ahmed</b>	<b>Maitre de Conférences A</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr Betka Achour</b>	<b>Professeur</b>	<b>Directeur de Thèse</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr Goléa Amar</b>	<b>Professeur</b>	<b>Co-Directeur de thèse</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr Drid Said</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna2</b>
<b>Dr Maakouf Abdesselem</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna2</b>

## *Remerciements*

*Tout d'abord, Mes louanges à DIEU le Tout Puissant pour m'avoir donné le courage, la Volonté, la patience durant ces années d'étude et que grâce à Lui ce travail a été réalisé.*

*Les travaux de recherche dans le cadre de cette thèse sont effectués au sein du Laboratoire de Génie Electrique Biskra (L G E B) de l'université Mohamed Khider sous La direction de Mr **BETKA Achour** et **Golea Amar** Professeurs au département de génie électrique. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude et mes sincères remerciements .Leurs qualités scientifiques et humaines ont Toujours été une source de motivation. Leur aide et leurs conseils m'ont été toujours précieux.*

*Je remercie très vivement Mr **Ghamri Ahmed** Maître de conférences à l'université Mohamed Khider pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.*

*Mes vifs remerciement vont également aux honorables membres de jury : Mr **Maakouf adbesselem** Professeur à l'Université de Batna2, Mr **Drid Said** Professeur à l'Université de Batna 2.*

*J'adresse mes remerciements au directeur du laboratoire LGEB , Professeur **ZOUZOU Salah Eddine** ainsi qu'à tout le personnel pour les moyens mis à notre disposition.*

*Un remerciement particulier à mon épouse et mes enfants pour leur patience à mon indisponibilité durant la préparation de cette thèse.*

## RESUME

**Résumé**— Le présent travail de cette thèse traite l'étude d'un système de dessalement à osmose inverse alimenté par source d'énergie hybride : solaire-éolien. La conception du système par l'analyse du gisement solaire et éolien d'un site réel ainsi que le dimensionnement optimal du système par la méthode de la probabilité de perte de puissance a été effectuée. Par ailleurs, des approches de commande ont été envisagées pour la gestion et l'optimisation énergétique du système pour assurer le fonctionnement optimal du système considérant les contraintes de fonctionnement des sources d'énergie variable. Un gestionnaire d'énergie intelligent basé sur les algorithmes des réseaux de neurone a été développé pour cette fin. Une commande en couple du générateur éolien basée sur des contrôleurs d'ordre fractionnaire a été adoptée sous le contrôle du gestionnaire d'énergie par l'approche réseaux de neurone RN imposant un certain nombre de modes de fonctionnement. Pour le générateur photovoltaïque, un contrôleur par recherche d'extremum (ESC) a été développé et ce pour assurer d'une part une maximisation de la puissance et d'autre part pour prendre en charge les moments d'ombrage survenant pendant le fonctionnement. Un control à flux orienté avec régulation du bus continu est proposé pour la MSAP entraînant l'unité d'osmose inverse afin d'acheminer la puissance générée par les sources de puissance sous le contrôle du gestionnaire RN.

**Mots clés**— MPPT, osmose inverse, dessalement, système hybride, optimisation

## ملخص

**ملخص** - يتناول العمل الحالي لهذه الرسالة دراسة نظام تحلية تناضح عكسي مدعوم بمصدر طاقة هجين: الريح و الشمس. تم تصميم النظام من خلال تحليل مخزون الشمس والرياح لموقع حقيقي بالإضافة إلى القياس الأمثل للنظام من خلال طريقة احتمال فقد الطاقة. بالإضافة إلى ذلك ، تم الأخذ بعين الاعتبار أساليب التحكم في الإدارة وتحسين الطاقة للنظام لضمان الأداء الأمثل للنظام نظرًا لقيود التشغيل الخاصة بمصادر الطاقة المتغيرة. لقد تم تطوير مسير ذكي للطاقة يعتمد على خوارزميات الشبكات العصبية لهذا الغرض. تم اعتماد التحكم بعزم الدوران لمولد الرياح على أساس وحدات تحكم الترتيب الجزئي تحت سيطرة مدير الطاقة بمقاربة الشبكات العصبية الذي يفرض عددًا من طرق التشغيل. بالنسبة للمولدات الكهروضوئية ، تم تطوير جهاز تحكم عن طريق البحث عن الحد الاعظمي (ESC) وهذا لضمان توزيع الطاقة من جهة ، ومن ناحية أخرى لدعم لحظات التظليل التي تحدث أثناء التشغيل. يقترح التحكم في التدفق الموجه مع تنظيم الناقل المستمر لقيادة MSAP من أجل توجيه الطاقة المتولدة من مصادر الطاقة تحت سيطرة مسير تدفق الطاقة RN.

الكلمات المفتاحية - MPPT ، التناضح العكسي ، تحلية المياه ، نظام هجين ، التحسين



## **ABSTRACT**

**Abstract** - The present work of this thesis deals with the study of a reverse osmosis desalination system powered by a hybrid energy source: solar-wind. The design of the system by analyzing the solar and wind deposit of a real site as well as the optimal sizing of the system by the method of the Lost power supply probability was carried out. In addition, control approaches have been considered for the management and energy optimization of the system to ensure the optimal functioning of the system considering the operating constraints of the variable energy sources. An intelligent energy manager based on neural network algorithms has been developed for this purpose. A torque control of the wind generator based on fractional order controllers has been adopted under the control of the energy manager NN which imposes a number of modes of operation. For the photovoltaic generator, a controller by extremum seeking control (ESC) has been developed and this to ensure on one hand a power maximization and on the other hand to support the shading moments occurring during operation. A flux oriented control with DC bus regulation control strategy is proposed for the PMSM driving the RO unit in order to route the power generated by the power sources under the control of the RN manager.

Keywords - MPPT, reverse osmosis, desalination, hybrid system, optimization

# LISTE DE SYMBOLES ET NOTATIONS

## Liste de symboles et Notations

<i>i</i>	Nombre d'ions dissociés d'un électrolyte
<i>C</i>	Concentration en sels en mol.m <sup>-3</sup>
<i>R<sub>g</sub></i>	Constante des gaz parfaits ( $R_g = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
<i>T</i>	Température (°K)
RO	Osmose inverse(Reverse osmosis en Anglais)
MSF	Multi stages Flash(Distillation à détente étagées)
MED	Multi-effets distillation
ED	Electrodialyse
VC	Compression de vapeur
MVC	Multi vapeur compression
SD	Distillation solaire
HD	Humidification-Déshumidification
PV	Photovoltaïque
LPS	Perte de puissance
LPSP	Probabilité de perte de puissance(%)
WE	Energie perdue non utilisée (Wh)
<i>PI</i>	Proportionnel-Intégral
NOCT	Température nominale de fonctionnement
BWRO	Osmose inverse pour eau saumâtre (Brakish Water Reverse Osmosis en Anglais)
SOC	Etat de charge des batteries (State of charge en anglais)
DOD	Profondeur de charge des batteries(Depth of charge en anglais)
RN	Réseaux de Neurones
RNA	Réseaux de neurones artificiels
Pch	Puissance de la charge équivalent de la demande en eau douce (W).
SOC	l'état de charge des batteries
Pnet	Puissance nette(différence entre puissancesolaire et eolienne et Pch) (W)

$P_{wnom}$  Puissance nominale de la turbine éolienne (W).

$P_{bat-ref}$  Puissance de référence des batteries (W).

$P_s$  Puissance des source de puissance (W).

$P_{w-ref}$  puissance de référence de la turbine éolienne (W).

$\Pi$  Pression osmotique (bar)

MLI Modulation de largeur d'impulsion

HP Haute pression

MSAP Machine synchrone à aimants permanents

GSAP Génératrice synchrone à aimants permanents.

$P_{pv}$  Puissance produite par le GPV(Watt)

$V_{pv}$  Tension aux bornes du GPV(V)

$I_{pv}$  Courant généré par le GPV(A)

$V_p$  Tension aux bornes d'un module PV (V)

$I_p$  Courant généré par un module PV(A)

$N_p$  Nombre de branches en parallèle

$N_s$  Nombre de panneaux en série

$I_{PH}$  Courant photovoltaïque(A)

$R_s$  Résistance en série (Ohm)

$R_p$  Résistance en parallèle(Ohm)

$R_{sh}$  Résistance shunt (Ohm)

$I_D$  Courant dans la diode(A)

$I_r$  Irradiation (kWh/m<sup>2</sup>)

$T_c$  Température de la cellule photovoltaïque(°c)

$T_a$  Température ambiante(°c)

$V_{Be}$  Source de tension idéale de la batterie(V)

$I_{Bat}$  Courant de la batterie(A)

$V_{Bat}$  Tension aux borne de la batterie(V)

$R_t$  Rayon de la pale de la turbine (m)

GM Gain du multiplicateur (sans unité)

---

$J_m$	Moment d'inertie [kg.m <sup>2</sup> ]
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique (rd/s)
$\Omega_{turbine}$	Vitesse mécanique de la turbine (rd/s)
$C_{aer}$	Couple aérodynamique (N.m)
$C_g$	Couple d'entraînement de la génératrice (N.m)
$C_{mec}$	Couple mécanique totale (N.m)
$C_{em}$	Couple électromagnétique (N.m)
$P_v$	Puissance du vent (Watt)
$St$	Surface utile traversée par le vent (m <sup>2</sup> )
$s$	opérateur de LAPLACE
$\rho$	Masse volumique dair( kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Vitesse du vent (m/s)
$\lambda$	Vitesse réduite spécifique (Ratio)
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique(W)
$CP$	Coefficient de puissance
$c_f$	Couple des frottements visqueux(N.m)
$w$	Pulsation des courants statoriques (rd/s)
$[V_s]$	Vecteur tensions statoriques de la MSAP (V)
$[i_s]$	Vecteur courants statoriques de la MSAP (A)
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statoriques (Wb)
$[R_s]$	Matrice résistance du stator (Ohm)
$[L_{abc}]$	Matrice inductance du stator (H)
$[T]$	Matrice de <i>Park</i> normalisée
$p$	Nombre de paire de pôles
$\varphi_{sf}$	Flux total dû aux aimantsde la GSAP (Wb)
$R$	Taux de recouvrement.(%)
$V_{sd}; V_{sq}$	Tensions statoriques selon les axes dqde la MSAP (V)
$I_{sd}; I_{sq}$	Courants statoriques selon les axes dq de la MSAP (A)

---

$\phi_d, \phi_q$	Flux du stator selon les axes d,q (Wb)
$L_d, L_q$	Inductance du stator selon les axes d,q de la MSAP (H)
$E_{ds} E_{qs}$	FEM produites par la GSAP (V)
Sa Sb Sc	Etats de commutation de l'onduleur.
Sd Sq	Etas de commutation de l'onduleur dans le repère d-q
$V_{dc}$	Tension au bus continu (V)
$I_{dc}$	Courant à l'entrée du bus continu (A)
$I_s$	Courant à la sortie du bus continu (A)
$I_{s-ref}$	Courant de référence à la sortie du bus continu (A)
$I_c$	Courant de charge de la capacité (A)
$I_{c-ref}$	Courant de charge de référence de la capacité (A)
$I_{ch}$	Courant de charge à l'entrée de l'onduleur (A)
$P_{dc}$	Puissance au bus continu (W)
$V_{sd}$	Tension statorique sur l'axe d de la GSAP (V)
$V_{sq}$	Tension staorique sur l'axe q de la GSAP (V)
$V_{ds}$	Tension statorique sur l'axe d de la MAS (V)
$P_m$	Puissance mécanique développée par la GSAP (W)
$Pres$	Pression hydraulique de lapompe(Pa)
$H$	Hauteur manométrique (m)
$Q$	Débit ( m <sup>3</sup> /s)
$P_{m-p}$	Puissance uécannique transmise à la pompe (Watt)
$T_{rp}$	Couple statique de la pompe (N.m)
$Q_p$	Débit du perméat (Kg/s)
$Q_f$	Débit massique de l'eau d'alimentation (Kg/s)
$Y$	Taux de rétention(%)
$J_w$	Flux massique du perméat à travers la membrane ( $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$ )
$J_s$	Flux massique des Sels à travers la membrane ( $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$ )
$S_m$	Surface active de la membrane (m <sup>2</sup> .)
$A$	Perméabilité de la membrane à l'eau( $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ )
$\Delta\pi$	Pression transmembranaire d'osmose (Pa.)

---

$B$	Perméabilité de la membrane aux Sels ( $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )
$\Delta P_d$	Chute de pression le long du canal de la membrane (Pa)
$A_{ref}$	Facteur de perméabilité de référence de la membrane ( $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ )
$TCF$	Facteur de correction de la température
$FF$	Facteur de colmatage ( <i>Fouling Factor</i> )
$f$	Fonction de densité de probabilité de Weibull
$k$	Facteur de forme de Weibull
$c$	Facteur d'échelle de Weibull
$\Gamma$	Fonction Gamma
$P_M$	Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )
$T$	Température (K)
$C_f$	Facteur de capacité de l'éolienne
$P_{ag}$	Puissance fournie par l'aérogénérateur (Watt)
$Y_{pv}$	Facteur de déclassement du module.
$G_{STC}$	Eclairement aux conditions standards (W/m <sup>2</sup> ).
$R_b$	Rapport d'inclinaison
$\delta$	Déclinaison solaire
$P_{tot}$	Puissance totale fournies par les sources renouvelables (Watt)
$P_{ch}$	Puissance de la charge (Watt)
$P_{hpomp}$	Puissance hydraulique de la pompe (Xatt)
$C_{bat}$	Capacité des batteries (wh)
$E$	Energie (joule)
$\sigma$	Taux d'autodécharge des batteries.
$\Delta W_{ij}$	Fonction d'activation
$\theta$	Variable de la foction y
$y$	Fonction de la carte non linéaire
$J$	Signal à la sortie du filtre passe haut
$\chi$	signal à la sortie du filtre passe bas
$W_H$	Fréquence de coupure du filtre passe haut
$W_L$	Fréquence de coupure du filtre passe bas
$a$	Amplitude du signal de perturbation
$\gamma$	Gain de l'intégrateur

# TABLE DES MATIERES

---



## Chapitre I

1.1 Introduction .....	4
1.2 Description des systèmes de dessalement .....	4
1.2.1. Processus de distillation.....	5
1.2.1.1 Distillation flash multi-étape(MSF) .....	5
1.2.1.2 Multi-effet distillation (MED) .....	6
1.2.1.3. Distillation par compression de vapeur.....	7
1.2.2 Les procédés membranaires.....	8
1.2.2.1 L'osmose inverse .....	8
1.2.2.2 Procédé de l'électrodialyse .....	9
1.3 Etat de l'art des procédés de dessalement associés aux énergies renouvelables (solaire/éolien).....	9
1.3.1 Couplage de la source éolienne avec le procédé d'osmose inverse. ....	11
1.3.2 Energie solaire associée au procédé RO.....	13
1.3.3 Systèmes de dessalement hybrides (solaire/éolien).....	15
1.4 Conclusion.....	16

## Chapitre II

2.1 Introduction .....	18
2.2 Architecture du système .....	18
2.2.1 Définition et choix de l'architecture .....	18
2.3 -Présentation du générateur photovoltaïque .....	19
2.3.1 -Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	20
2.4 Modélisation de la batterie Ion-Lithium.....	23
2.5 Présentation du générateur éolien .....	24
2.5.1 Modélisation de la turbine éolienne.....	24
2.5.1.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine .....	24
2.5.1.2 Modélisation de la turbine.....	25
2.5.1.3 Modèle du multiplicateur .....	27
2.5.1.4 Equation dynamique de l'arbre.....	27
2.6 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....	28
2.6.1 Présentation de la machine synchrone.....	28
2.6.2 Hypothèses simplificatrices .....	28

2.6.3	Mise en équation de la machine synchrone .....	29
2.6.3.1	Application de la transformation de <i>Park</i> .....	30
2.6.3.2	Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère lié au rotor .....	31
2.7	Modélisation des convertisseurs.....	33
2.7.1	Modèle du convertisseur alternatif-continu (AC – DC) .....	33
2.7.2	Modélisation statiques des convertisseurs DC-DC .....	35
2.7.2.1	Modélisation aux valeurs moyennes .....	35
2.8	Modélisation de la pompe haute pression (HP) .....	36
2.8.1	Présentation de La pompe Grundfos CRN 3-23 .....	37
2.8.1.1	Carctéristique Hauteur manométrique –Débit : H(Q) de la pompe .....	37
2.9	Modele de la membrane d’osmose inverse .....	39

### Chapitre III

3.1	Introduction .....	44
3.2	Gisement éolien à Illizi .....	44
3.2.1	Méthodologie de calcul .....	45
3.2.1.1	Fonction de densité de probabilité de vitesse du vent.....	45
3.2.1.2	.Fonction de densité de puissance éolienne. ....	47
3.2.1.3	Facteur de capacité et Puissance produite.....	47
3.2.1.4	Extrapolation des paramètres de Weibull à la hauteur du moyeu.....	48
3.3	Gisement solaire.....	49
3.3.1	Données solaires d’Illizi .....	49
3.3.2	Méthodologie de calcul .....	49
3.4	Dimensionnement optimal des composants du système hybride .....	51
3.4.1	Méthodologie de dimensionnement optimal. ....	52
3.4.1.1	Détermination du profile de charge du système de dessalement .....	52
3.4.1.2	Présentation de l'algorithme de dimensionnement.....	53
3.5	Résultats de dimensionnement .....	57
3.6	Conclusion.....	59

## Chapitre IV

4.1 Introduction .....	60
4.2 Description du gestionnaire d'énergie basé sur les réseaux de neurones .....	60
4.2.1 Stratégie de gestion de l'énergie .....	61
4.2.2 Gestion de l'énergie par les réseaux de neurones .....	64
4.2.2.1 Les mécanismes d'apprentissage des RN : .....	64
4.2.2.2 Détermination de l'algorithme RN pour la gestion d'énergie .....	67
4.2.2.3 Les variables d'Entrée de l'apprentissage de l'algorithme RN .....	69
4.2.2.4 Résultats de test de l'apprentissage .....	70
4.3 Commande rapprochée des différentes entités .....	71
4.3.1 Choix de commande pour le générateur photovoltaïque .....	71
4.3.1.1 Présentation de l'algorithme contrôle par recherche de l'extremum .....	72
4.3.1.2 Principe de la méthode ESC .....	73
4.3.1.3 Analyse de la stabilité du contrôle par recherche d'extremum .....	75
4.3.2 Commande en courant des batteries .....	77
4.3.4 Choix de commande de l'éolienne. ....	78
4.3.5 Commande en couple de la GSAP .....	79
4.3.5.1 Commande vectorielle à PI fractionnaire pour le générateur éolien.....	81
4.3.5.2 Présentation du correcteur PID d'ordre fractionnaire.....	81
4.3.5.3 Réglage du contrôleur PI fractionnaire de la GSAP. ....	83
4.4 Commande de la MSAP .....	85
4.4.1 régulation du bus continu par théorie de lyapounov .....	86
4.5 Conclusion.....	88

## Chapitre V

5.1 Introduction .....	89
5.2 Choix des entrées .....	89
5.2.1 Vitesse du vent.....	89
5.2.2 L'irradiation solaire .....	90
5.2.3 Les variations de charge .....	91
5.3 Résultat du système de dessalement pour un profil d'été .....	92
5.3.1 Résultats des générateurs de puissances .....	92
5.3.1.1 Résultats de l'aérogénérateur.....	95

---

5.3.1.2 Résultats du générateur photovoltaïque .....	96
5.3.2 . Résultats de la MSAP .....	97
5.3.3 Résultats de la pompe centrifuge .....	99
5.3.4 Résultats du module RO .....	101
5.4 Résultat du système de dessalement pour un profil d'hiver .....	103
5.4.1 Résultats des générateurs de puissances .....	103
5.5 Performances du système de dessalement hybride.....	105
5.6 Conclusion.....	106

# LISTE DES FIGURES

---

## Chapitre I

Figure .1.1 Principaux procédés de dessalement.....	5
Figure. 1.2 Schéma descriptif d'une unité de distillation MSF .....	6
Figure 1. 3. schéma descriptif d'une unité MED. ....	7
Figure 1.4 Schéma de principe du procédé MVC .....	8
Figure 1.5 Schéma de principe de la membrane d'osmose inverse .....	9
Figure 1.6 Schéma de principe de l'électrodialyse .....	9
Figure 1.7 Différentes combinaisons possibles.....	10
Figure 1.8 Parts des processus de dessalement et sources d'énergie renouvelable .....	12
Figure 1.9 Unité de dessalement alimentée par une source éolienne raccordée au réseau .....	13
Figure 1.10 Schéma de principe d'une unité PV-RO .....	15
Figure 1. 11 Répartition géographique des systèmes solaires - RO dans le bassin méditerranéen .....	15

## Chapitre II

Figure 2.1 Synoptique du système hybride de dessalement à osmose inverse.....	19
Figure 2.2 schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC).....	20
Figure 2.3 Modèle à "une-diode" d'une cellule photovoltaïque .....	20
Figure 2.4 – Caractéristique tension-courant $V_{pv}(I_{pv})$ du panneau photovoltaïque, .....	22
Figure.2.5. Caractéristiques(I-V) et(P-V) du module pour différentes valeurs.....	23
Figure 2.6 – Composants d'un aérogénérateur .....	25
Figure 2.7 - Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine .....	26
Figure 2.8 Schéma bloc du modèle de la turbine .....	28
Figure 2.9 Schéma de la machine synchrone dans le repère abc. ....	29
Figure 2.10 - Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q). ....	30
Figure 2.11 Modèle équivalent de la GSAP sur l'axe d-q .....	31
Figure 2.12 Schéma de l'association GSAP-Redresseur MLI.....	34
Figure 2.13 : Convertisseur bidirectionnel associé aux batteries .....	35
Figure 2.14 Schéma de la première séquence de commutation .....	35
Figure 2.15 Pompe multicellulaire GRUNDFOS CRN 3-23.....	37
Figure 2.16 Résultat de l'interpolation des caractéristiques $P_{res}-Q$ et $P_{m-p}-Q$ de la pompe .....	38

Figure 2.17 Diffusion de l'eau dans la membrane. ....	39
-------------------------------------------------------	----

### Chapitre III

Figure 3.1 : Fonction de distribution de Weibull pour Illizi. ....	46
Figure 3.2 Profils annuels de consommation d'eau et puissance équivalente .....	52
Figure 3.3 Algorithme d'opération du dimensionnement du système de dessalement.....	54
Figure 3.4 Vitesses du vent à Illizi observées durant l'année 2015 .....	57
Figure 3.5 Résultats de l'algorithme de dimensionnement.....	58

### Chapitre IV

Figure 4.1 Synoptique du système hybride de dessalement .....	61
Figure 4.2 Algorithme de gestion d'énergie.....	62
Figure . 4.3: Structure générale des Réseaux de Neurones Artificiels .....	64
Figure 4.4 Modèle d'apprentissage de la connexion $W_{ij}$ entre deux neurones .....	66
figure. 4.5. GUI du RN développé pour le gestionnaire d'énergie .....	68
Figure 4.6 Variables d'entrée et de sortie de l'algorithme RN .....	69
Figure 4.7 Puissances d'apprentissage du gestionnaire RN .....	69
Figure 4.8 Profil de charge en puissance équivalente d'eau douce .....	70
Figure 4.9 Courbes de régression .....	71
Figure 4.10 Schéma de contrôle du GPV par le contrôleur ESC .....	72
Figure 4.11 Effet de l'ombrage partiel sur le GPV .....	73
Figure 4.12 Principe de L'algorithme ESC .....	73
Figure 4.13 Principe de fonctionnement de l'algorithme ESC .....	74
Figure 4.14 Schéma de principe du contrôle du convertisseur associé aux batteries. ....	77
Figure 4.15 Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur .....	79
Figure 4.16 Schéma synoptique de la commande de la GSAP.....	81
Figure 4.17 Famille des PID conventionnels et PID d'ordre fractionnaires .....	82
Figure 4.18 : Schéma block des boucle de régulation des courants .....	84
Figure 4.19 Schéma de commande de la MSAP .....	86

Figure 4.20 Schéma de la boucle de régulation du bus continu .....	88
--------------------------------------------------------------------	----

## Chapitre V

Figure 5.1 – Profil d’entrée de la vitesse du vent.....	90
Figure 5.2 – Profil d’entrée de l’irradiation solaire $I_r$ sous ombrage partiel.....	91
Figure 5.3 Représentation des profils de puissance équivalents à la demande en eau douce pour deux périodes .....	92
Figure 5.4 Puissance générées par le système hybride.....	93
Figure 5.5 Puissance équivalente en eau douce et Puissance transmise à la pompe.....	94
Figure 5.6 Coefficient de puissance $C_p$ .....	95
Figure 5.7 Courants direct $I_d$ et quadratique $I_q$ de la GSAP.....	96
figure 5.8 Puissance générée par le GPV et profile d’éclairement .....	97
Figure 5.9 Courants statoriques et courants dans le plan d-q.....	98
Figure 5.10 Performances mécaniques de la MSAP. ....	99
Figure 5.11 Tension du bus continu .....	99
Figure 5.12 Débit de la pompe centrifuge multi-cellulaire. ....	100
Figure 5.13 Pression de la pompe centrifuge multi cellulaire.....	101
Figure 5.14 Allure du débit du permeat .....	102
Figure 5.15 Allure du taux de recouvrement.....	102
Figure 5.16 Allure de la concentration du permeat.....	103
Figure 5.17 Puissances générées par le système de puissance hybride.....	104
Figure 5.18 Puissance équivalente de référence et Puissance transmise à la pompe.....	105
Figure 5.19 Coefficient de puissance $CP$ .....	105



# Liste des tableaux

---

Tableau 1.1: Association convenables des procédés de dessalement avec l'énergie solaire et éolienne.....	11
Tableau 1.2 Exemple d'installation de dessalement hybride dans le monde.....	16
Tableau 2.1 Données techniques de la pompe.....	39
Tableau 3.1 Caractéristiques techniques de la turbine éolienne.....	48
Tableau 3.2 Valeurs des densités de puissances mensuels à Illizi.....	49
Tableau 3.3 Valeurs mensuels du rayonnement incident sur un plan horizontal à Illizi.....	51
Tableau 3.4 caractéristiques techniques de la batterie.....	51
Tableau 3.5 Caractéristiques techniques du module photovoltaïque.....	52
Tableau 3.6 Combinaisons optimales du système de dessalement hybride.....	58
Tableau 4.1 Modes de contrôle du couple électromagnétique de la GSAP.....	80
Tableau 5.1 Performances du système de dessalement hybride pour deux profils.....	105

# INTRODUCTION GENERALE

---

## 1. Introduction

L'eau et l'énergie sont deux éléments indissociables qui régissent notre vie et promeuvent la civilisation. La santé sociale et économique du monde moderne dépend de l'approvisionnement durable en énergie et en eau. De nos jours, environ trois milliards de personnes n'ont pas accès à une source sûre d'eau douce et environ 1,76 milliard de personnes vivent dans des zones déjà confronté à un degré élevé de pénurie d'eau douce. Le dernier Rapport mondial des Nations Unies indique que 75% de la population arabe vit sous le niveau de la pénurie d'eau et près de la moitié de la population vit sous le moindre extrême niveau de 500 m<sup>3</sup> par habitant et par an [78]. Comme solution à cette pénurie d'eau annoncée, des solutions urgentes doivent être développées pour lutter contre ce stress hydrique annoncé.

L'Algérie est l'un des pays qui fait face à cette pénurie d'eau signalée. En effet la pluviométrie qui est la principale source d'eau douce dans ce pays reste insuffisante dans un large pays avec une superficie de 2100000km<sup>2</sup>. Ces dernières années, avisé par cette situation, le pays s'est orienté vers la construction des barrages qui offre 10000m<sup>3</sup> par an. Cependant, vu les zones pluviométriques principalement situés au nord, cette solution ne pourrait couvrir les besoins en eau de toute la population à l'échelle nationale. La seconde stratégie adoptée par l'Algérie pour assurer sa sécurité hydrique fut les stations de dessalement de l'eau de mer dont un bon nombre est déjà en service. La quantité offerte est de l'ordre de 2222 m<sup>3</sup>. Ces stations de dessalement bien qu'ils soient d'un côté avantageux en alimentant un certain nombre de ville par l'eau douce, D'un autre côté, ils n'alimenteraient que les villes côtière alors que d'autre villes intérieures et au sud présentant une pénurie d'eau douce ne pourrait pas bénéficier de cette technologie. Néanmoins ces procédés peuvent faire une expansion vers les villes intérieure et du sud par le dessalement de l'eau saumâtre abondante dans la plupart de ces villes. Ces systèmes qui sont principalement alimentés par l'énergie électrique ou thermique doivent être proches des réseaux électriques afin de prévoir une installation de dessalement. Pour les source d'eau saumâtre éloignés du réseau électrique, une technologie émergente et prometteuse qui associe les sources d'énergie renouvelable aux systèmes de dessalement vient pour contrecarrer l'éloignement des sources d'eau saumâtres des sources d'énergie électrique. Il est fort intéressant de constater que l'Algérie dispose de l'un des plus grands gisements solaire au monde sans négliger les autres sources d'énergies renouvelables qui abondent dans des régions plus que d'autres. La combinaison des technologies de dessalement avec des sources d'énergie renouvelables fait l'objet de plusieurs études de recherche en raison du grand nombre de combinaisons possibles entre ces deux technologies

[79]. Les systèmes de dessalement sont classés en deux grandes catégories: les technologies thermiques et membranaires. Il y a une tendance à associer les systèmes thermiques avec des sources d'énergie thermique tels que l'énergie solaire et les membranes avec la source d'énergie pouvant alimenter un système électromécanique comme le solaire ou l'éolien. Cependant, seulement quelques-uns d'entre eux sont techniquement et économiquement réalisables en fonction de plusieurs facteurs tels que la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables, la présence de stockage de l'eau, la qualité de l'eau à dessaler et les limites de fonctionnement des composants du système [80]. En outre, certains sont adaptés pour les grandes installations, tandis que d'autres sont utiles pour les petites installations. L'osmose inverse (RO) pour les procédés membranaires et le Multi stage flash (MSF) pour les technologies thermiques sont actuellement les plus compétitifs sur le marché.

Dans ce contexte, notre thèse consiste à proposer un système de dessalement autonome alimenté par une source d'énergie renouvelable hybride solaire/éolien en l'occurrence. Des stratégies de commande adéquates sont envisagées permettant une optimisation de l'énergie en présence de ces sources d'énergie variables afin d'améliorer la production de l'eau douce et le rendement du système. Ainsi notre thèse se présente comme suit:

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art des principales technologies de dessalement des eaux et l'intégration des énergies renouvelables comme source pour ces procédés dans la littérature. Nous mettrons l'accent sur leur performances techniques et économiques ainsi que les avantages et les inconvénients de ces modèles.

Dans le second chapitre, la conception du système par une représentation macroscopique est réalisée où l'interaction des différents étages de conversion est explicitée. la modélisation des différentes parties composant le système est élaboré. Les modèles mathématiques de la turbine éolienne, le générateur photovoltaïque et les batteries formant les sources d'énergie pour le système sont détaillés. De même, la machine synchrone en mode générateur et moteur ainsi que les convertisseurs, le bus continu et l'unité d'osmose inverse formée par la pompe et la membrane sont modélisés.

Dans le troisième chapitre, le dimensionnement du système est déterminé selon un profil de charge correspondant à une agglomération résidentielle s . En outre, les ressources d'énergie renouvelable solaire et éolienne de la ville d'Illizi prise comme cas d'étude sont évaluées. Par la suite, un dimensionnement optimal du système basé les données solaires et

éolienne du site choisi est présenté. L'algorithme est basé sur la méthode de probabilité de perte de puissance (LPSP) dont le fondement scientifique est explicité.

Dans le quatrième chapitre, les stratégies de commande adoptées pour commander les machines et les convertisseurs sont décrites. Nous abordons d'abord la commande du générateur photovoltaïque basée sur la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) et du moteur synchrone à aimants permanents basée sur une commande vectorielle. Ensuite nous présentons le gestionnaire d'énergie qui a pour rôle d'assurer l'adaptation de l'énergie produite à la demande de la charge. Notre choix s'oriente vers l'algorithme des réseaux de neurones qui assure le transfert de la puissance générée par les différentes sources variables vers le moteur entraînant l'unité d'osmose inverse. Les fondements de cette méthode sont explicités.

Le cinquième paragraphe est consacré à la présentation des résultats de simulation par l'outil MATLAB/SIMULINK mettant en valeur les performances et la robustesse des stratégies de commande des différentes parties de notre système de dessalement hybride. Les résultats sont discutés et commentés.

Une conclusion synthétisant les travaux présentés dans cette thèse est formulée suivie de quelques perspectives retenues sur la base des travaux réalisés dans cette thèse.

# Chapitre I

---

**ETAT DE L'ART DES PROCEDES DE DESSALEMENT  
ASSOCIES AUX ENERGIES RENOUVELABLES**

## 1.1 Introduction

Le dessalement est un processus de traitement des eaux qui sépare les sels de l'eau saline pour produire de l'eau potable ou de l'eau à faible teneur en solides totaux dissous (TDS). Dans le monde entier, à ce jour, plus de 15 000 unités de dessalement ont été installées à l'échelle industrielle, ils représentent une capacité totale de plus de 47 millions de m<sup>3</sup> d'eau produite par jour [1]. Les techniques de dessalement sont principalement classées en deux types: (i) des procédés basés sur le changement physique dans l'état de l'eau ou distillat par évaporation, (ii) les procédés utilisant une membrane basée sur le concept de filtration. Dans ce présent chapitre, on donne un aperçu des divers aspects du dessalement et comment les sources d'énergie renouvelable peuvent être couplées à ces systèmes. Un bref aperçu de l'aspect technique des principaux procédés de dessalement est donné et est suivi d'une évaluation de leurs avantages et inconvénients respectifs.

## 1.2 Description des systèmes de dessalement

Les principaux procédés de dessalement sont divisés en deux types de procédés comme il est indiqué sur la figure.1.1 ainsi que d'autres procédés alternatifs [2].

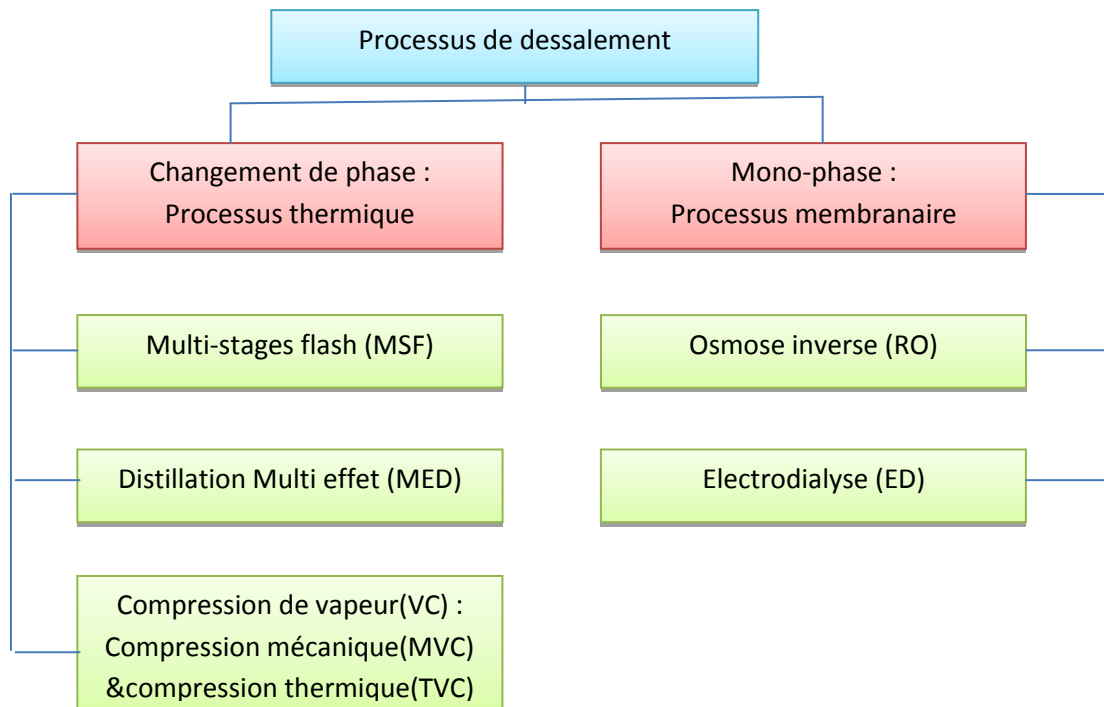


Figure .1.1 Principaux procédés de dessalement

### 1.2.1. Processus de distillation

Le processus de Distillation imite le cycle naturel de l'eau où une solution saline est chauffée produisant de la vapeur d'eau, qui est à son tour condensé pour former de l'eau fraîche. Ces processus comprennent: MSF : Multi-stage-flash (procédé de distillation à détente étagée), MED : multi-effect distillation (distillation multi-effet), et VC : Vapor compression (compression de vapeur). Quarante pour cent de la capacité produite par dessalement dans le monde est basée sur le principe de dessalement MSF. Cependant, d'autres technologies de distillation, tels que MED et VC, sont en pleine expansion et sont prévus pour avoir un rôle plus important dans l'avenir dans l'attente que la technologie arrive à maturité industrielle. Ces procédés nécessitent l'énergie thermique ou mécanique pour provoquer l'évaporation de l'eau. Par conséquent, ils ont tendance à avoir des avantages de coûts d'exploitation lorsqu'un faible coût d'énergie thermique est disponible [2].

#### 1.2.1.1 Distillation flash multi-étape(MSF)

Les installations de dessalement à flash à multiple étage ( MSF ) sont utilisées pour la production d'eau potable à partir d'eau de mer et d'eau saumâtre. L'eau de mer est portée à la température désirée à l'aide de vapeur passant par une série de chambres ( étages ) où une pression interne réduite provoque une ébullition immédiate ( flash ) sans qu'il soit nécessaire d'appliquer de la chaleur supplémentaire [3].

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 ( > 2 bar ). Par exemple, en combinaison avec une centrale thermique ou un complexe industriel.

Les avantages principaux sont: L'exploitation du processus MSF se fait à une température pouvant atteindre 115° C avec une efficacité élevée. Cela permet de réaliser :

- des installations de grande taille
- une faible consommation d'énergie



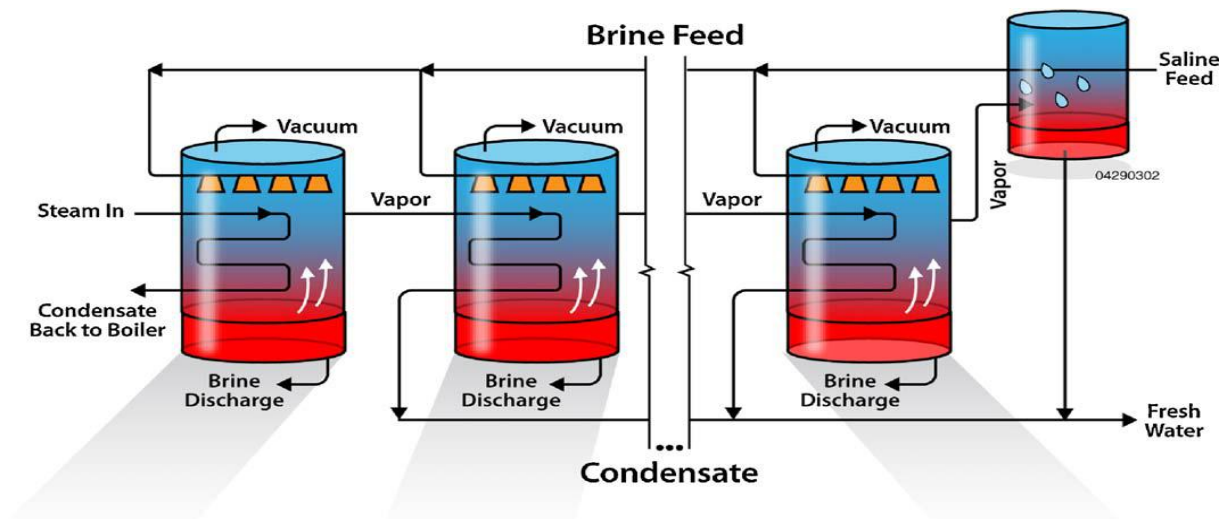


Figure. 1.2 Schéma descriptif d'une unité de distillation MSF

### 1.2.1.2 Multi-effet distillation (MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée à travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1<sup>er</sup> effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2<sup>ème</sup> effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2<sup>ème</sup> effet et ainsi de suite (Voir figure 1.3). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite)[4].

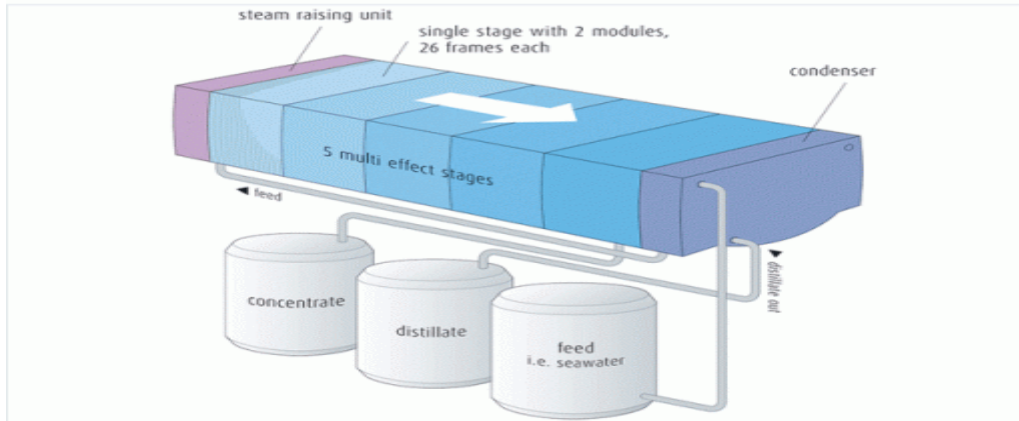


Figure 1. 3. schéma descriptif d'une unité MED.

### 1.2.1.3. Distillation par compression de vapeur

Le procédé de distillation VC est généralement utilisé pour les petites et moyennes unités d'eau de mer de dessalement. La chaleur d'évaporation de l'eau provient de la compression de la vapeur plutôt que de l'échange direct de chaleur à partir de la vapeur produite dans une chaudière. Les usines qui utilisent ce processus sont généralement conçues pour prendre l'avantage du principe de la réduction de la température de point d'ébullition en réduisant la pression. Deux procédés principaux sont utilisés pour condenser la vapeur de manière à produire suffisamment de chaleur pour évaporer l'eau de mer : un compresseur mécanique ou d'un jet de vapeur. Le compresseur mécanique (MVC) est généralement entraîné électriquement pour produire de l'eau par la distillation (Fig 1.4).

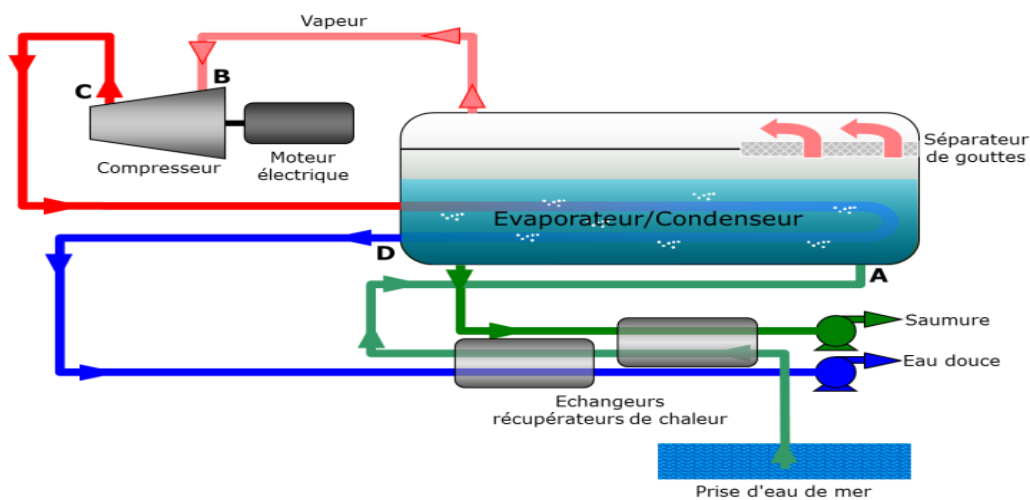


Figure 1.4 Schéma de principe du procédé MVC

## 1.2.2 Les procédés membranaires

Dans la nature, les membranes jouent un rôle important dans la séparation de sels, comme dans les procédés de dialyse et l'osmose se produisant dans le corps humain. Les membranes sont utilisées commercialement dans les deux importants procédés de dessalement: l'osmose inverse et l'électrodialyse. Chaque processus utilise la capacité des membranes de manière à séparer les sels et de l'eau. Cependant, les membranes sont utilisées différemment dans chacun de ces procédés [5].

### 1.2.2.1 L'osmose inverse

Dans l'osmose inverse (RO), l'eau saline sous le gradient de la pression est séparée par une membrane des solutés (à savoir, les matériaux dissous). L'exigence majeure de l'énergie requise est celle nécessaire à la pression appliquée sur l'eau d'alimentation. En pratique, l'eau d'alimentation de la solution saline est pompée dans un récipient fermé, où il est mis sous pression contre la membrane (voir Fig. 1.5). Alors qu'une partie de l'eau passe à travers la membrane, l'eau d'alimentation restante aura une teneur en sel plus élevée. Dans le même temps, une partie de cette eau d'alimentation est plus salée (retentat) est déchargée sans passer à travers la membrane. Les unités RO ont une décharge des déchets de l'eau saumâtre ou de la saumure qui peut aller de 35% à 100% de la production d'eau douce, en fonction de la charge de l'eau traitée. Au cours de la dernière décennie, deux améliorations ont contribué à réduire les coûts d'exploitation du processus RO à savoir l'évolution des membranes qui peuvent fonctionner efficacement en basses pressions et l'utilisation des dispositifs de récupération d'énergie.

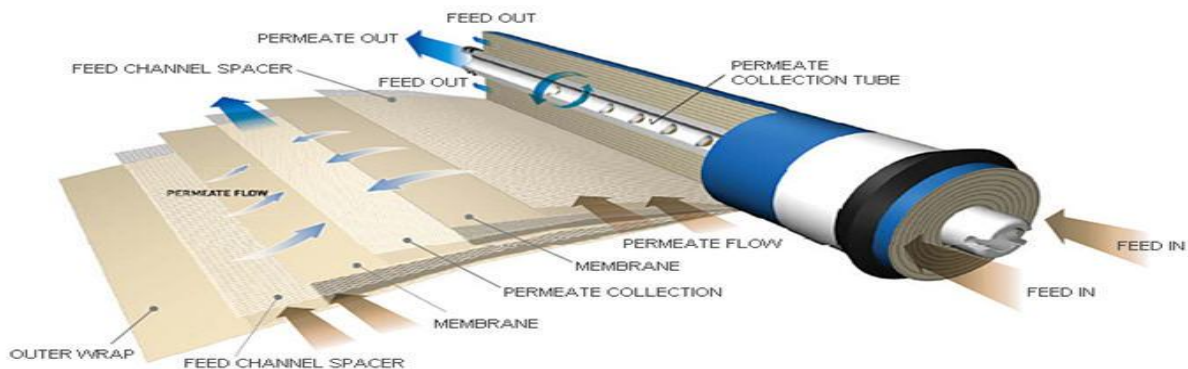


Figure 1.5 Schéma de principe de la membrane d'osmose inverse

### 1.2.2.2 Procédé de l'électrodialyse

Le procédé de dessalement par l'électrodialyse (ED) est une la deuxième forme des techniques membranaires. C'est unité qui se compose de plusieurs centaines des paires de cellules liées entre elles par des électrodes à l'extérieur semblable à une pile à membrane. L'eau d'alimentation passe simultanément à travers les cellules pour fournir un écoulement parallèle en continu de l'eau dessalée (permeat) et de la saumure qui se dégage de la pile comme illustré par la Figure 1. 6 .Le processus d'ED est seulement économique lorsqu'il est utilisé sur l'eau saumâtre, et il tend à être plus économique avec des eaux à salinité très réduite..

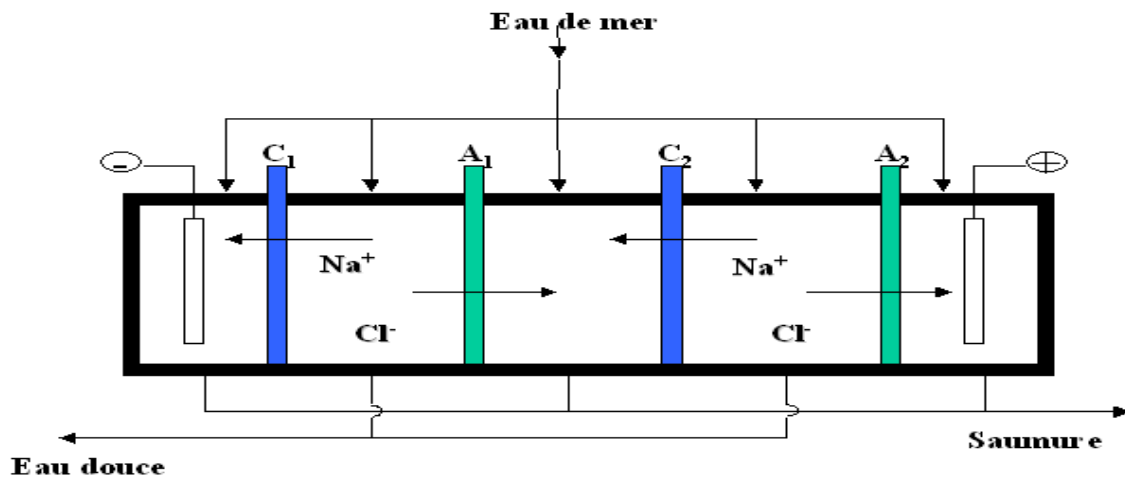


Figure 1.6 Schéma de principe de l'électrodialyse

### 1.3 Etat de l'art des procédés de dessalement associés aux énergies renouvelables (solaire/éolien)

L'utilisation des technologies de dessalement entraînées par les sources d'énergie renouvelable est un moyen appliqué dans de nombreux endroits aujourd'hui pour produire de l'eau douce. Ces technologies améliorent de plus en plus leurs performances avec le développement continu des sources d'énergie renouvelable qui présentent l'unique alternative d'alimenter les systèmes de dessalement dans les régions isolées et où le dessalement est nécessaire. La figure 1.7 montre les différentes combinaisons possibles des systèmes solaires et éoliens avec les processus de dessalement[6]

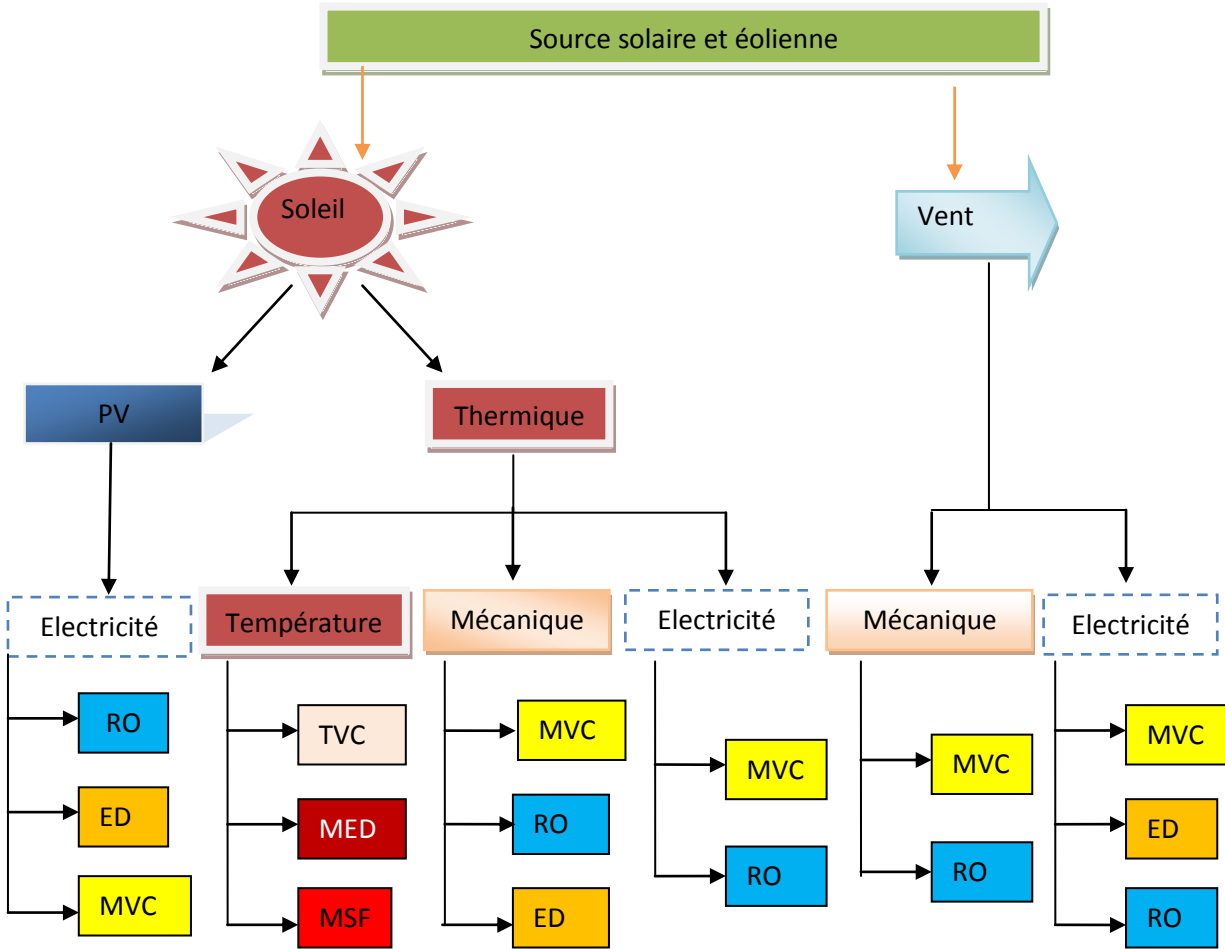


Figure 1.7 Différentes combinaisons possibles

L'adaptation appropriée d'un système de dessalement à une source d'énergie est en fonction de sa capacité de fournir un approvisionnement satisfaisant en eau à un coût raisonnable. Aussi, la sélection de la combinaison appropriée dépend d'un certain nombre de facteurs: quantité d'eau à dessaler (capacité de l'installation), la salinité d'eau d'alimentation, l'éloignement et la disponibilité de l'électricité du réseau, l'infrastructure technique, et le type et le potentiel de la ressource locale d'énergie renouvelable. En particulier, l'association des deux technologies est actuellement prometteuse pour les régions éloignées, où la connexion au réseau électrique public est coûteuse ou indisponible. Les systèmes d'approvisionnement en électricité dans des endroits isolés sont maintenant prouvés technologiquement. Le tableau 1.1 résume les combinaisons les plus prometteuses de ressources solaires et éoliennes avec des technologies de dessalement[7]. Pour un système hybride solaire/éolien entraînant un dispositif électromécanique, les processus de dessalement convenables sont RO, ED et MVC.

Sources d'énergie	Processus de dessalement				
	MSF	MED	VC	RO	ED
éolien			x	x	
Solaire photovoltaïque				x	x
Solaire thermique	x	x			

Tableau 1.1: Association convenables des procédés de dessalement avec l'énergie solaire et éolienne.

Considérant les installations par capacité de production, le processus membranaire est le leader du marché. En effet le dessalement par l'osmose inverse (RO), représente 62% de la capacité totale suivi par le processus thermique : Multi stages flash (MSF) et MD avec 24% de la capacité totale. Les 16% restants sont divisés entre les autres procédés, comme l'électrodialyse (ED) avec 5% et compression de vapeur (VC) avec 5%, et les procédés, et d'autres systèmes à conception récente avec 4% [2]. Les principales sources d'eau d'alimentation pour le dessalement sont l'eau de mer (58%), eau souterraine saumâtre (23%), et d'autres sources telles que rivières et petits lacs de sel. Le solaire est actuellement le plus sollicité dans les applications de dessalement par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable comme il est illustré par la figure 1.8.

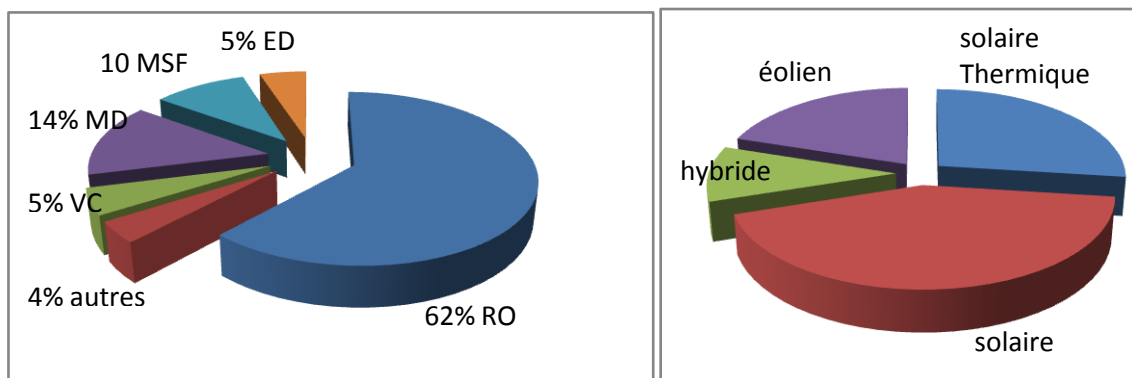


Figure 1.8 Parts des processus de dessalement et sources d'énergie renouvelable

### 1.3.1 Couplage de la source éolienne avec le procédé d'osmose inverse.

La faisabilité des systèmes de dessalement d'osmose inverse combinée aux sources d'énergie renouvelable a été démontrée dans des études antérieures [8-9-10]. Les sources d'énergie solaire et éolienne sont les plus pratiquées dans ce domaine (19% éolien-RO, 32% PV-RO). La figure ci-après schématise le principe d'une unité de dessalement à osmose inverse alimentée par une turbine éolienne et raccordée au réseau électrique.

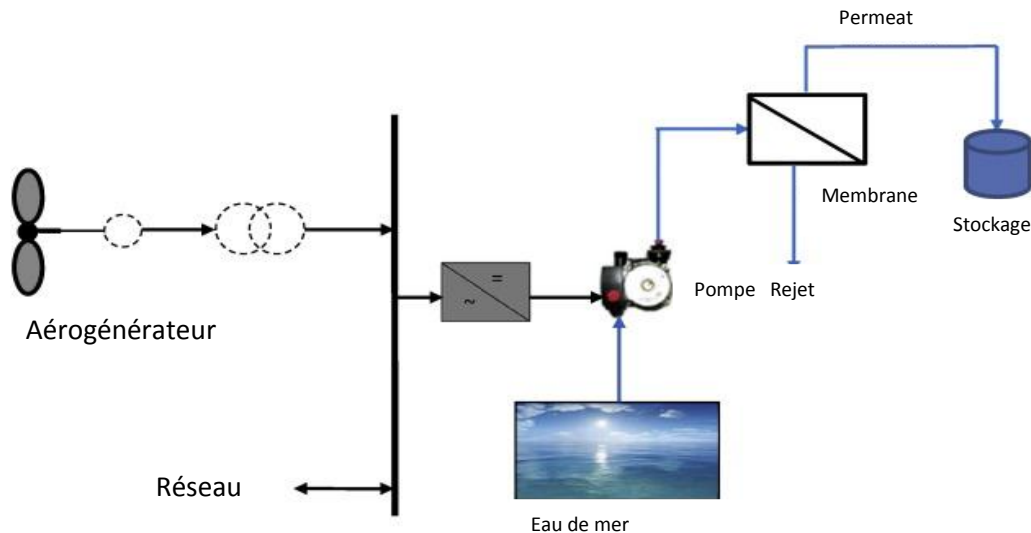


Figure 1.9 Unité de dessalement alimentée par une source éolienne raccordée au réseau

La France et l'Espagne ont été parmi les premiers pays en Europe à encourager les usines de dessalement éolien-RO. En 1982, une installation éolien-RO avec une capacité de 500 L / H a été installée en Ile du Planier en France. Deux ans plus tard, une autre usine éolien-RO a été installée dans les îles Canaries en Espagne avec une capacité de production de 200 m<sup>3</sup> / j pour et 42 KW de puissance nominale [10]. Dans cette première installation la puissance de la source éolienne a été associée au réseau électrique et à des batteries pour alimenter l'usine de dessalement RO. Cependant, Carta et al furent parmi les premiers qui démontrent expérimentalement l'usine éolien-RO fonctionnant sous la source d'énergie éolienne variable. Ils ont étudié un prototype de dessalement éolien-RO déconnecté du réseau installé dans les îles Canaries fonctionnant à 230 KW de puissance nominale. Le débit d'eau produite est de 200 m<sup>3</sup>/h. Une stratégie de contrôle automatique de fonctionnement est utilisée basée sur la connexion / déconnexion de la charge [11]. Aussi, Miranda et Infield ont développé et testé une unité RO entraînée par un générateur éolien de 2,5 KW sans batteries avec une capacité de production d'eau de 500 l / heure [12]. L'effet de la source de puissance variable sur les membranes d'osmose inverse a été étudié précisément par certains auteurs

[13-15-16]. Cependant, c'était Feron [14], dans un document antérieur, le premier à signaler le concept de fenêtre de fonctionnement sûr (SOW) pour les membranes d'osmose inverse, où les limites de fonctionnement de la membrane sont considérées. Dans un travail de recherche récent, Park et al ont étudié l'effet des variations de la vitesse du vent sur les performances des membranes RO qui étaient inconnues avant [17-18]. Ils ont confirmé le non-effet par la variation de la puissance sur la concentration en NaCl du flux du permeat (une plage d'oscillation de 0 à 0,6 a été testée).

Il y a deux problèmes fondamentaux rencontrés dans les installations éolien-RO. Le problème de conception d'une configuration optimale considérant la capacité des membranes et celle de la turbine éolienne à installer tenant en compte les conditions d'exploitation de l'usine telle que la capacité de production spécifique et les caractéristiques du vent de la région. Le second problème est le fonctionnement de l'installation à puissance variable (Principalement en raison des fluctuations de la source) en respectant les limites de fonctionnement des membranes d'osmose inverse[19].

Les avantages et les inconvénients de cette association qu'on peut tirer de la littérature sont les suivants :

Avantages :

- ✓ Cout compétitif d'eau produite dans les régions ventées
- ✓ Très approprié pour les îles qui ne disposent que de l'énergie éolienne
- ✓ Cout de maintenance réduit

Inconvénients :

- ✓ Source d'énergie intermittente
- ✓ Dispositif de commande nécessaire
- ✓ Cout d'eau surélevé dans les régions à potentiel d'énergie éolienne faible

### **1.3.2 Energie solaire associée au procédé RO.**

La conception mise en œuvre dans les systèmes de dessalement PV-RO est une combinaison de membranes d'osmose inverse et des modules photovoltaïque(PV). La large utilisation de cette association est probablement due au fait que l'énergie photovoltaïque est la première à avoir conquis le marché, ils constituent le marché le plus dynamique. Dans les



installations de dessalement PV-RO, les PV servent à alimenter avec ou sans régulation les pompes qui génèrent la pression requise pour alimenter en eau salée les membranes d'osmose inverse. La figure 1.10 schématise le principe de cette association.

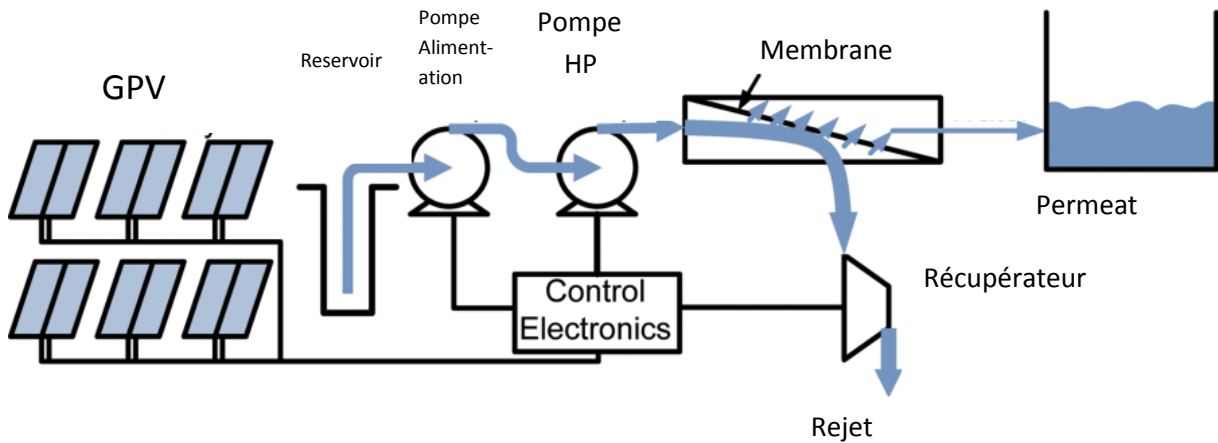


Figure 1.10 Schéma de principe d'une unité PV-RO

La combinaison potentielle de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) à l'osmose inverse a généré un intérêt croissant en raison de la simplicité inhérente de ces deux technologies. De nombreuses installations ont été démontrées à travers le monde, en particulier dans les zones rurales pour les petites capacités de dessalement de l'ordre de 1-5 m<sup>3</sup>/ Jour.

Les systèmes d'osmose inverse alimentés par les panneaux photovoltaïques (PV) ont été mis en œuvre par exemple dans les régions éloignées du désert égyptien [20], les zones rurales de la Jordanie [21], et les communautés éloignées en Australie. La mise en œuvre des systèmes d'osmose inverse alimentés par PV a également été évaluée en Agrigente et en Sicile. La figure 1.11 nous permet de voir des exemples d'unités d'osmose inverse alimentées par des panneaux solaires dans la région de la méditerranée [22].

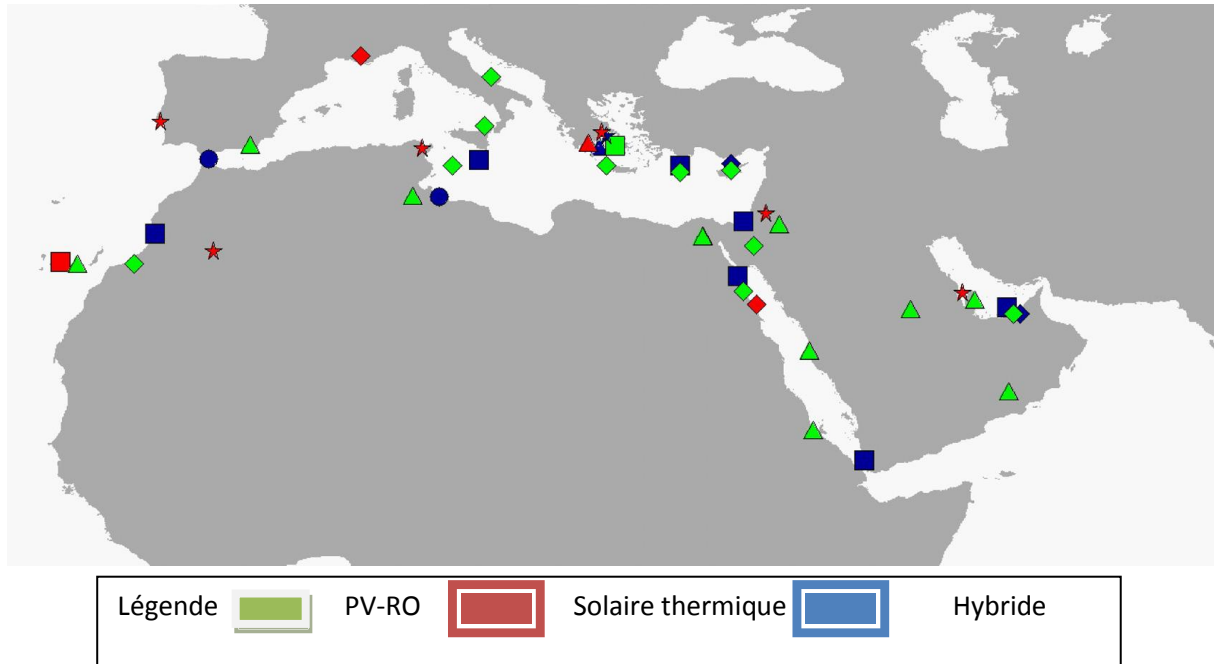


Figure 1. 11 Répartition géographique des systèmes solaires - RO dans le bassin méditerranéen

### 1.3.4 Systèmes de dessalement hybrides (solaire/éolien)

Les usines de dessalement RO hybrides sont conçues pour combiner la puissance des technologies solaires avec l'énergie électrique à partir d'autres sources d'énergie renouvelable (par exemple le vent, les générateurs à carburant et le réseau électrique). La puissance générée par la source auxiliaire peut être utilisée pour augmenter le nombre d'heures de fonctionnement par jour ou comme sauvegarde pour assurer un fonctionnement stable pendant les périodes de rayonnement solaire faible ou intermittente. Le tableau 1.2 illustre certaines caractéristiques de base de plusieurs systèmes de RO solaires hybrides dans quelques pays arabes..

Plusieurs systèmes dans le tableau 1.2 ont été conçus pour exploiter les aspects complémentaires de deux sources d'énergie renouvelables, le vent et le rayonnement solaire, avec ou sans stockage à partir de générateurs de puissance du réseau ou combustibles classiques. Des unités expérimentales construites en Grèce ont démontré la faisabilité technique du concept et de la possibilité d'une opération à long terme avec un minimum d'entretien. Les deux systèmes atteignent le fonctionnement du système stable en utilisant les batteries comme éléments de stockage.

Les données techniques des installations de dessalement du tableau 1.2 nous montrent bien que l'hybridation solaire-éolien associée au processus d'osmose inverse est techniquement très prometteuse en terme de coût.

pays	Source	Production m <sup>3</sup> /j	Cout (\$/m3)
Abu Dhabi	PV + carburant	20	7.2
Grèce	PV+ éolien	0.8	0.9
Libye	PV+éolien +réseau	300	0.9
Espagne	PV+éolien	150	0.9
chypre	PV+Réseau	50.4	0.9
Italie	PV+ carburant	5	6.8
Australie	PV+carburant	1	31.8

Tableau 1.2 Exemples d'installations de dessalement hybride dans le monde[22]

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre a été présenté un état de l'art des systèmes de dessalement associés aux source d'énergie renouvelable notamment solaire et éolienne ainsi que les systèmes hybrides dans la littérature. Nous avons vu que les systèmes de dessalement alimentée par les source d'énergie renouvelables existent sous différentes architectures à une seule source d'énergie tel que les panneaux photovoltaïques et les éoliennes mais qu'il était aussi possible d'hybrider ces systèmes avec ou sans éléments de stockage. Par ailleurs, nous avons présenté les données techniques de cette technologie dans certains pays du monde en remarquant que l'Algérie ne s'est pas encore orientée vers le dessalement via les sources renouvelables qui abondent en Algérie.

Ce chapitre nous a donc permis de fixer notre choix sur la structure du système à étudier : un système de dessalement déconnecté du réseau, destiné à alimenter un site algérien. Il sera en effet composé d'un groupe de panneaux photovoltaïques, d'une éolienne domestique et d'un banc de batteries Lithium-ion. Nous avons également choisi les membranes d'osmose inverse comme processus de dessalement. Ce choix est paramétré : d'une part par la nécessité de combler les lacunes d'intermittence des sources d'énergie solaire et éolienne et d'autre part pour assurer la continuité de la production du système en période de déficit de puissance des sources renouvelables par l'usage des batteries. Quant au choix de dessalement par osmose inverse , c'est le développement et les couts réduits de cette

technologie qui justifie ce choix. Cependant l'optimisation du système nécessite la synthèse de stratégies de commandes qui nécessite en premier lieu une modélisation adaptée qui sera développée dans le chapitre suivant.

## chapitre II

---

### CONCEPTION ET MODELISATION DU SYSTEME DE DESSALEMENT HYBRIDE

## 2.1 Introduction

Le précédent chapitre a permis la conception du modèle de dessalement parmi d'autres entraînées par les sources d'énergie renouvelable, notamment le solaire et l'éolien. Suite aux arguments apportés, nous décidons de centrer notre étude sur un système composé de deux sources à puissances finies : un générateur photovoltaïque, et un générateur éolien, appuyés par des batteries pour alimenter une unité de dessalement à osmose inverse. L'objet de ce chapitre est de présenter en détail cette architecture. Il nous faudra ensuite développer une modélisation réaliste pour les entrées exogènes mises en jeu, en décrivant le plus fidèlement possible, d'une part le comportement des panneaux photovoltaïques en fonction de l'ensoleillement et de la température ambiante, en plus du couple généré par la turbine de l'éolienne sous l'effet de la vitesse du vent, et d'autre part le comportement des batteries Lithium-Ion comme élément de stockage. Les modèles de la pompe et la membrane d'osmose inverse sont également développés. L'ensemble de ces connaissances nous permettra la synthèse des approches de contrôle de tout le système. Des simulations basées sur les modèles mathématiques seront développés sous Simulink pour ces différents modules, ainsi que pour le système complet.

## 2.2 Architecture du système

### 2.2.1 Définition et choix de l'architecture

Cette étude porte sur un système de dessalement à osmose inverse alimenté par une source d'énergie renouvelable hybride. L'intérêt d'hybridation des différents types de sources est d'assurer la continuité de production de l'unité de dessalement qui s'avère sensible à l'intermittence d'une seule source renouvelable. En effet, la production photovoltaïque suit toujours une parabole au cours de la journée et s'annule durant la nuit. Par ailleurs, son amplitude varie selon les conditions météorologiques, et selon les saisons. Aussi, elle est extrêmement variable à court terme durant les jours nuageux sous l'effet d'un ombrage partiel ou total. La source éolienne est aussi caractérisée par une production d'énergie variable durant l'année. Sa production est fortement liée aux conditions météorologique et les vitesses de vent disponibles durant l'année sans négliger les moments de calme qui peuvent intervenir imprévisiblement. Il est donc nécessaire d'intégrer au système de puissance des unités de stockage pour servir de "tampon" entre la production et la demande. Les technologies actuelles nous amènent à proposer pour stockage principal un banc de batteries Lithium-Ion.

Finalement, pour assurer les objectifs d'autonomie énergétique, la conception finale du système d'étude, schématisé en figure 2.1 se présente comme suit:

- a- Un générateur éolien composé d'une turbine entraînant une machine synchrone à aimant permanent fonctionnant en mode générateur débitant sur un convertisseur AC-DC raccordé au bus continu
- b- Un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC raccordé au même bus continu
- c- des batteries associées à un convertisseur DC-DC réversible en courant, raccordé au même nœud
- d- un moteur synchrone à aimant permanent alimenté par un convertisseur DC-AC et qui sert à entraîner une pompe haute pression (HP).
- e- une pompe haute pression.
- f- Un module d'osmose inverse(RO)

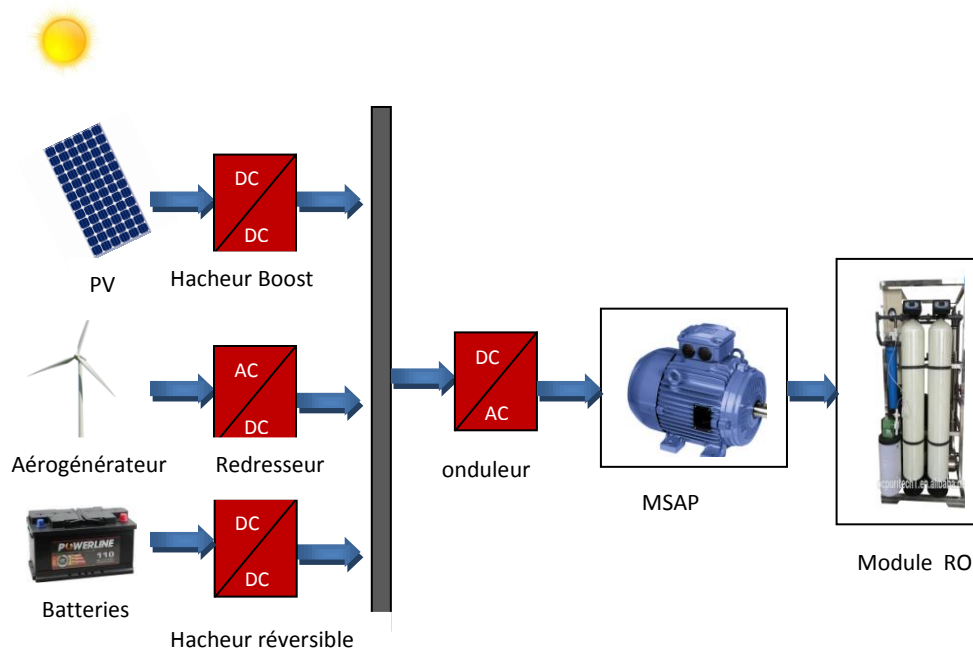


Figure 2.1 Synoptique du système hybride de dessalement à osmose inverse

### 2.3 -Présentation du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque constitué d'un ensemble de panneaux, montées en série et en parallèle est connecté à un hacheur boost à liaison directe, qui transmet la puissance

produite  $P_{pv}$  au bus continu. La tension  $V_{pv}$  aux bornes du GPV, et le courant  $I_{pv}$  débité, suivant une caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  qui dépend des entrées exogènes, qui sont l'irradiation solaire  $I_r$ , et la température atmosphérique  $T_a$ . Un schéma typique du système photovoltaïque connecté à une charge autonome est représenté sur la figure 2.2. Le bloc de commande dit : MPPT permet l'extraction du maximum de la puissance extraite via un algorithme de recherche d'extremum (ESC)

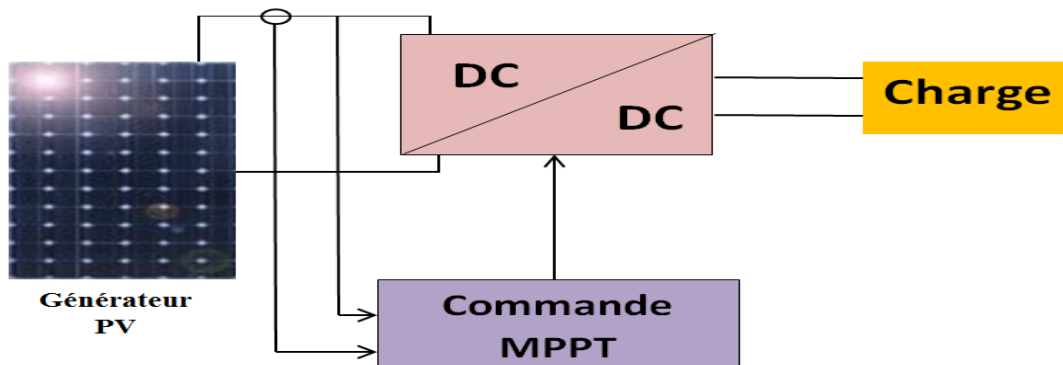


Figure 2.2 schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC)

### 2.3.1 -Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque comportant  $n_s$  panneaux en série et  $n_p$  branches en parallèle, formant ainsi une matrice de  $(n_s \times n_p)$  modules possède à ses bornes une tension  $V_{pv} = N_s V_p$  et débite un courant  $I_{pv} = N_p I_p$ . Le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque d'un module peut être décrit avec une bonne précision par le circuit équivalent dit à "une diode" [23], dont le schéma de principe est détaillé dans la figure 2.3. Il est composé d'une source de courant photovoltaïque  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode et une résistance shunt  $R_p$  et une deuxième résistance en série  $R_s$ .

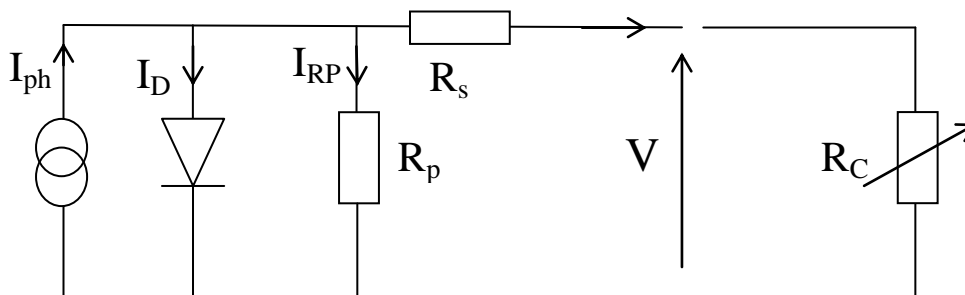


Figure 2.3 Modèle à "une-diode" d'une cellule photovoltaïque



L'équation caractéristique d'une cellule reliant son courant  $I$  à sa tension  $V$  est de la forme :

$$I = I_{PH} - I_0 \left[ e^{\frac{V+R_S I}{V_T}} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Où:

$I_{PH}$  : photo courant, proportionnel au flux incident.

$I_{Rp}$ : courant traversant la résistance  $R_p$ ,

$I_D$ : Le courant dans la diode, dit d'obscurité:

$I_{PH}$  quant à lui le courant photovoltaïque généré à partir de l'irradiation solaire  $I_r$  que reçoivent les panneaux. Ces paramètres peuvent être précisés en étudiant le comportement thermique de la cellule. Ce dernier est synthétisé par la température nominale de fonctionnement, dite : (NOCT), et la température ambiante  $T_a$ . La température nominale (NOCT) est définie comme la température atteinte par les cellules en circuit ouvert dans un module avec un éclairement équivalent à  $800 \text{ W / m}^2$  à une température ambiante de  $20^\circ \text{C}$  et une vitesse du vent de  $1 \text{ m / s}$ , et qui peut varier entre  $33^\circ \text{C}$  et  $58^\circ \text{C}$ . la valeur typique de ce paramètre est considérée égale à  $47^\circ \text{C}$ . L'expression de température du module peut être déterminée à partir de la température ambiante et le température nominale de fonctionnement par l'expression suivante: [24-25]:

$$T_c = T_a + \frac{I_r}{800} (NOCT - 800) \quad (2.3)$$

Cette formule statique n'est qu'approximative, car elle ne tient pas compte du comportement thermique dynamique des cellules. Elle sera cependant considérée comme satisfaisante dans le cadre de notre étude.

L'estimation de  $T_c$  permet de calculer certains paramètres internes. Ainsi, le courant photovoltaïque  $I_{PH}$  est défini par :

$$I_{PH} = \frac{I_r}{100} I_{PH0} + \frac{\partial I_{pv}}{\partial T_c} (T_c - 25) \quad (2.4)$$

où  $I_{PH0}$  est une constante proche de la valeur de court-circuit  $I_{cc}$  des panneaux, et où la dérivée en température du courant est fournie par le constructeur. Par ailleurs les paramètres de la diode sont donnés par [26] :

$$\begin{cases} V_T = \frac{T_c K_b}{q} \\ I_o = I_{so} \left( \frac{273 + T_c}{298} \right)^3 \exp \left( -\frac{E_{gap}}{K_b} \left( \frac{1}{273 + T_c} - \frac{1}{98} \right) \right) \end{cases} \quad (2.5)$$

Finalemnt, à partir de l'équation (2.1) complètement paramétrée, nous pouvons en déduire l'expression du courant total  $I_{pv}$  en fonction de la tension de sortie  $V_{pv}$  :

$$I_{pv} = N_p \left[ I_{PH} - I_s \left( e^{\frac{1}{V_T} \left( \frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_{spv} I_{pv}}{N_p} \right)} - 1 \right) \right] - \frac{N_p V_{pv}}{N_s R_{sh}} - \frac{R_{spv} I_{pv}}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

L'équation (2.6) peut être finalement écrite sous cette dernière forme:

$$I_{pv} = N_p \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_{spv}} \left[ I_{PH} - I_s \left( e^{\frac{1}{V_T} \left( \frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_{spv} I_{pv}}{N_p} \right)} - 1 \right) \right] - \frac{N_p V_{pv}}{N_s (R_{sh} + R_{spv})} \quad (2.7)$$

Cette expression permet de déduire les caractéristiques courant-tension et puissance-tension des panneaux, en fonction de l'ensoleillement et de la température, comme présentées dans les figures 2.4 et 2.5.

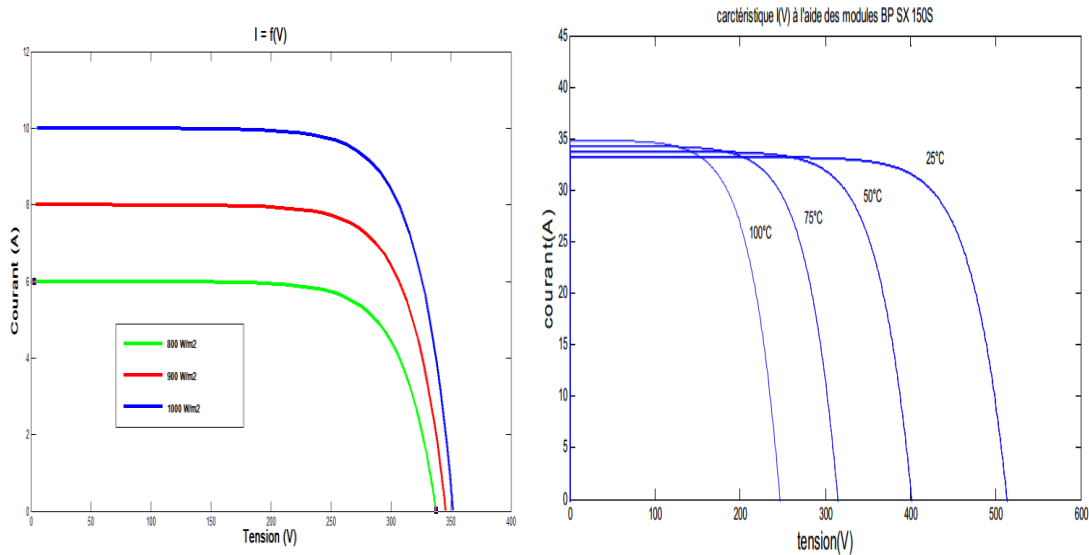


Figure 2.4 – Caractéristique tension-courant  $V_{pv}(I_{pv})$  du panneau photovoltaïque, (a) pour différents ensoleillement  $I_r$  à  $25^\circ \text{C}$ , (b) pour différentes températures atmosphériques  $T_{atm}$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

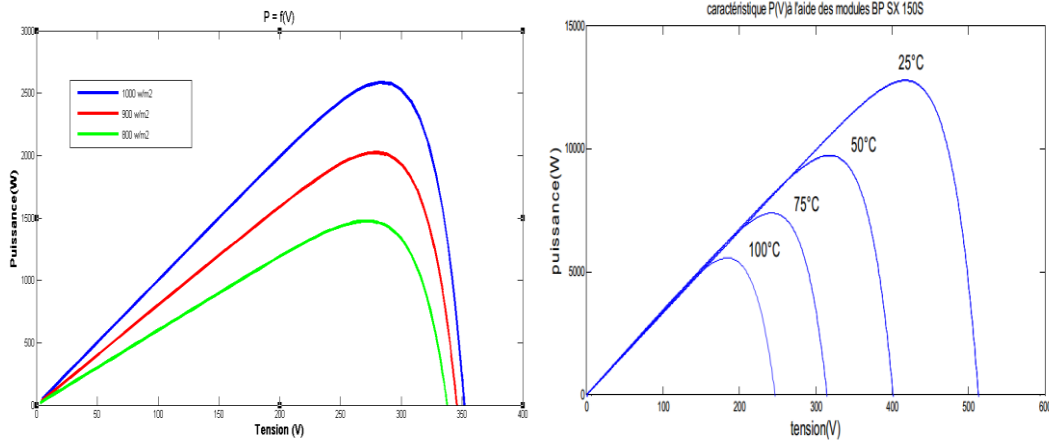


Figure.2.5. Caractéristiques(I-V) et(P-V) du module pour différentes valeurs de température à  $E= 1000W/m^2$

### 2.4 Modélisation de la batterie Ion-Lithium

Nous avons choisi pour unité de stockage principale un banc de batteries Ion-Lit qui sont connecté via un convertisseur réversible au bus continu. Nous devons définir une modélisation de ces batteries pour les besoins des simulations, mais aussi pour la synthèse de des lois de commande de tout le système. Un modèle équivalent pour un élément de batterie Li-Ion est présenté dans la figure 2.6. Il est composé d'une source idéale de tension  $V_{Be}$  en série avec une résistance  $r_i$ . L'ensemble est en parallèle avec une capacité  $C_{DL}$  et en série avec une deuxième résistance  $r_{HF}$  [27-28].

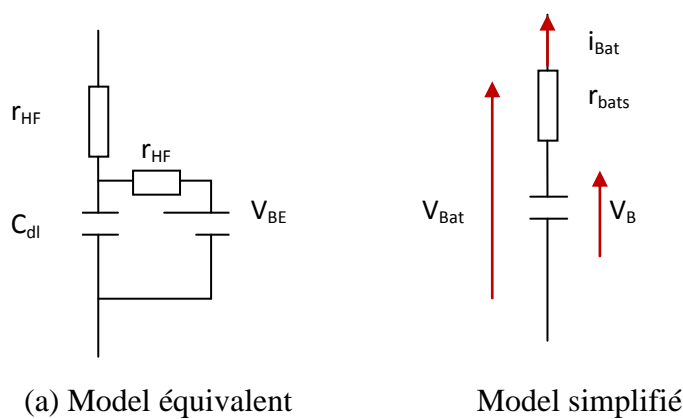


Figure 2.6 Model d'un élément de batterie LI-Ion

Une expression plus simple définie par un modèle proche constitué d'une source de tension équivalente  $V_B$  en série avec une résistance  $R_b$ , comme décrit la figure 2.6-b peut être utilisée aussi.

La tension de charge est déduite de la tension à vide par l'équation suivante:

$$V_{bat} = V_B - r_{bats} i_{bat} \quad (2.8)$$

Lors du fonctionnement des batteries, le gestionnaire d'énergie développé dans le chapitre 4 doit à tout instant identifier l'état de charge de la batterie (SOC :state of charge) déduite à partir de la profondeur de décharge (DOD: deep of discharge) des batterie par l'équation suivante:

$$SOC=1-DOD \quad (2.9)$$

Nous pouvons trouver dans la littératures le modèle mathématique

## 2.5 Présentation du générateur éolien

Le sous-système éolien qui absorbe la puissance mécanique fournie par le vent est constitué d'une turbine éolienne. Nous faisons le choix d'utiliser une turbine à axe horizontal qui génère un couple aérodynamique qui va entraîner le rotor à la vitesse angulaire d'une générateur synchrone à aimant permanent qui constitue le deuxième sous-système. Pendant son fonctionnement à vitesse variable la GSAP va produire en réaction, à la fois un couple électromagnétique résistant  $Tem$ , et les courants triphasés  $[Ia, Ib, Ic]T$ . Les trois phases de la machine sont connectées à un onduleur de tension à Modulation par Largeur d'Impulsion (MLI), L' onduleur peut contrôler les courants des phases respectives  $[Ia, Ib, Ic]T$  sous les tensions simples  $[Va, Vb, Vc]T$ , afin d'agir sur la vitesse de rotation de cette grandeur.

### 2.5.1 Modélisation de la turbine éolienne

#### 2.5.1.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales non orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique MSAP (figure 2.7). [29]

### 2.5.1.2 Modélisation de la turbine

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  balayée par les pales de la turbine comme présenté dans la figure 2.7[30].

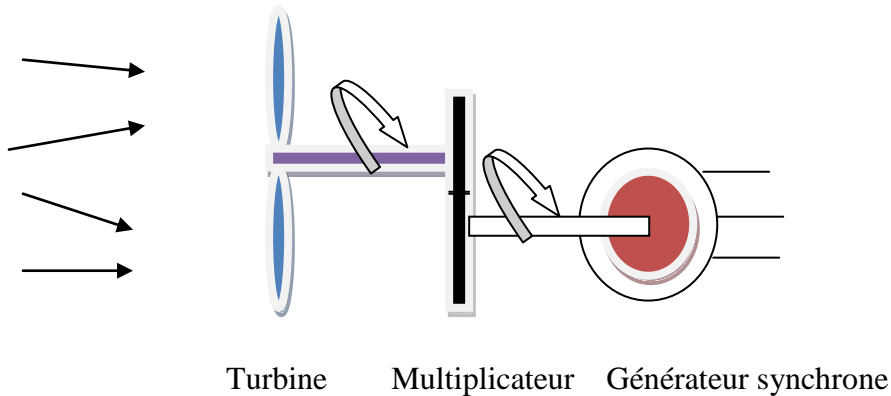


Figure 2.7 – Composants d'un aérogénérateur

La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho St V^3 \quad (2.8)$$

Où:

- $\rho$  représente la masse volumique de l'air (approx 1.23 kg/m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique à 15°C),

- $V$  la vitesse du vent (m/s),

- $St$  la surface utile traversée par le vent et a pour expression:

$$St = \pi R_t^2 \quad (2.9)$$

Où:  $R_t$  représente le rayon de la pale (m).

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (Ratio)  $\lambda$  qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = R_t \times \frac{\Omega_{turbine}}{v} \quad (210)$$

Avec:

-  $\Omega_{turbine}$  la vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s).

En utilisant le coefficient de puissance  $C_p(\lambda)$ , la puissance aérodynamique est calculée ainsi:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V^3 C_p(\lambda) \quad (2.11)$$

Le coefficient de puissance  $CP(\lambda)$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Le coefficient  $CP$  ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de Betz  $Cplimite= 0.59$  :

Une turbine est typiquement caractérisée par sa courbe  $CP= f(\lambda)$

L'équation analytique de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour une éolienne de petite puissance choisie pour notre application est la suivante [31]:

$$CP(\lambda) = \frac{G0\lambda(\lambda_0 - \lambda)}{a^2 + (\lambda_0 - \lambda)^2} \quad (2.12)$$

Où les données caractéristiques  $G0$ ,  $a$ ,  $\lambda_0$  sont présentées en annexe.

La figure 2.8 représente le tracé de la caractéristique  $CP(\lambda)$  où apparaît un maximum de 0.4061 pour une vitesse réduite de 6.8.

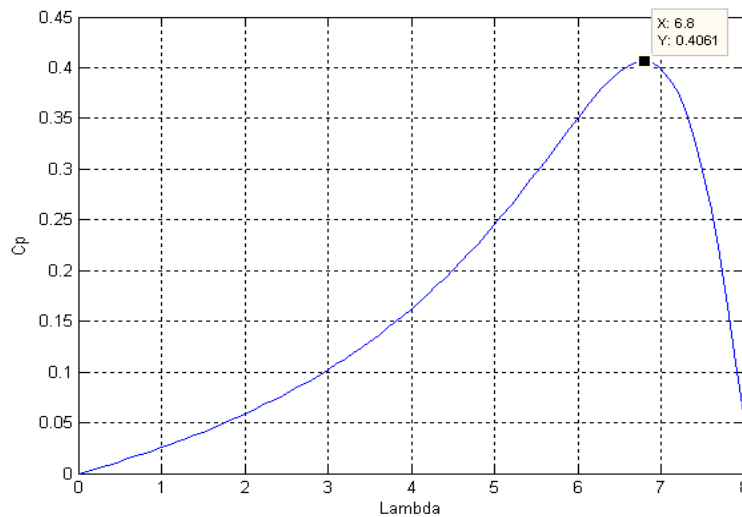


Figure 2.8 - Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

Le couple aérodynamique entraînant la génératrice s'écrit comme suit:

$$C_{aer} = P_{aer} / \Omega_{turbine} \quad (2.13)$$

En remplaçant (2.10) et (2.11) dans (2.13) on obtient:

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V^2 C_p(\lambda) / \lambda \quad (2.14)$$

### 2.5.1.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. C'est une sorte de boîte à vitesse qui a pour rôle l'augmentation de la vitesse de la génératrice afin qu'elle atteigne sa vitesse nominale (figure 2.6). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{GM} \quad (2.15)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{GM} \quad (2.16)$$

### 2.5.1.4 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et, qui comprend la masse des pales et celle du rotor. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie sommaire  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de celle de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{GM^2} + J_g \quad (2.17)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.18)$$

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_f$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - cf \quad (2.19)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$ :

$$cf = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.20)$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la (figure 2.9).

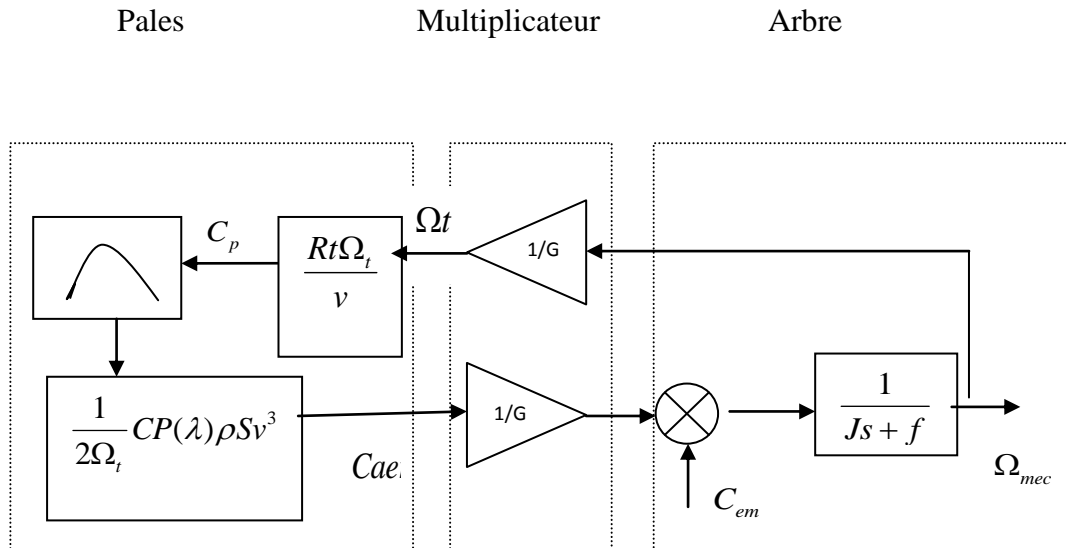


Figure 2.9 Schéma bloc du modèle de la turbine

## 2.6 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

### 2.6.1 Présentation de la machine synchrone.

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasé et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents. Alimentée à fréquence constante, leurs vitesses est synchrones avec le champ tournant et ne dépendent que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine. Ce type de machine possède un bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. En outre, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple/inertie, autorisant des accélérations élevées[32].

Inversement, lorsque l'arbre du rotor est entraîné à une certaine vitesse, le moteur fonctionne en mode générateur et génère des tensions triphasées au stator à une fréquence proportionnelle à la vitesse d'entraînement. Nous avons choisi pour notre application deux MSAP en mode moteur et générateur. Les modèles mathématiques ne diffèrent que par les signes positifs et négatifs des tensions. Par la suite, la modélisation mathématique en mode moteur sera présentée.



## 2.6.2 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, nous adopterons les hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

## 2.6.3 Mise en équation de la machine synchrone

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ses courants, nous considérons le modèle de la machine synchrone suivant:

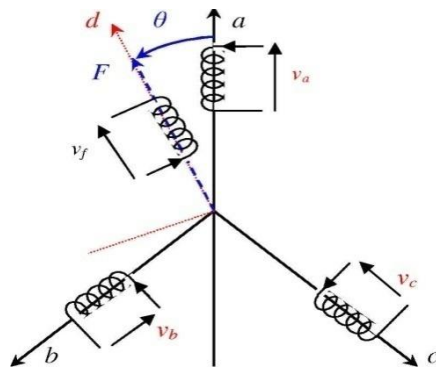


Figure 2.10 Schéma de la machine synchrone dans le repère abc.

A partir de la figure 2.10, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle :

- **Expression des tensions statoriques**

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (2.21)$$

- **Expression des flux statoriques**

$$[\varphi_s] = [L_{abc}] \cdot [i_s] + [\varphi_{sf}] \quad (2.22)$$

Où :

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad : \text{Vecteur tensions statoriques}$$

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad : \text{Vecteur courants statoriques}$$

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$  : Vecteur flux statoriques

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$  : Matrice résistance du stator

$[L_{abc}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$  : Matrice inductance du stator

$[\varphi_{sf}] = [\varphi_{af} \ \varphi_{bf} \ \varphi_{cf}]$  : Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

### 2.6.3.1 Application de la transformation de *Park*

La transformation de *Park* est souvent appelée transformation à deux axes. Physiquement, l'application de cette transformation à la MSAP correspond à une transformation des trois bobines (statoriques) à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes considérations ou aspects en termes de f.m.m, de flux, de couple ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle [33].

On définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux. Elle conserve l'invariance de la puissance et est orthogonale. De plus, on fait l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles. La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d,q) est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{dq0} \\ i_{dq0} \\ \varphi_{dq0} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} V_{abc} \\ I_{abc} \\ \varphi_{abc} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

tel que :

$[T]$  : est la matrice de *Park* normalisée, définie par :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

### 2.6.3.2 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère lié au rotor

La figure 2.11 illustre la schématisation de la machine synchrone à aimants permanents, biphasée, équivalente, issue de la transformation de *Park*.

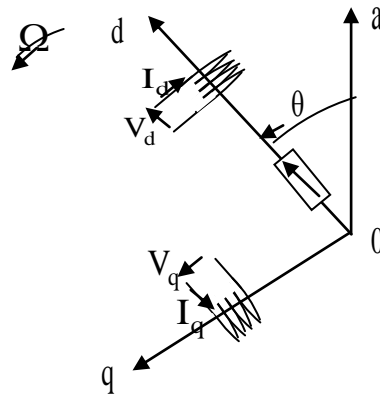


Figure 2.11 - Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).

En reportant les transformations dans les expressions des flux et tensions, on obtient :

#### a-Expressions des tensions

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \dot{\varphi}_d - w \varphi_q \quad (2.25)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \dot{\varphi}_q + w \varphi_d \quad (2.26)$$

avec :

$w = P\Omega$  tel que  $w, P, \Omega$  sont respectivement la pulsation des courants statoriques, le nombre de paire de pôles et la vitesse de rotation du rotor.

#### b-Expressions des flux

$$\begin{aligned} \varphi_d &= L_d i_d + \varphi_{sf} \\ \varphi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (2.27)$$

$\varphi_{sf}$  : Amplitude du flux total dû aux aimants et qui se ferme sur le stator.

En rapportant les équations (2.27) dans les équations (2.25) et (2.26), nous obtenons:

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_d \frac{dI_{sd}}{dt} - L_q w I_{sq} \quad (2.28)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_q \frac{dI_{sq}}{dt} + L_d w I_{sd} + \varphi_{sf} w \quad (2.29)$$

Le schéma équivalent de la MSAP en mode générateur sur l'axe d et l'axe q est représenté sur la figure 2.12

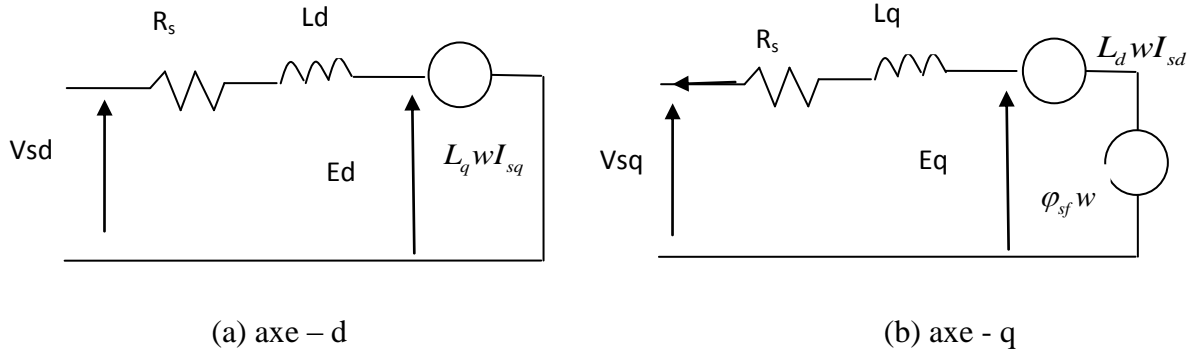


Figure 2.12 Modèle équivalent de la GSAP sur l'axe d-q

Dans la figure 2.12  $E_d$  et  $E_q$  représentent les FEM produites de l'axe direct et en quadrature respectivement et qu'on peut exprimer par:

$$E_d = -L_q \omega I_{sq} \quad (2.30)$$

$$E_q = L_d \omega I_{sq} + \varphi_{sf} \omega \quad (2.31)$$

### c-Expression du couple électromagnétique

La puissance électromagnétique de la GSAP s'exprime par:

$$P_m = E_d I_{sq} + E_q I_{sd} \quad (2.32)$$

Le couple électromagnétique se déduit par l'expression suivante:

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} \cdot P_m \quad (2.33)$$

Des équation (2.30),(2.31),(2.32)et (2.33), le couple électromagnétique dans le référentiel (d,q) est donné par l'expression suivante:

$$C_{em} = P[(L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_{sf} i_q] \quad (2.34)$$

Le premier terme de cette expression est du à la saillance de la machine, alors que le deuxième est dit : couple synchrone.

La GSAP considérée dans cette étude est à rotor lisse ( $L_d = L_q = L_s$ ). Alors, l'expression du couple magnétique se réduit à :

$$C_{em} = P \varphi_{sf} i_q \quad (2.35)$$

## 2.7 Modélisation des convertisseurs

Les convertisseurs DC-DC sont associés au GPV et aux batteries alors que les convertisseurs DC-AC et AC-DC sont associés à la SMAP en mode générateur et moteur. Ce sont au fait les même modèles mais en fonction réversible. Nous procédons par la suite à leur modélisation mathématiques.

### 2.7.1 Modèle du convertisseur alternatif-continu (AC – DC)

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI ), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [34]:

$$S = \begin{cases} 1, \bar{S} = 0 \\ 0, \bar{S} = 1 \end{cases} \quad (2.38)$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de:  $S_j$ ,  $U_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , supposés équilibrés:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.39)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par:

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b).U_{dc} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c).U_{dc} \\ U_{Sca} = (S_c - S_a).U_{dc} \end{cases} \quad (2.40)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Avec:

$$\begin{cases} U_{Sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} \\ U_{Sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} U_{dc} \\ U_{Sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} U_{dc} \end{cases} \quad (2.42)$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - I_L \quad (2.43)$$

L'association convertisseur, représentée par les équations électriques dans les coordonnées synchrones dq sont alors résumés ci-dessous :

$$e_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + U_{sd} \quad (2.44)$$

$$e_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d + U_{sq} \quad (2.45)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_d I_d + S_q I_q - I_L \quad (2.46)$$

Avec:

$$\begin{cases} S_d = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cdot \sin(\omega t) \\ S_q = \frac{1}{\sqrt{6}} (S_b - S_c) \cdot \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \cdot \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2.47)$$

La figure 2.13 schématise l'association du redresseur MLI à la GSAP.

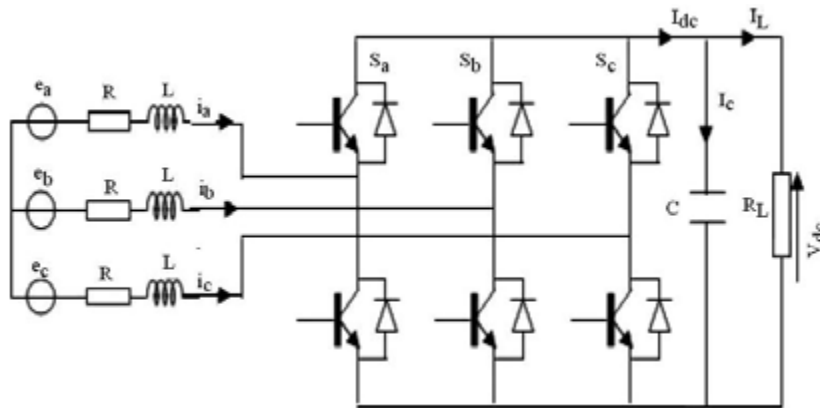


Figure 2.13 Schéma de l'association GSAP-Redresseur MLI

## 2.7.2 Modélisation statiques des convertisseurs DC-DC

Les convertisseur DC-DC associés au GPV et AUX batteries sont interconnectés au bus continu permettant lors de leur fonctionnement de contrôler les courants fournis par les sources. Vu leur mode de fonctionnement, ils sont à caractère non linéaire et peuvent être linéarités autour d'un point de fonctionnement en considérant leur model moyen.

### 2.7.2.1 Modélisation aux valeurs moyennes

Pour gérer l'excès et le déficit d'énergie lors du fonctionnement du système de dessalement, nous associons aux batteries un hacheur réversible en courant afin d' adapter la tension aux bornes du bus continu comme l'indique la Figure 2.14 [35]

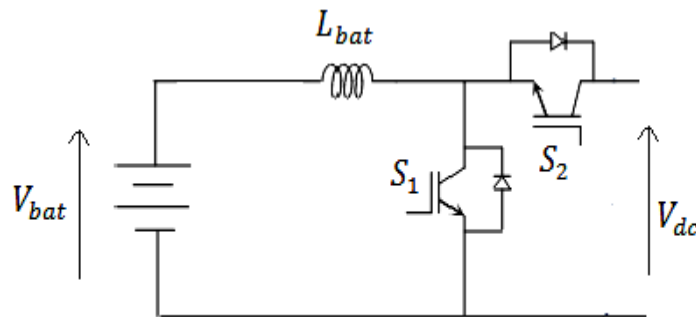


Figure 2.14 : Convertisseur bidirectionnel associé aux batteries

Le modèle moyen de ce convertisseur que nous avons adopté se présente comme suit:

On distingue les deux phases de commutation des IGBT dont leur états de commutations S1 et S2 fonctionnent inversement . Ainsi, la période de découpage ( $T_{pwm}$ ) est scindée en deux .

- Lors de la première phase de commutation  $S1=1$  et  $S2=0$  (Figure 2.15) :

L'équation dynamique de la tension de la batterie reliée à celle du bus continu est:

$$V_{bat} = L_{bat} \int \frac{di_{bat}}{dt} \quad (2.48)$$

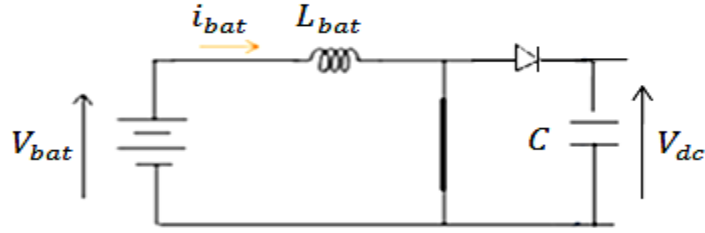


Figure 2.15 Schéma de la première séquence de commutation

- Lors de la deuxième séquence de commutation  $S1 = 0, S2 = 1$ :

La relation dynamique reliant tension de la batterie et le bus est donnée par :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + V_{dc} \quad (2.49)$$

La moyenne temporelle de ces deux équations donne ainsi un modèle moyen de ce convertisseur de la forme:

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} - (1 - \alpha_{bat}) V_{dc} \quad (2.50)$$

Le modèle de l'équation (2.50) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ( $i_b < 0$ ) et en décharge ( $i_b > 0$ ).

Sur le même principe, le hacheur survolteur associé au GPV est modélisé. Ainsi les équations suivantes régissent les comportements statiques des convertisseurs DC-DC ainsi que le bus continu.

$$\begin{cases} L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat}) V_{dc} - R_{bat} i_{bat} \\ L_{pv} \frac{di_{pv}}{dt} = V_{pv} - (1 - \alpha_{pv}) V_{dc} - R_{pv} i_{pv} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{batdc} + i_{pvdc} + i_{ch} \end{cases} \quad (2.51)$$

## 2.8 Modélisation de la pompe haute pression (HP)

Les applications d'osmose inverse utilisent généralement les pompes multicellulaires pour augmenter la pression de service afin de vaincre la pression osmotique du module RO. La vitesse mécanique transmise par le moteur synchrone à la pompe permet de transformer la vitesse de rotation du moteur en un débit d'eau à haute pression. Dans la présente étude, nous



utiliserons un modèle de pompe de marque Grundfos [36]. Le Modèle CNR 3 d'une puissance de 2.2 KW sera modélisé selon les données du constructeur. Ce choix a été adopté vu l'existence d'une unité d'osmose inverse à l'institut de développement de l'agriculture à Loutaya à Biskra. Les résultats du simulateur de la pompe peuvent être comparés à ceux de cette unité.

### 2.8.1 Présentation de La pompe Grundfos CRN 3-23

l'arbre de rotation de la MSAP raccordé à celui de la pompe actionne une roue à ailettes qui communique au fluide de l'énergie mécanique, transformée en énergie potentielle (représentée par la pression) et cinétique (représentée par le débit). Sur la figure 2.16 est représentée la pompe GRUNDFOS CRN2-23 (2.2KW) associée au moteur synchrone et dont les principaux constituants sont :

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



Figure 2.16 Pompe multicellulaire GRUNDFOS CRN 3-23

#### 2.8.1.1 Caractéristique Hauteur manométrique –Débit : $H(Q)$ de la pompe

Les pompes sont généralement caractérisées par leurs caractéristiques  $H(Q)$  représentant la charge hydraulique appliquée par le fluide sur la roue à aubes et  $Q$  ( $m^3/s$ ) est le débit de la pompe. La figure 2.17 représente les caractéristiques Pression-débit et puissance-débit fournies par le constructeur pour une fréquence de 50 Hz. A partir de ces données, nous procédons à une interpolation en utilisant l'instructions Matlab "polyfit" pour définir une interpolation polynomiale cubique pour définir l'équation reliant chaque couple de variables. L'instruction "polyval" permettra de déterminer le fonctionnement dynamique de la pompe lors de son fonctionnement.

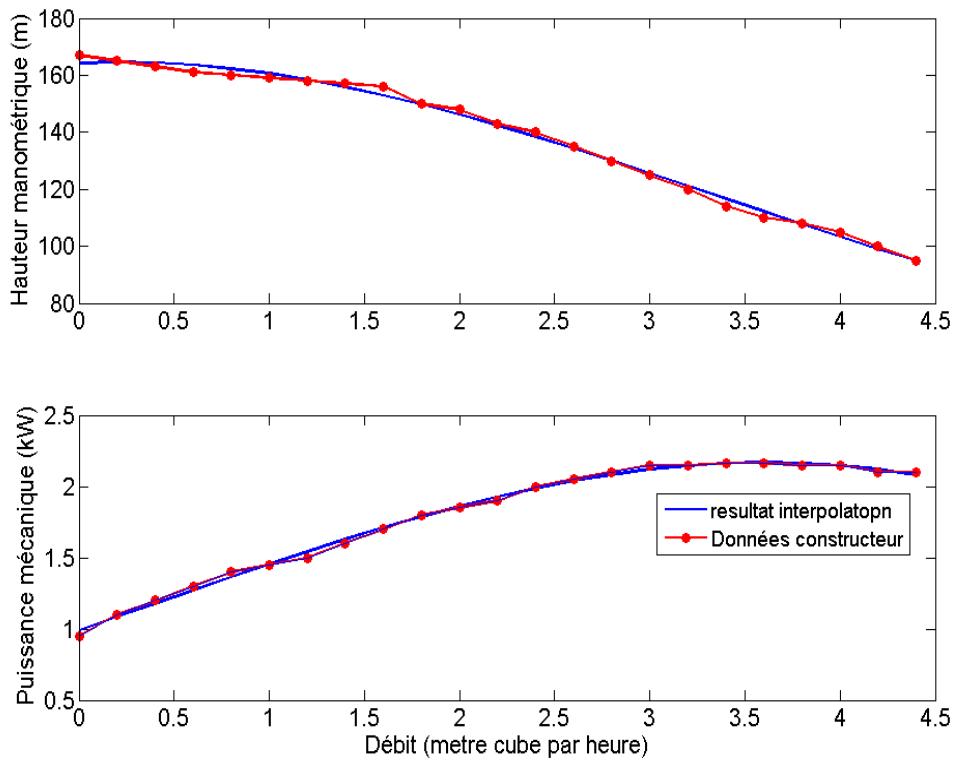


Figure 2.17 Résultat de l'interpolation des caractéristiques  $P_{res}$ - $Q$  et  $P_{m-p}$ - $Q$  de la pompe

Sur la même figure 2.14, nous pouvons constater les résultats de l'interpolation cubique qui indique le bon ajustement des courbes.

La relation reliant la pression au débit et la puissance transmise à la pompe au débit basé sur cette interpolation donne l'équation polynomiale cubique suivante:

$$\begin{cases} P_{res} = 0.75Q_f^3 - 7.66Q_f^2 + 3.35Q_f + 1.64 \\ P_{m-p} = -0.0141Q_f^3 + 0.0123Q_f^2 + 0.466Q_f + 0.99 \end{cases} \quad (2.52)$$

Tel que :

-  $P_{res}$  est la pression exercée par la pompe en metre manométrique

-  $Q_f$  est le débit à l'entrée du module RO en  $m^3/h$ .

-  $P_{m-p}$  est la puissance transmise à la pompe par la msap (kW)

Pour définir les changements dans la capacité de la pompe: la pression, la puissance et le débit quand un changement de vitesse est fait, nous adoptons les lois de similitude représentées par les équations suivantes[37]:

$$\begin{cases} Q_2 = Q_1 \left( \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right) \\ P_{res2} = P_{res1} \left( \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right)^2 \\ P_{m-p2} = P_{m-p1} \left( \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right)^3 \end{cases} \quad (2.53)$$

Le tableau suivant résume les paramètres de la pompe donnés par le constructeur[38]

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	2.2 Kw
Vitesse de rotation max	2000 tr/min
Hauteur manométrique max	170 m
Hauteur de fonctionnement	122.7 m
Débit de fonctionnement	3 m <sup>3</sup> /h
Rendement	58.5 %

Tableau 2.3 Données techniques de la pompe HP

Le couple de la pompe centrifuge qui représente le couple résistant à la msap est donné par [37]:

$$T_{rp} = aQ_f^2 + bQ_f \cdot \Omega \quad (2.53)$$

## 2.9 Modèle de la membrane d'osmose inverse

Il existe plusieurs modèles dans la littérature pour l'étude du comportement de la membrane lors de son fonctionnement [39]. Toutefois les deux grandes théories utilisées sont le modèle développé par Kimura et Sourirajan [40] qui tient compte des effets de convection à l'intérieur de la membrane et celui de Spiegler, Kedem et Katchalsky [41] qui ont utilisé une approche thermodynamique pour décrire le transport du solvant à l'intérieur de la membrane. On se contente du premier modèle qui sera présenté par la suite.

La membrane RO est une membrane semi perméable qui sépare le liquide sous le gradient de la pression. L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane à

travers le film semi-perméable qui ne laisse passer que les molécules d'eau. Une partie de la solution à traiter (débit  $Q_f$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes:

- Une partie (débit  $Q_p$ ) passe à travers la membrane (perméat)
- Une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrat ou rétentat) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane (figure 2.18).

Une grande partie de l'eau à dessaler sert au nettoyage de la membrane afin d'éviter son colmatage qui peut affecter le débit de l'eau produite.

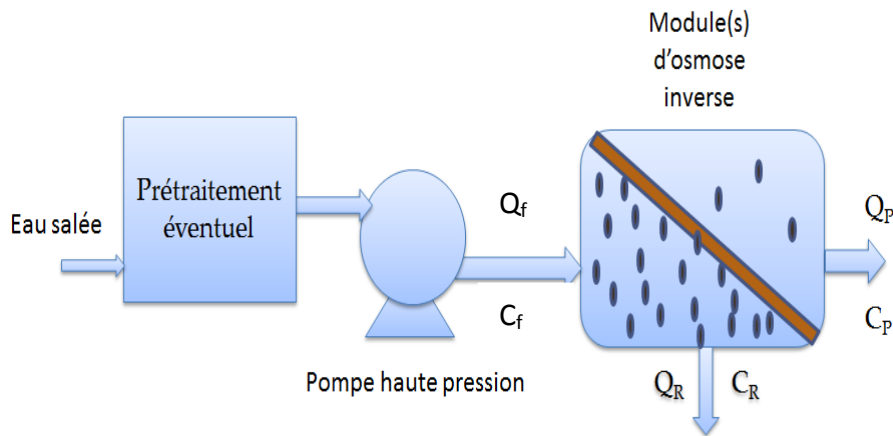


Figure 2.18 Diffusion de l'eau dans la membrane.

Le modèle choisi implique le modèle solution-diffusion cité dans la littérature et que nous avons utilisé dans des travaux antérieurs [42]. Ce modèle fait intervenir la solution – diffusion modèle qui tient en compte les deux paramètres du solvant (l'eau) et le soluté (ions) à la fois à la couche de surface de la membrane et qui diffusent à travers la membrane et qui sont la perméabilité de la membrane à l'eau (A) et la perméabilité de la membrane au soluté (B).

Le débit massique du perméat à travers la membrane est défini par [43] :

$$Q_p = J_w S_m \quad (2.54)$$

Avec  $Q_p$  le débit massique du perméat en  $K_g/s$ ,  $J_w$  le flux massique du perméat à travers la membrane en  $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$ ,  $J_s$  le flux massique des Sels à travers la membrane en  $K_g \cdot m^{-2} s^{-1}$  et  $S_m$  la surface active de la membrane en  $m^2$ .

Le bilan de masse de l'eau et des sels dans la membrane donne :

$$\begin{cases} Q_f = Q_p + Q_c \\ Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \end{cases} \quad (2.55)$$

Avec  $Q$  débit massique,  $C$  concentration en  $K_g$  de sel par  $K_g$  d'eau et les indices  $\{f,p,c\}$  renvoient respectivement à l'alimentation (feed en Anglais), perméat et concentrat.

Le de flux de masse du perméat  $J_w$  à travers la membrane est modélisée par la loi de Fick:

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.56)$$

Avec  $A$  la perméabilité de la membrane à l'eau en  $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ,  $\Delta P$  la pression transmembranaire exercée par la pompe en  $Pa$  et  $\Delta \pi$  la pression d'osmose en  $Pa$ .

Le flux de masse des Sels  $J_s$  à travers la membrane en tenant compte du phénomène de polarisation dû à la concentration élevée du solvant à la paroi de la membrane par rapport à la concentration à l'entrée et la sortie de la membrane est modélisée par :

$$J_s = B(C_w - C_p) \quad (2.57)$$

Avec  $B$  la perméabilité de la membrane aux Sels en  $K_g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,  $C_w$  la concentration de la masse des Sels à la paroi de la membrane en  $K_g$  de sel par  $K_g$  d'eau et  $C_p$  la concentration en Sels du perméat en  $K_g$  de sel par  $K_g$  d'eau.

L'hypothèse est faite que le flux de masse du soluté est égal au flux de masse du perméat multiplié par la concentration en sels du perméat :

$$J_s = J_w C_p \quad (2.58)$$

La difficulté de ce modèle qui tient en compte le phénomène de la polarisation a imposé la recherche d'approximations moins complexes pour étudier le comportement statique et dynamique de ce modèle. L'une de ces approche est celle développée par FILMTEC pour les membranes enroulées en spiral pour l'évaluation du facteur de polarisation basée sur les travaux Taylor et al [44]:

$$C_w - C_p = e^{k.R} \quad (2.59)$$

Avec,  $R$  le taux de recouvrement et  $k=0.7$  (une constante).

La pression transmembranaire en négligeant la pression due au perméat est définie par :

$$\Delta P = P - \frac{\Delta P_d}{2} \quad (2.60)$$

Tel que  $\Delta P_d$  représente la chute de pression le long du canal de la membrane et  $P$  la pression imposée par la pompe en  $Pa$ .

La chute de pression le long de la membrane est approximée par [45]

$$\Delta P_d = \delta \left[ \frac{Q_f + Q_c}{2\rho} \right]^\tau \quad (2.61)$$

Avec :  $\delta = 9.5 \times 10^8$  et  $\tau = 1.7$

La pression osmotique peut être approximée par la relation suivante dérivée de la loi de Van'tHoffen considérant que le NaCl:

$$\Delta \pi = K_{nacl} (T_{nacl} + 273) \frac{C_{nacl}}{1000 - \frac{C_{Nacl}}{1000}} \quad (2.62)$$

Où :  $-C_{nacl}$  est la concentration de l'eau à dessaler en sel (mg/l)

$-T_{nacl}$  est la température de la solution concentrée (°C)

$-K_{nacl}$  est la constante osmotique du NaCl ( $K_{nacl} = 2.6545 \text{ bar.l/}^\circ\text{k.g}$ )

Le coefficient de perméabilité à l'eau tenant compte de la température et le facteur de colmatage peut s'écrire ainsi :

$$A = A_{ref} \cdot TCF \cdot FF \quad (2.63)$$

Avec  $A_{ref}$  le facteur de perméabilité de référence de la membrane donné par le constructeur,  $TCF$  le facteur de correction de la température et  $FF$  (*Fouling Factor*) le facteur de colmatage qui tient compte du dépôt de quelques sels sur les pores de la membrane et qui varie entre 100% pour une nouvelle membrane et 80% pour 4 ans de fonctionnement.

Le facteur de correction de température est exprimée par :

$$TCF = \exp\left[\frac{e}{R_g} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2.64)$$

Avec  $T$  la température de l'eau en K,  $T_0$  la température de référence (298 K),  $R_g$  la constante des gaz parfaits ( $8.314 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) et  $e$  énergie d'activation de la membrane en  $\text{J.mol}^{-1}$  Approximée par la documentation technique de DOW par 25000 quand  $T < 298\text{K}$  et 22000 quand  $T > 298$  [45].

Un facteur important dans le procédé d'osmose inverse c'est le taux de recouvrement de la membrane qui est le rapport du débit d'eau produite sur le débit d'eau d'alimentation défini par:

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.65)$$

Un second facteur qui n'est pas moins important que le premier c'est la sélectivité d'une membrane définie par le taux de rejet  $Y$  (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane est censée retenir:

$$Y = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.65)$$

## **2.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, le système de dessalement hybride photovoltaïque /éolien /batteries a été présenté en détail et modélisé. Les comportements des sources d'énergie photovoltaïque et éolienne ont été décrits sous forme analytique, et les unités de stockage modélisés par leurs circuits électriques équivalents. Des simulateurs Simulink des différents éléments du système ont été développés et les caractéristiques obtenues pour chacun ont été présentés. Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois que les approches de commande pour l'optimisation du système seront suggérées au chapitre suivant.

## chapitre III

---

RESSOURCES SOLAIRES ET EOLIENNES ET  
DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE  
DESSALEMENT



### 3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, une ville algérienne concernée par cette étude est choisie, elle est en l'occurrence la ville d'Illizi située au sud-ouest du Sahara algérien. Le choix de cette ville est paramétré par la disponibilité des ressources éoliennes et solaires dans cette région ainsi que la demande en eau potable enregistrée avec l'existence des eaux saumâtres. Nous procédons d'abord à l'évaluation des gisements solaires et éoliens dans cette ville en se basant sur l'historique des données climatiques. Les résultats obtenus permettront un dimensionnement optimal du système de dessalement hybride en se basant sur la méthode de LPSP (Lost power supply probability) signifiant probabilité de perte de puissance d'alimentation. Les méthodes de calcul des gisements solaire et éolien ainsi que l'algorithme de dimensionnement optimal développé seront présentés. Les résultats obtenus permettront de dimensionner le système selon un profil de consommation d'eau douce basée sur les besoins en eau douce nécessaire pour alimenter une agglomération résidentielle localisée dans cette ville. Cette étape est considérée cruciale et vient comme une première phase d'optimisation du système car un mauvais dimensionnement affectera énormément la consommation spécifique d'énergie (SEC) du système qui a un effet direct sur le prix spécifique de l'eau produite.

### 3.2 Gisement éolien à Illizi

La rareté des études sur les ressources éoliennes en Algérie a retardé l'industrie relative à cette source d'énergie. En effet, le réseau électrique algérien est principalement dépendant des combustibles fossiles (gaz naturel et pétrole). Cependant, certaines études réalisées indiquent la disponibilité de l'énergie éolienne dans la partie sud de l'Algérie. Himri et al [46-47] ont mené des études sur ces ressources dans le sud et sud-ouest du Sahara algérien, où la vitesse moyenne du vent est jugée supérieure à 6 m / s à Tindouf et Adrar. Cette activité de recherche a donné lieu au premier projet pilote en Algérie: le parc éolien de Kabertène dans la localité d'Adrar mis en service en 2014. La ferme a une capacité nominale de 10 MW de production d'énergie électrique éolienne. Il se compose de 12 éoliennes avec 850 KW de puissance nominale chacune . En outre, Chellali et al [48] ont contribué à la mise à jour de l'atlas d'énergie éolienne de l'Algérie en ajoutant la région de HassiR'mel située au nord du Sahara algérien comme une région venteuse aux atlas des vents algériens .De leur

côté, Diaf et Notton ont étudié le coût énergétique des systèmes d'énergie éolienne au sud de l'Algérie. Un cout maximale mentionnée était de 0,0923 \$ /KWh pour Tamanrasset. [49].

### 3.2.1 Méthodologie de calcul

L'évaluation de la production d'énergie éolienne pour un site candidat nécessite d'abord des mesures météorologiques pendant un intervalle de temps importante afin de prédire approximativement le potentiel d'énergie offert par ce site. Sur la base des données mesurées, des méthodes statistiques peuvent être utilisées pour caractériser puis évaluer la densité de puissance éolienne disponible dans l'emplacement choisi.

Dans cette étude les données mesurées à une heure d'intervalle (vent, pression et température) observés pendant la période 2005-2014 à la station météorologique d'Illizi ont été utilisées et qui sont disponible au site "El tiempo" qui offre les données climatique des dernières 50 ans [50]. De ce fait, une analyse des données collectées utilisant la méthode statistique de Weibull sera faite.

#### 3.2.1.1 Fonction de densité de probabilité de vitesse du vent.

La fonction Weibull est une fonction qui permet d'analyser statistiquement une distribution de données variables (les mesures des vitesses de vent dans notre cas). Elle caractérise la fréquence de la vitesse du vent à tout moment et s'écrit comme suit [51,52,53]:

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{k-1} \exp\left[-(v/c)^k\right] \quad (3.1)$$

Où  $f(v)$  : est la probabilité de la vitesse du vent observée;  $k$  un paramètre de forme (sans unité) et  $c$  (m / s) est un paramètre d'échelle de Weibull.

Plusieurs méthodes qui peuvent être consultés pour plus de détails dans la référence [54] sont utilisées pour l'estimation de ces deux paramètres. Dans cette étude, l'estimation du paramètre d'échelle est effectuée selon l'équation. (3.2) donnée dans les études antérieurs de Justus et al et rapportée par Shatta [55] :

$$k = \begin{cases} 1.05V_m^{0.5} \rightarrow (faible) \\ 0.94V_m^{0.5} \rightarrow (moyenne) \\ 0.83V_m^{0.5} \rightarrow (élevée) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où :  $V_m$  est la vitesse moyenne du vent. Pour une valeur supérieure à 4 m / s, l'approximation suivante peut être utilisée:

$$k = 0.83V_m^{0.5} \quad (3.3)$$

Le paramètre d'échelle est exprimé comme suit:

$$c = V_m / \Gamma(1 + k^{-1}) \quad (3.4)$$

Où  $\Gamma$  est la fonction gamma définie comme suit:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (3.5)$$

Les deux paramètres de Weibull ont été calculés numériquement et leurs valeurs annuelles relatives au site sont trouvées égales à :  $k = 2.82$  et  $c = 5.10$  m / s pour Illizi. La figure 3.1 montre la fonction de distribution de Weibull ajustée en fonction de leurs valeurs comparées avec les données observées à 10 m (au-dessus du niveau du sol). Il est remarquable que la l'extrapolation de la distribution correspond parfaitement aux données mesurées.

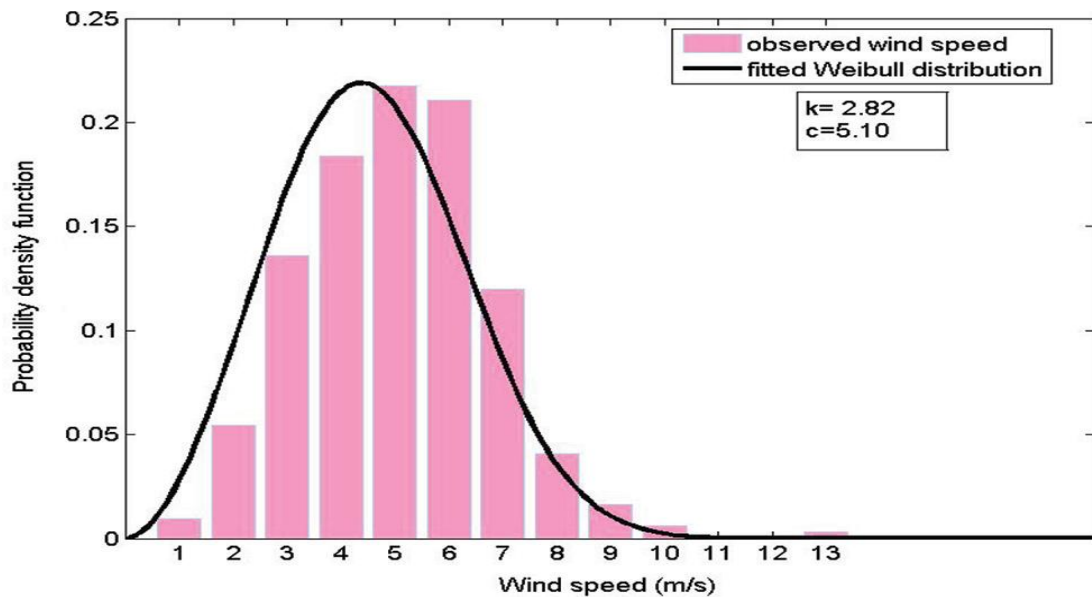


Figure 3.1 : Fonction de distribution de Weibull pour Illizi.

### 3.2.1.2 . La fonction de densité de puissance éolienne.

Les deux paramètres de Weibull sont utilisés pour évaluer les densités mensuels ou annuels de puissance en utilisant l'équation suivante:[56]:

$$P_M = 1/2 \cdot \rho c^3 (1+3/k) \quad (3.6)$$

La densité de puissance en (W/m<sup>2</sup>) est fonction du cube du facteur d'échelle  $c$ , le paramètre de forme  $k$  et la densité de l'air  $\rho$  (kg / m<sup>3</sup>) qui, pour un site spécifique peut être déterminé en utilisant la loi des gaz parfaits[57]:

$$\rho = P_{res} / R_g T \quad (3.7)$$

Dans l'équation. (3.7) :  $P_{res}$  est la pression d'air mesurée en (Pa),  $R_g$  est la constante de gaz spécifique pour l'air (287 j / kg .K) et T est la température (° K).

### 3.2.1.3 facteur de capacité et Puissance produite

Incluant l'analyse statistique du site et la caractéristique de la courbe de puissance de la turbine, le facteur de capacité est présenté en fonction des paramètres de Weibull, de la vitesse du vent de démarrage  $V_d$ , vitesse nominale  $V_n$  et vitesse d'arrêt  $V_a$  de l'éolienne. Le facteur de capacité est considéré comme un paramètre important pour la conception d'une installation éolienne tant que sa production d'énergie électrique est fortement affectée. L'expression du facteur de capacité en fonction des paramètres de Weibull et les paramètres de l'éolienne est donnée par l'équation suivante:[58]:

$$C_f = \frac{e^{-(v_n/c)^k} - e^{-(v_d/c)^k}}{(v_n/c)^k - (v_d/c)^k} - e^{-(v_d/c)^k} \quad (3.8)$$

Connaissant les paramètres Weibull du site et les caractéristiques techniques de la turbine éolienne, la puissance moyenne qui pourrait être produite par les éoliennes de petite puissance en fonction de leurs caractéristiques est calculée en utilisant l'équation suivante [59]:

$$P_{ag} = \frac{1,9}{2} C_f S_T V^3 \quad (3.9)$$

Nous avons choisi pour notre application une éolienne de petite puissance WINSOL de 2 KW dont les détails techniques donnés par le constructeur sont résumés dans le tableau suivant[60].

Détails techniques de l'éolienne	Valeurs
Puissance nominale	2 KW
Diamètre du rotor	3.2 m
Hauteur du moyeu	18 m
Vitesse de démarrage	3 m/s
Vitesse de puissance nominale	9 m/s
Vitesse d'arrêt	25 m/s

Tableau 3.1 Caractéristiques techniques de la turbine éolienne.

### 3.2.1.4 Extrapolation des paramètres de Weibull à la hauteur du moyeu.

Les vitesses du vent sont mesurées à la station météorologique à une hauteur de 10 m, tandis que la turbine fonctionnera à la hauteur de son moyeu (18m). Pour corriger cette différence une extrapolation du facteur d'échelle  $c$  et le paramètre de forme  $k$  à la hauteur du moyeu  $h$  est faite par les expressions suivantes [61]:

$$c(h) = c_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^n \quad (3.10)$$

$$k(h) = k_0 \left[ \frac{1 - 0.088 \ln(h_0 / 10)}{1 - 0.0881 \ln(h / 10)} \right] \quad (3.11)$$

L'exposant  $n$  peut être calculé en utilisant l'équation suivante:

$$n = \left[ \frac{0.37 - 0.088 \ln(c_0)}{1 - 0.088 \ln(h/10)} \right] \quad (3.12)$$

L'indice  $0$  dans les équations ci-dessus renvoie à la valeur de mesure.

Le tableau 3.2 résume les résultats mensuels obtenus des densités de puissances ,des facteurs de capacité et des paramètres de Weibul qui seront réutilisés par l'algorithme de dimensionnement qui sera présentés dans les sections suivantes.

Mois	Densité air	Densité de puissance à 10 m	Densité de puissance à 47 m
January	1.1504	69.33	175.12.
February	1.1366	88.41	214.59
March	1.1143	118.94	275.04
April	1.0919	109.78	257.20
May	1.0719	<b>146.62</b>	<b>327.70</b>
Jun	1.0600	139.52	314.36
July	1.0580	132.72	301.47
August	1.0608	123.05	282.98
September	1.0693	96.60	231.10
October	1.0914	84.92	207.19
November	1.1418	65.59	167.19
December	1.1504	53.21	140.38
Annual	1.0997	102.39	241.22

Tableau3.2 Valeurs des densités de puissances mensuels à Illizi

### 3.3 Gisement solaire

#### 3.3.1 Données solaires d'Illizi

Les valeurs moyennes journalières de l'irradiation solaire basées sur les données du rayonnement incident sur un plan horizontal à Illizi sont donné dans le tableau 3.3[62].Elles varient entre 3.77 kWh/m<sup>2</sup>/j en décembre et 7.54 kWh/m<sup>2</sup>/j en juillet.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Ir(kWh/m <sup>2</sup> /j)	4.12	5.07	5.97	6.79	6.77	7.14	7.54	7.10	6.02	5.01	4.09	3.77

Tableau 3.3 Valeurs mensuels du rayonnement incident sur un plan horizontal à Illizi

#### 3.3.2 Méthodologie de calcul

La puissance de sortie du module PV est calculée par l'équation (3.13) [63].

$$P_{pv} = Y_{pv} f_{pv} \left( \frac{G_T}{G_{TSTC}} \right) \quad (3.13)$$

où  $P_{pv}$  est la puissance de sortie du module PV aux conditions standard de test (STC),  $f_{pv}$  est le facteur de déclassement du module,  $G_{TSTC}$  est le rayonnement solaire incident à des conditions de test standard qui est de 1 kW / m<sup>2</sup> et  $G_T$  est le rayonnement solaire totale sur le module PV incliné, calculé par l'équation. (3.14):

$$G_T = G_B + G_D + G_R \quad (3.14)$$

Où  $G_B$  est le faisceau direct,  $G_D$  est la composante diffuse, et  $G_R$  est la composante réfléchie. Le rayonnement de faisceau direct reçu sur une surface inclinée est obtenue par l'équation. (3.15) .

$$G_B = (G_g - G_d)R_b \quad (3.15)$$

où  $G_g$  et  $G_d$  sont respectivement le rayonnement global et diffus sur une surface horizontale ;  $R_b$  est le rapport entre le rayonnement moyen incident sur la surface inclinée sur celui de la surface horizontale.  $G_d$  est calculé par l'équation. (3.16).

$$G_d = G_g (1 - 1.3K_T) \quad (3.16)$$

où  $K_T$  est estimée par l'équation suivante :

$$K_T = \frac{G_g}{G_0} \quad (3.17)$$

Où  $G_0$  est un rayonnement quotidien extraterrestre disponible en dehors de l'atmosphère sur un plan horizontal calculé par l'équation. (3.18) .

$$G_0 = \frac{24}{\Pi} .1353(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365})(\cos \varphi \cos \delta \sin w_{ss} + \frac{\Pi w_{ss}}{180} \sin \varphi \sin \delta) \quad (3.18)$$

où  $n$  est le jour de l'année donnée pour chaque mois,  $\varphi$  est la latitude,  $\delta$  est la déclinaison solaire, et  $w_{ss}$  est l'angle horaire. ;  $\delta$  et  $w_{ss}$  sont définis respectivement par les équations (3.19) et (3.20).

$$\delta = 23.45 \sin(\frac{360(n + 284)}{365}) \quad (3.19)$$

$$w_{ss} = ar \cos(-\tan(\delta) \tan(\varphi)) \quad (3.20)$$

$R_b$  dans l'équation. (3.15) peut être estimé par l' équations. (3.21).

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos w_{ww} + w_{ss} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin w_{ss} + w_{ss} \sin \varphi \sin \delta} \quad (3.21)$$

Dans l'équation (3.23)  $\beta$  représente l'inclinaison du PV qui est un facteur important pour optimiser l'irradiation du rayonnement direct et diffus reçu par les capteurs. En Algérie ,il est conseillé d'orienter les capteurs vers le sud avec une inclinaison égale à la latitude du lieu qui est de l'ordre de 26.29° pour Illizi.

Il faut signaler que lorsque nous n'avons pas les données des rayonnements diffus et réfléchis, une approximation de 20% du rayonnement direct peut être considérée.

### 3.4 Dimensionnement optimal des composants du système hybride

Plusieurs approches ont été utilisées dans la littérature pour obtenir la configuration optimale des composants des systèmes hybrides en termes d'analyse technique [64-65]. Parmi ces méthodes, nous trouvons celle du moindre carré ainsi que l'approche technique également appelée : probabilité de perte de puissance d'alimentation (LPSP)[66]. Nous avons adopté dans le cadre de cette étude cette approche que nous avons modifié de sorte à tenir compte du profil variable de l'éclairement et l'inclinaison du PV.

Le modèle de dimensionnement technique pour le système est développé sur la base des détails techniques des composants du système donnés par le constructeur tels que l'aérogénérateur, les panneaux solaires et les batteries ainsi que les données climatiques réelles du site qui héberge l'installation. Les tableaux 3.4 et 3.5 incluent les données techniques des panneaux solaires et les batteries que nous avons choisi comme premiers modèles pour notre système de dessalement.

Modèle	Puiss(W)	Icc(A)	Voc(v)	Vmp(v)	Imp(A)	A(m <sup>2</sup> )	Noct(°c)
solarWorld	80	4.66	22.5	18.5	4.35	0.43	50

Tableau 3.4 Caractéristiques techniques du module photovoltaïque

Modèle	Capacité nominale(Ah)	Voltage (V)	Décharge minimale(%)
Electrosun	100	48	0.2

Tableau 3.5 Caractéristiques techniques de la batterie

L'algorithme de dimensionnement du système aura pour principal objectif la simulation d'un certain nombre de configurations possibles sous les conditions d'ensoleillement et de vent du site choisi ainsi que le profil de charge de demande en eau douce pour déterminer celles qui assurent une probabilité minimale de perte d'énergie au cours d'une année de fonctionnement. Une configuration est considérée optimale si elle remplit les conditions suivantes : (i) assurer les besoins énergétiques du système tout au long de l'année avec un minimum d'excès ou de perte d'énergie durant cette période. (ii) offrir un cout minimal par rapport aux autres combinaisons possibles :



### 3.4.1 Méthodologie de dimensionnement optimal.

Le dimensionnement de toute installation fonctionnant avec des sources d'énergie renouvelable répond à un cahier de charge connu au préalable dont le facteur primordial est la capacité à installer. Pour un système de dessalement ce facteur est représenté par un profile de demande en eau destiné à répondre aux besoins en eau potable d'un certain nombre d'individu représenté généralement par le débit journalier. Pour cela, il est important dans les systèmes de dessalement de déterminer ce profile et le convertir en profile de puissance équivalente à ce profile de débit journalier.

#### 3.4.1.1 Détermination du profile de charge du système de dessalement

La puissance de charge est calculée à partir des besoins en eau d'une agglomération résidentielles de 60 habitants. Ce profile de charge qui varie au cours de l'année selon les saisons est utilisé pour calculer le profile équivalent en puissance qui peut être calculée ainsi:

$$P_{ch}(t) = \frac{1}{\eta_{pompe}} P_{hpomp}(t) \quad (3.22)$$

Où  $P_{hpomp}$  représente la puissance hydraulique de la pompe centrifuge et  $\eta_{pompe}$  son rendement et qui est donné par le constructeur pour la pompe GRUNDFOS valant 0.585.

Pour déterminer la puissance hydraulique à partir de la consommation journalière, on considère un taux de recouvrement de 30% de l'unité de dessalement. Ainsi la puissance hydraulique de la pompe sera calculée ainsi:

$$P_{hpomp}(t) = \frac{1}{0.3} Q_j(t) P_{res} \quad (3.23)$$

Dans l'équation (3.23),  $Q_j(t)$  représente le débit à l'instant  $t$  du profile de charge de la consommation en eau et  $P_{res}$  est le point de pression optimal pris de la caractéristique P-Q de la pompe correspondant au débit de fonctionnement ( $3\text{m}^3/\text{h}$ ). Dans la figure 3.2, nous présentons le profile de consommation d'eau douce en  $\text{m}^3$  et la puissance équivalente de consommation en Watt.

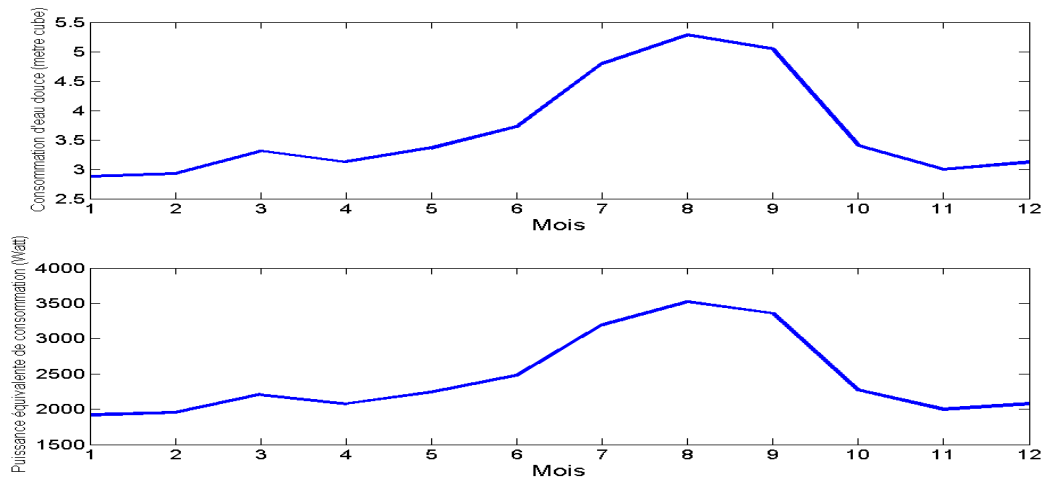


Figure 3.2 Profils annuels de consommation d'eau et puissance équivalente

### 3.4.1.2 Présentation de l'algorithme de dimensionnement

La figure 3.3 présente l'organigramme de la méthodologie utilisée et qui peut être résumé dans les étapes suivantes:

Par l'usage des données solaires et éoliennes à un intervalle horaire, nous pouvons calculer les puissances générées par le PV en utilisant les équations (3.13) à (3.21) et celle de l'aérogénérateur par l'équation (3.9). La puissance totale,  $P_{tot}$ , générée par les deux sources est calculée comme suit:

$$P_{tot}(t) = P_{pv}(t) + P_{ag}(t) \quad (3.24)$$

Ensuite, la puissance d'entrée de l'onduleur,  $P_{ond}$  est calculée en utilisant la demande de puissance de charge comme suit:

$$P_{ond}(t) = \frac{P_{ch}(t)}{\eta_{ond} \cdot \eta_{msap}} \quad (3.25)$$

où  $P_{ch}$  est la puissance consommée par la charge à l'heure  $t$  tandis que  $\eta_{inv}$  et  $\eta_{msap}$  sont respectivement le rendement de l'onduleur et le rendement de la MSAP.

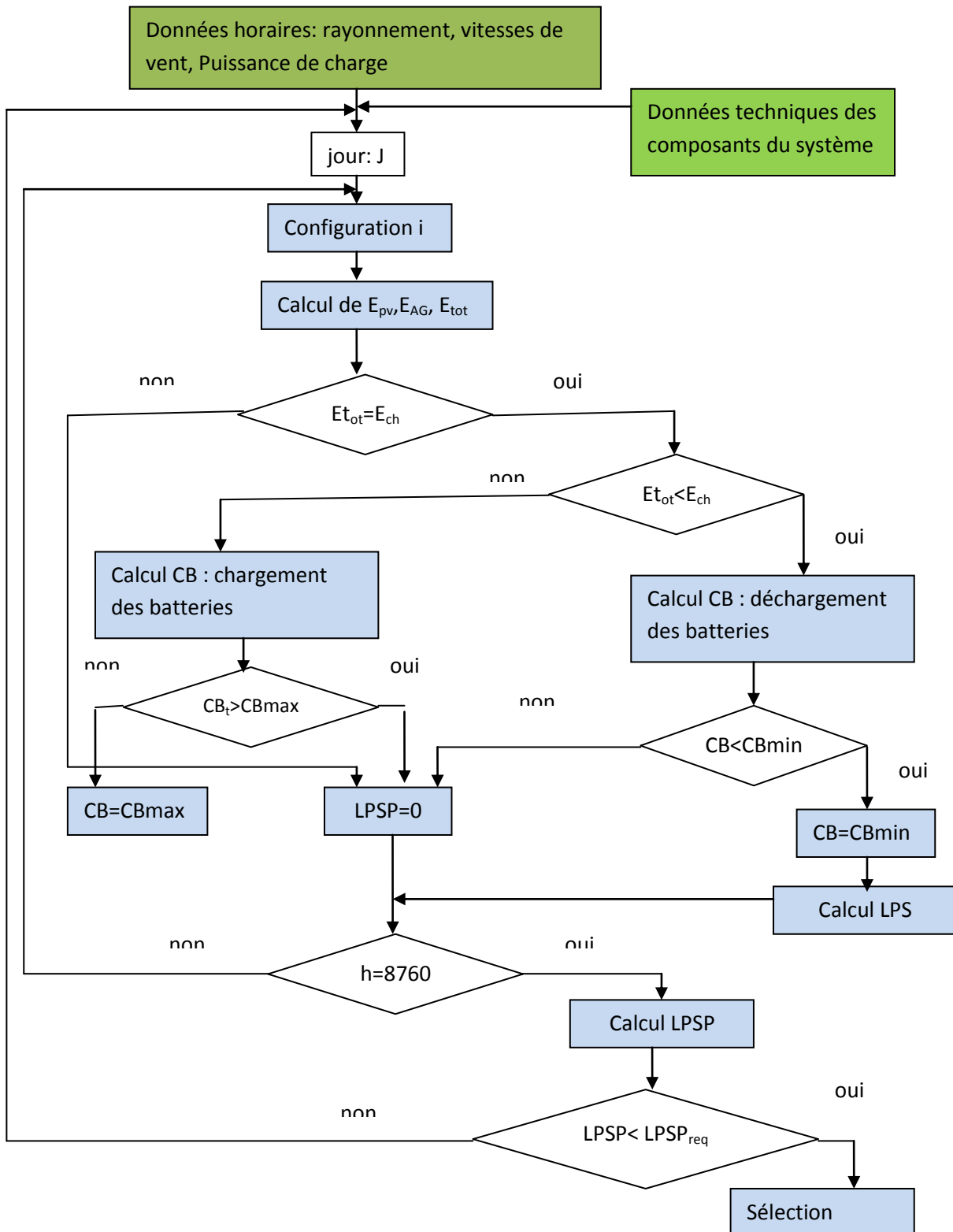


Figure 3.3 Algorithme d'opération du dimensionnement du système de dessalement

A chaque instant  $h$  (une heure) de la journée nous comparons la puissance délivrée par les sources renouvelables  $P_{tot}$  à la puissance de la charge  $P_{ch}$ . Au cours du fonctionnement du système différentes situations peuvent apparaître :

- a) La puissance totale générée par le GPV et l'aérogénérateur est supérieure à la puissance requise par la charge  $P_{ch}$ . Dans ce cas, le surplus d'énergie est stocké dans les batteries et la nouvelle capacité de stockage est calculé en utilisant l'équation. (3.26) jusqu'à ce que la capacité totale soit obtenue. Le reste de la puissance disponible ne peut être utilisé.
- b) La puissance totale  $P_{tot}$  est inférieure à la puissance requise par la charge  $P_{ch}$ . Le déficit d'énergie est couvert par le stockage et une nouvelle capacité de la batterie est calculée en utilisant l'équation. (3.27).
- c) En cas de l'égalité des puissances, la capacité de stockage reste inchangée:

Durant le fonctionnement de l'algorithme le processus de charge et décharge des batteries sera gouverné ainsi:

- **Processus de charge des batteries**

À toute heure, l'état de la batterie est lié à l'état précédent de charge ou de décharge, à l'énergie produite et la situation de la consommation de puissance par le système pendant la période de  $(t-1)$  à  $t$ . Pour un surplus de puissance le processus de charge des batteries régi leur capacité  $C_B(t)$  est décrit par l'équation suivante :

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1)(1-\sigma) + (E_{pv}(t) + E_{AG}(t) - \frac{E_{ch}(t)}{\eta_{inv}}) \eta_{bat} \quad (3.26)$$

- **Processus de décharge des batteries**

Lorsque la demande de charge est supérieure à l'énergie disponible générée, les batteries sont en état de décharge. Par conséquent, la capacité de stockage de la batterie disponible à l'heure  $t$  peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1)(1-\sigma) + \left( \frac{E_{ch}(t)}{\eta_{inv}} - (E_{pv}(t) + E_{AG}(t)) \right) \eta_{bat} \quad (3.27)$$

Où  $C_{bat}(t)$  et  $C_{bat}(t-1)$  sont les capacités de stockage des batteries disponibles en (Wh) à l'heure  $t$  et  $(t-1)$ , respectivement;  $\eta_{bat}$  est le rendement de la batterie qui vaut 1 processus de décharge et 0,65 en décharge).  $\sigma$  est le taux d'autodécharge de l'ordre de 0,14% par jour).  $E_{pv}(t)$  et  $E_{ag}(t)$  sont respectivement l'énergie générée par le GPV et l'aérogénérateur;  $E_{ch}(t)$  est la demande en puissance de la charge à heure  $t$ .

Afin de d'augmenter le cycle de vie des batteries, il est conseillé de respecter les contraintes de charge et décharge des batteries à toute heure en gardant la capacité des batteries dans la plage de fonctionnement suivante :

$$C_{bat\ min} < C_{bat}(t) < C_{bat\ max} \quad (3.28)$$

Dans le cas ,où la capacité de la batterie atteint la valeur maximale  $C_{bat\ max}$ , l'algorithme arrête le processus de charge. et l'énergie perdue, définie comme produite et non utilisée par le système à l'heure  $t$  est calculée comme suit:

$$WE(t) = P_{tot(t)} \Delta(t) - \left( \frac{P_{ch}(t)}{\eta_{inv} \eta_{msap}} \Delta(t) + \frac{C_{bat\ max} - C_{bat}(t-1)}{\eta_{ch}} \right) \quad (3.29)$$

Si la capacité de la batterie diminue jusqu'à son niveau minimal,  $C_{bat\ min}$ , le système de commande la déconnecte de la charge et le déficit énergétique (la perte de puissance d'alimentation) pour l'heure  $t$  peut être exprimé comme suit :

$$LSP(t) = P_{ch}(t) \Delta(t) - [(P_{pv}(t) + P_{AG}(t)) \Delta(t) + C_{bat}(t-1) - C_{bat\ min}] \quad (3.30)$$

La probabilité de perte de puissance d'alimentation(LPSP) durant une année de fonctionnement peut être définie comme étant le rapport de tous les (LPS ( $t$ )) sur les valeurs de puissance totale désirée de charge au cours de cette période donnée par la fonction suivante :

$$LPSP = \sum_{t=1}^T LSP(t) / \sum_{t=1}^T P_{ch}(t) \Delta(t) \quad (3.31)$$

Où  $T$  est la durée en heure pendant un an (8760h)

Les configurations qui respectent une LPSP inférieure à 10 % seront sélectionnées par l'algorithme et comparées.

Les considération suivantes sont faites durant le fonctionnement de l'algorithme:

- une branche de 8 PV est ajoutée pour chaque configuration afin d'avoir des tensions de l'ordre  $V_{dc}/2$  (V) pour chaque branche.

- Nous choisissons un seuil admissible de 5% pour la probabilité de perte de puissance(LPSP). Ainsi ,les configurations satisfaisant cette valeur seront retenues et comparées pour le dimensionnement final du système.

### 3.5 Résultats de dimensionnement

Les vitesses du vent observées durant l'année 2015 à Illizi ont été utilisée comme entrée pour l'algorithme. la figure 3.3 représente la variation annuelle de la vitesse de vent qui varie quotidiennement entre 1m/s et 12 m/s.

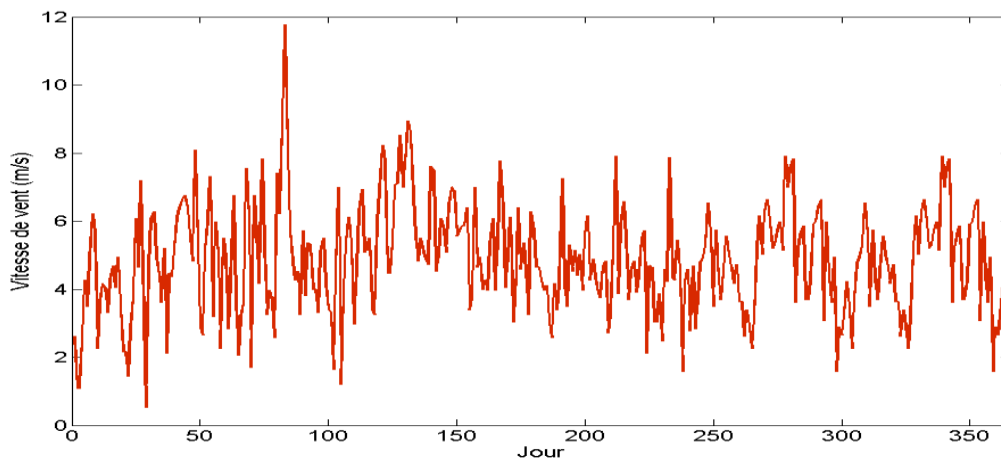


Figure 3.4 Vitesses du vent à Illizi observées durant l'année 2015

Les résultats de calcul de l'algorithme de dimensionnement optimal basée sur l'approche de probabilité de perte de puissance sont présentés dans la figure 3.4. On constate d'après ces résultats que le fait d'augmenter le nombre de branches des PV mènerait à une diminution très sensible de la probabilité de perte de puissance d'alimentation alors que l'augmentation du nombre d'aérogénérateurs vu les ressources éoliennes à Illizi n'a pas le même effet. Le même constat est déductible en ajoutant plus de batteries. Dans les quatre cas présentés, on remarque qu' un nombre de cinq branches de panneaux solaires avec un ou deux aérogénérateurs quelque soit le nombre de batteries: une ,deux ou trois parait comme le choix le plus optimal. Alors qu'avec trois aérogénérateurs, le nombre optimal de branches de PV sera réduit à quatre branches mais avec trois batteries. Si on choisit quatre aérogénérateurs ,le nombre de branches de PV sera aussi quatre mais avec moins de batteries; juste deux batteries.

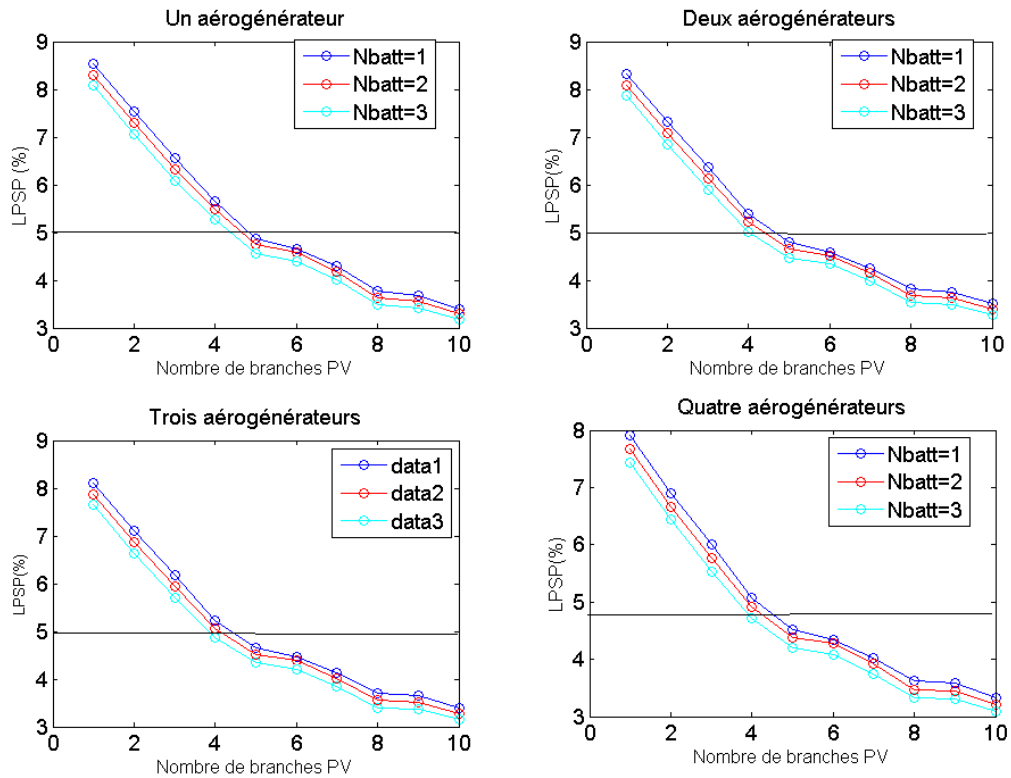


Figure 3.5 Résultats de l'algorithme de dimensionnement LPSp

N Turbine	Puissance(W)	N PV	Puissance(W)	N batteries	Capacité(Ah)
<b>1</b>	<b>2000</b>	<b>32</b>	<b>2560</b>	<b>1</b>	<b>100</b>
<b>2</b>	<b>4000</b>	<b>32</b>	<b>2560</b>	<b>1</b>	<b>100</b>
<b>3</b>	<b>6000</b>	<b>24</b>	<b>1920</b>	<b>3</b>	<b>300</b>
<b>4</b>	<b>8000</b>	<b>24</b>	<b>1920</b>	<b>2</b>	<b>200</b>

Tableau 3.6 Combinaisons optimales du système de dessalement hybride

Les combinaisons optimales du dimensionnement du système de dessalement hybride présentés dans le tableau 36 nous mène à faire intervenir le facteur économique pour la prise de décision finale quant au nombre des PV, aérogénérateurs et batteries à inclure dans le système de dessalement à implanter dans la région d'Illizi pour satisfaire les besoins en eau d'un quartier résidentiel de 60 habitants. en consultant les prix des fournisseurs , il s'avère que le choix d'un seul aérogénérateur avec 32 Panneaux solaires et une batterie serait la combinaison la plus adéquate de point de vue technique et économique.

### **3.6 Conclusion**

Dans ce présent chapitre un dimensionnement optimal du système de dessalement hybride solaire éolien à été effectué sur la base de l'algorithme de la probabilité de perte de puissance. Cette première phase d'optimisation nous a permis de choisir sur la base des données techniques fournies par les constructeurs de choisir le nombre d'éoliennes et de panneaux ainsi que les batteries à utiliser pour le système de dessalement hybride assurant une convenance énergétique optimale aux besoins de la demande en eau douce et les données solaire et éolienne de la région choisie pour cette étude.



# Chapitre IV

---

## DESCRIPTION DES APPROCHES DE COMMANDE

## 4.1 Introduction

L'alimentation d'une installation de dessalement autonome par plusieurs sources doit respecter une architecture de connexion et une stratégie d'exploitation adéquate. Par conséquent, une bonne gestion des sources de production permet de couvrir les besoins énergétiques unitaires et d'assurer une exploitation optimale de l'énergie produite. Pour atteindre cet objectif, un nouvel algorithme de gestion de puissance est développé basé sur les algorithmes des Réseaux de Neurones (RN) pour le système hybride comprenant une turbine éolienne WT de 2 KW, des panneaux solaires formant le générateur d'une puissance nominale de 2.5 kW et des batteries d'une capacité de 100AH à une tension de 48V pour entrainer une petite unité de dessalement à osmose inverse. Le but de ce gestionnaire est d'assurer un fonctionnement fiable du système capable de fournir à la charge l'énergie demandée et ayant la capacité de stocker l'énergie excédentaire selon un certain nombre de modes de fonctionnement qui seront présentés par la suite.

## 4.2 Description du gestionnaire d'énergie basé sur les réseaux de neurones

L'approche des réseaux de neurones connue communément par RNA (Artificial neural network) qui gouvernera le système mutli-sources alimentant l'unité de dessalement RO présenté dans la figure 4.1 peut être décrite comme un modèle mathématique qui reproduit la structure et la fonction du système de neurones biologiques humains. La plupart des modèles mathématiques des Réseaux de Neurones (RN) utilisent des algorithmes d'apprentissage. Le plus populaire et le plus efficace est l'algorithme d'apprentissage par rétro-propagation.

Le gestionnaire proposée pour le système aura pour principal rôle :

- 1) Une permutation souple entre les modes de fonctionnement, servant à un écoulement fiable du flux d'énergie produit.
- 2) Une utilisation smart des informations provenant des sous-systèmes afin de gérer faiblement leur états de fonctionnement
- 3) Commander l'acheminement optimum des puissances des sous systèmes pour assurer l'équilibre production-demande du système entier tout en respectant les contraintes de fonctionnement de chaque sous-système.

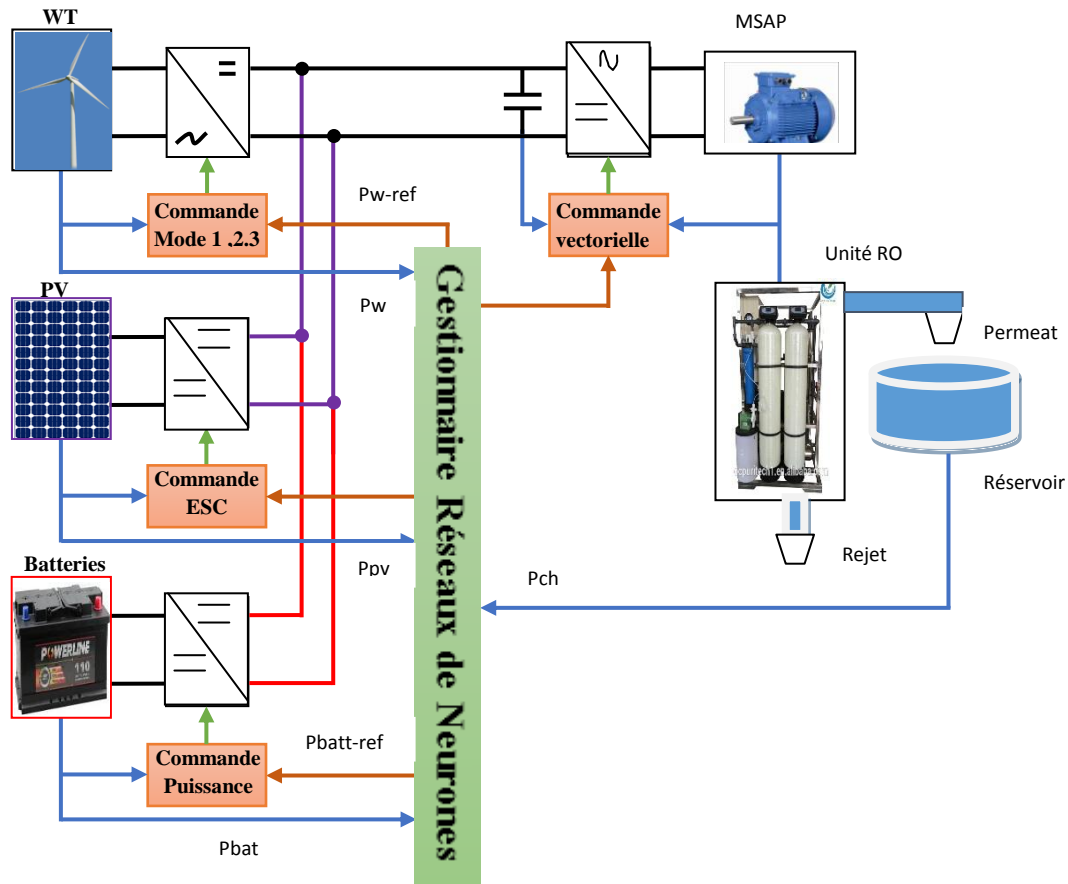


Figure 4.1 Synoptique du système hybride de dessalement

#### 4.2.1 Stratégie de gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie pendant 24 heures est illustrée dans l'organigramme de la Fig. 4.2 dont Le principe est lié à la disponibilité de la puissance des sources solaire et éolienne et à la demande journalière en eau douce. Par conséquent, la différence entre la puissance totale et la puissance de charge  $P_{nette}$  doit être déterminée . Si la différence est supérieure à zéro, l'excédent sera stocké par les batteries. Sinon, la puissance stockée par des batteries sera épuisée en tant que source supplémentaire pour couvrir les besoins de la charge.

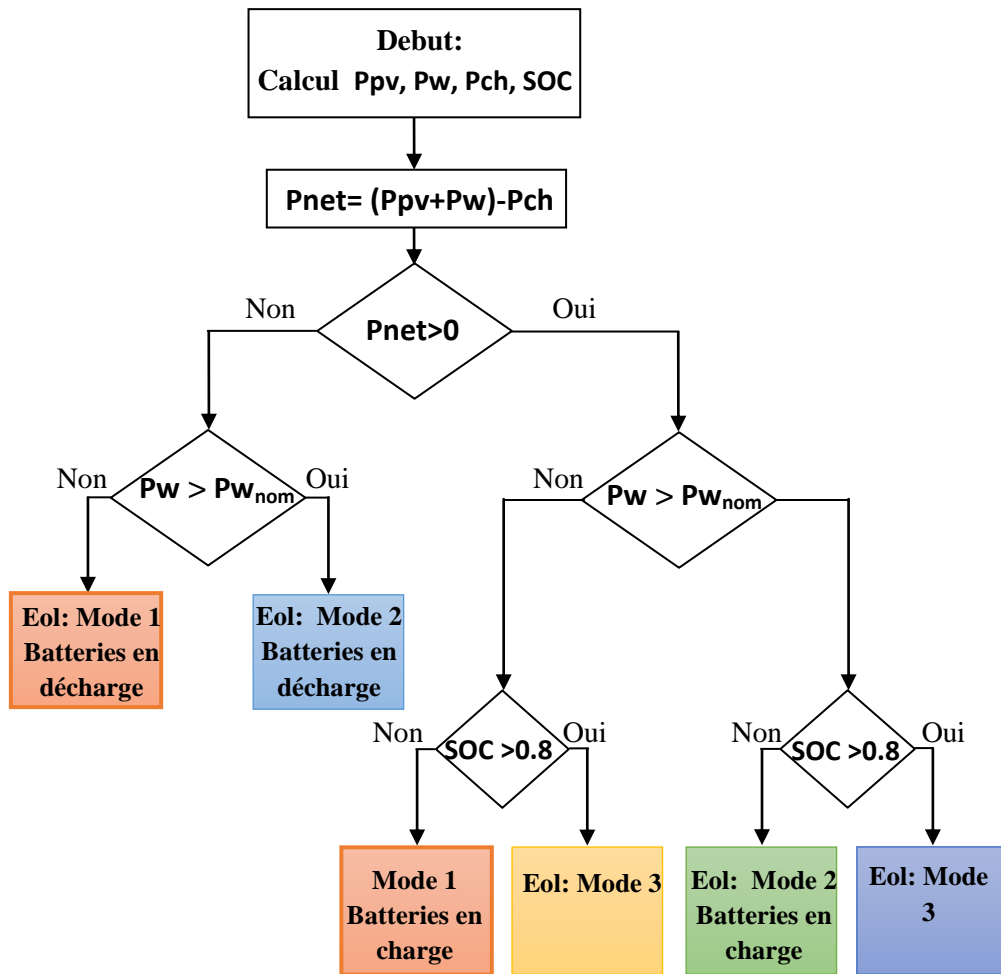


Figure 4.2 Algorithme de gestion d'énergie

Ce gestionnaire est basée sur la détermination de la puissance  $P_{net}$  qui représente la différence de puissance entre celle produite par les sources le GPV et l'aérogénérateur d'une part et la puissance exigée par la charge d'autre part. Ensuite, selon la puissance générée par la source éolienne et l'état de charge des batteries, les références de puissance seront imposées à la turbine éolienne et les batteries comme indique l'organigramme de l'algorithme de gestion d'énergie dans la figure 4.2. Durant toute la journée, le générateur photovoltaïque est commandé en MPPT par un algorithme de recherche de l'extremum (Extremum Seeking Control) qui permet à ce dernier de générer toute sa puissance maximale quand il est en service même sous les conditions d'ombrage partiel. L'état de charge des batteries et les zones de fonctionnement de la courbe de puissance de la turbine éolienne détermineront les modes de fonctionnement du gestionnaire d'énergie qui se présentent comme suit:

**-Mode 1:**

- a) si la puissance générée par les sources renouvelables est inférieure à la puissance exigée par la charge, il faut donc faire recours au stock de puissance des batteries alors que la turbine éolienne fonctionnera en mode **MPPT**. Ce cas pourrait se présenter durant la nuit ainsi qu'en début et fin de journée. Vu que le dimensionnement du système est optimal les réserves des batteries couvriront le déficit de puissance jusqu'à l'intervention du générateur photovoltaïque.
- b) Si la puissance générée par les sources renouvelables est supérieure à la puissance exigée par la charge et l'état de charge des batteries  $SOC < 80\%$  alors que la puissance générée par la turbine éolienne reste inférieure à sa puissance nominale (Zone de fonctionnement I), il faut stocker l'excès de puissance par les batteries alors que la turbine éolienne fonctionnera en mode **MPPT**.

**-Mode 2:** Ce mode de fonctionnement se produit durant les cas suivants:

- a) Si la puissance nette ( $P_{net}$ ) est positive alors qu'un surplus de puissance est remarqué, il faut estimer l'état de charge des batteries SOC. En réalisant que  $SOC > 0.8$ , il faut estimer la différence entre la puissance générée par la turbine éolienne et sa puissance nominale. Ainsi deux cas se présenteront: Si la différence de puissance est positive, cela indique que la turbine éolienne est en zone de fonctionnement II qui correspond à sa puissance nominale, on procédera au chargement des batteries à une puissance  $P_{bat-ref}$  de manière à stocker l'excès de puissance enregistré alors que la turbine éolienne doit basculer à une référence de limitation de puissance égale à  $P_{wnom}$  (Puissance nominale de la turbine éolienne).
- b) ) Si la puissance nette ( $P_{net}$ ) est négative alors un déficit de puissance est signalé, il faut alors estimer la différence entre la puissance générée par la turbine éolienne et sa puissance nominale. Ainsi si la différence de puissance est positive, la turbine éolienne fonctionnera à sa puissance nominale et nous devons procéder au déchargement des batteries à une puissance  $P_{bat-ref}$  qui couvrira le déficit de puissance.

**-Mode 3 :** Ce mode intervient dans le cas où les batteries sont complètement chargées ( $SOC \geq 80\%$ ) avec un surplus de puissance enregistré ( $P_{net} > 0$ ), alors que la turbine éolienne entre en zone de fonctionnement II qui correspond à sa puissance nominale. La puissance de référence de la turbine éolienne bascule à une puissance de référence  $P_{w-ref}$  correspondant à la différence de puissance entre la source photovoltaïque et la charge. Cela évitera le chargement des batteries.

## 4.2. 2 Gestion de l'énergie par les réseaux de neurones

Un Réseau de Neurone Artificiel (RNA) est un modèle mathématique ou de calcul qui a été inspiré par la structure et les aspects fonctionnels des réseaux de neurones biologiques. Un RN consiste en un groupe interconnecté de neurones artificiels. Il traite les informations en utilisant une connexion approchée au calcul. C'est un système adaptatif qui change sa structure en fonction des informations externes ou internes qui circulent dans le réseau pendant la phase d'apprentissage. Un RN est généralement défini par trois types de paramètres, comme illustré dans la Fig. 4.3 [67]:

1. le schéma d'interconnexion entre différentes couches de neurones;
2. le processus d'apprentissage pour mettre à jour les poids des interconnexions;
3. la fonction d'activation qui convertit l'entrée pondérée d'un neurone en activation de sortie.

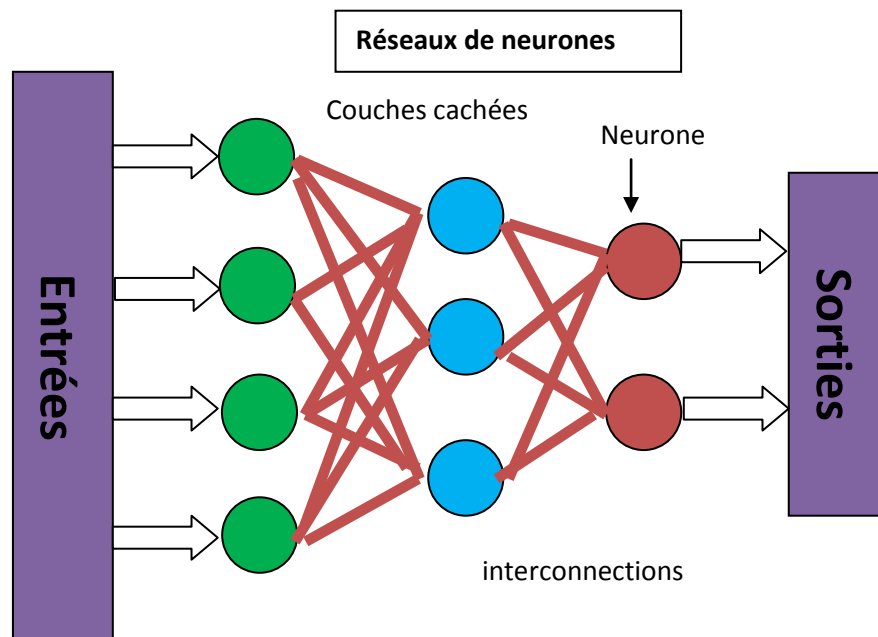


Figure . 4.3: Structure générale des Réseaux de Neurones Artificiels

#### 4.2.2.1 Les mécanismes d'apprentissage des RN :

##### A- Définition :

Les mécanismes d'apprentissage sont les propriétés les plus intéressantes des réseaux de neurones, car certains d'entre eux tentent de copier le processus de mémorisation des connaissances du cerveau humain.

On distingue deux familles d'apprentissage, l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

##### ➤ Les algorithmes avec apprentissage supervisé :

L'apprentissage supervisé détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur à associer des réponses ou des cibles désirées également étiquetées et grâce à une stratégie spécifique.

Après la phase d'apprentissage et la convergence des calculs, il n'est plus nécessaire, en général de mémoriser le jeu d'apprentissage. Ces algorithmes sont particulièrement dédiés aux problèmes de classification des données bruitées ou incomplètes.

##### ➤ Les algorithmes avec apprentissage non supervisé :

L'apprentissage non supervisé copie le fonctionnement du cerveau humain qui retrouve les informations par association. On présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau s'organise lui même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau.

L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent le poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés à l'entrée et dans certains cas en fonction des sorties désirées.

##### B- Les principales règles d'apprentissage :

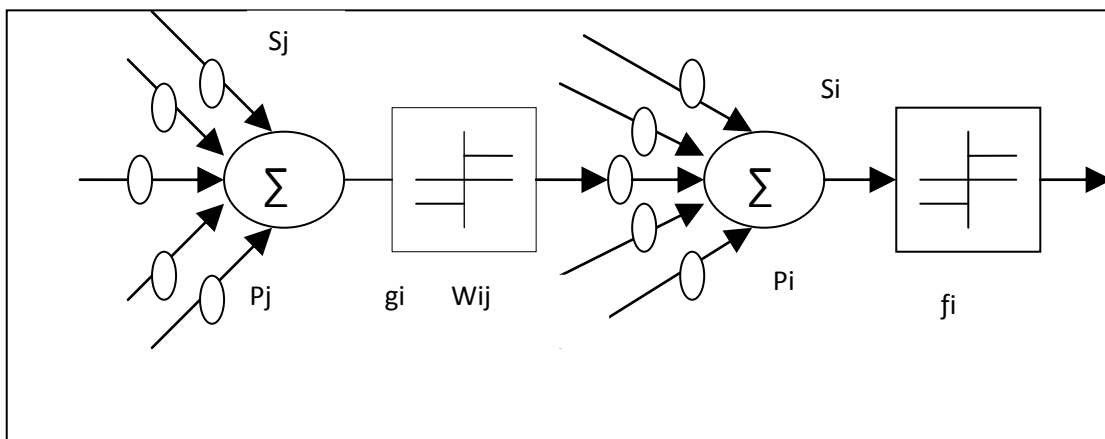
Les stratégies de modification des poids synaptiques sont dérivées des règles générales suivantes :

- La règle de Hebb où le poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé, si les deux processeurs élémentaires sont activés simultanément ;

- La règle Widrow-Hoff ou règle delta : ou le poids synaptique est adapté pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processeur élémentaire et la sortie désirée ;
- L'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée .

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions  $h$  d'entrée totale, des fonction d'activation  $h$  et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules des neurones.

La figure suivante représente la cellule émettrice  $P_j$  connectée à la cellule réceptrice  $P_i$  par l'intermédiaire du poids synaptique  $W_{ij}$



**Figure 4.4** Modèle d'apprentissage de la connexion  $W_{ij}$  entre deux neurones

Runlhart a proposé une règle générale de modification du poids synaptique  $\Delta W_{ij}$  valable dans de nombreux mécanismes d'apprentissage dans le cas d'une cellule  $P_i$  avec éventuellement une entrée "professeur"  $t_i$  [68]:

$$\Delta W_{ij} = \alpha f_i(S_i, t_i) g_j(S_i, W_{ij}) \quad (4.1)$$

Avec :

$\alpha$  : le pas d'adaptation.

$f_i$  et  $f_j$  : La fonction d'activation de  $P_i$  et  $P_j$  ;

$S_i$  et  $S_j$  : Les valeurs d'activation de  $P_i$  et  $P_j$  ;



$t_i$  : l'entrée professeur de  $P_i$ .

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions  $h$  d'entrée totale, des fonctions d'activation  $h$  et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules des neurones .

Dans la règle de Hebb, il n'y a pas de professeur et les fonctions  $f_i$  sont linéaires ; le mécanisme d'adaptation se réduit à :

$$\Delta W_{ij} = \alpha S_i S_j \quad (4.2)$$

La règle de Widrow-Hoff, connue également sous le nom de delta-règle (  $\Delta$  règle) nécessite un professeur et se formule en présence de fonctions d'activation linéaires sous la forme :

$$\Delta W_{ij} = \alpha ( T_i - S_i ) S_j \quad (4.3)$$

Le modèle compétitif de type Kohonen met en œuvre l'expression :

$$\Delta W_{ij} = \alpha ( T_i - W_{ij} ) \quad (4.5)$$

Après la phase d'apprentissage toute la mémorisation des connaissances est gravée dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexionniste. par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie. Certains réseaux dédiés aux problèmes de classification automatique ont été conçus pour rejeter de façon certaine, les exemples qui n'ont pas été mémorisés par le réseau.

#### 4.2.2.2 Détermination de l'algorithme RN pour la gestion d'énergie

Nous avons fait appel à la boîte à outil (nntool) de Matlab/Simulink. Elle permet de créer un ensemble de vecteurs d'entrée  $X$  en tant que colonnes dans une matrice qui représente les puissances générées par les deux sources renouvelables, l'état de charge des batteries et le profil de charge . Ensuite, un autre ensemble de vecteurs cibles  $Y$  qui sont préparés dans une seconde matrice et qui représentent les puissances de référence de la turbine éolienne et la puissance de référence des batteries. Les deux ensembles de vecteurs ont été obtenus à partir du calcul de la contribution de chaque source : éolienne et solaire (WT et PV) en présence à la fois d'une vitesse de vent et irradiation variables. Une fois que la fenêtre Network / Data Manager est opérationnelle, un réseau peut être créé, visualisé, formé, simulé et les résultats

finaux seront adressés vers l'espace de travail. De même, les données peuvent être importées depuis l'espace de travail pour être utilisées dans l'interface utilisateur graphique (GUI). Le réseau sera formé avec, l'algorithme de rétro-propagation de Levenberg-Marquardt (trainlm). Les réseaux d'aval ont souvent une ou plusieurs couches cachées de neurones sigmoïdes suivis d'une couche de neurones linéaires, comme le montre la figure 4.5. représente la Le réseau de neurone conçu avec 10 neurones dans la couche cachée et 02 neurones dans la couche de sortie[68].

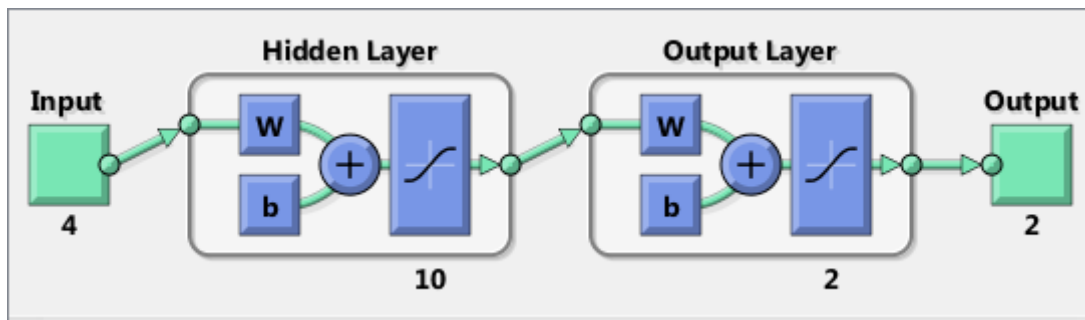


figure. 4.5. GUI du RN développé pour le gestionnaire d'énergie

Dans cette étude, le GPV et la Turbine éolienne ainsi que les batteries sont combinés ensemble et fonctionnent comme des systèmes principaux. Pour utiliser commodément la stratégie de gestion de l'énergie en tenant compte de l'intermittence des sources renouvelables et des variations de charge, la méthodologie NN utilisant l'outil "nntool" dans Matlab-Simulink permet de créer des réseaux de neurones par un processus d'apprentissage selon les étapes suivantes:

- Ouvrir la fenêtre neural network data manager
- Introduire les vecteurs entrée et les vecteurs cible
- Créer un réseau de neurones où plusieurs choix se présentent, tel que le type de fonction d'apprentissage (la Régression généralisée a été choisie), le nombre de couches, type de fonction de transfert..
- Lancer le processus d'apprentissage jusqu'à ce que les résultats de régression indiquent que les sorties coïncident avec les cibles.

Les variables d'entrée du gestionnaire RN comme l'indique la figure 4.6 sont la puissance  $P_{pv}$  fournie par le GPV, La puissance de charge durant la journée, l'état de charge des batteries et la puissance de l'éolienne en Mode MPPT reçue grâce au

capteur de vitesse de la GSAP afin qu'elle soit comparée à sa puissance nominale de 2 kW. Les variables de sortie seront la puissance de référence des batteries et la puissance de référence de l'éolienne.

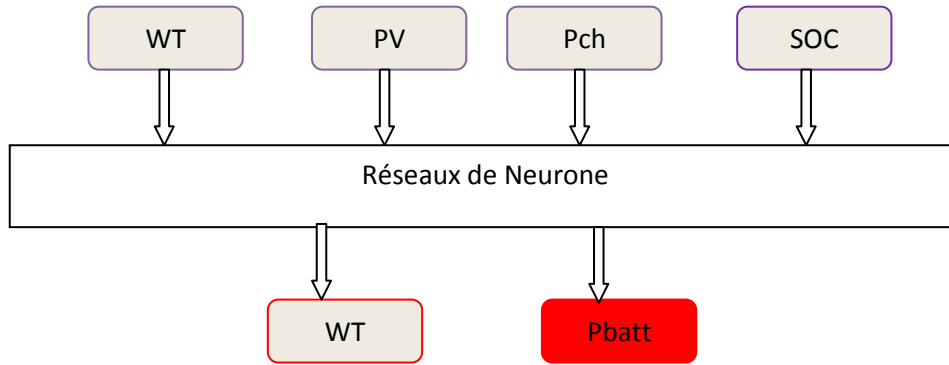


Figure 4.6 Variables d'entrée et de sortie de l'algorithme RN

#### 4.2.2.3 Les variables d' Entrée de l'apprentissage de l'algorithme RN

Dans cette étude, nous avons choisi des puissances correspondant à des données réelles d'éclairement solaire et des vitesses du vent de la ville d'Ilizi. Ces puissances seront des grandeurs d'apprentissage pour l'algorithme RN. l'état de charge des batteries est une variable d'entrée variant entre 0.2 à 0.8. La puissance fournie par la turbine éolienne et les PV pour une journée en fonction de la vitesse du vent et de l'éclairement solaire dans la région d'Ilizi sont représentés dans la figure 4.7

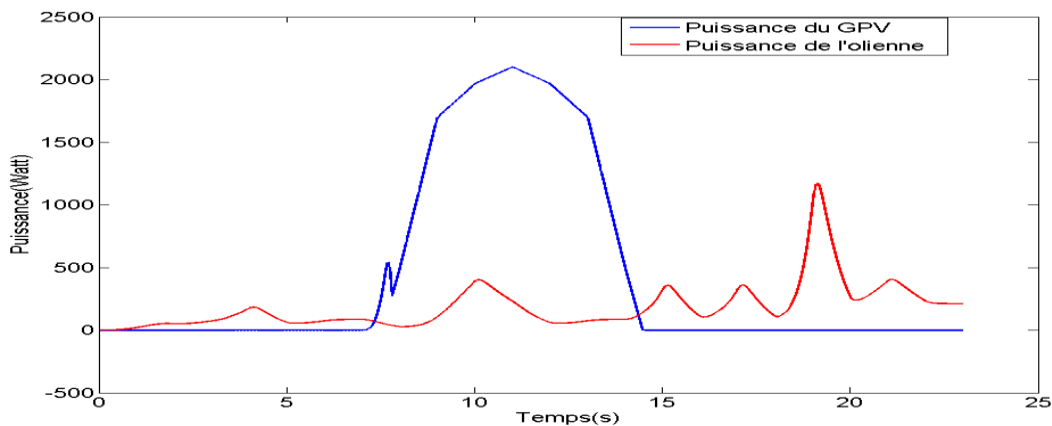


Figure 4.7 Puissances d'apprentissage du gestionnaire RN

La valeur de la charge injectée en RN est basée sur une demande réelle en eau au mois de juillet qui correspond à la demande requise d'une agglomération résidentielle dans la région d'Illizi au sud algérien. Un profile de la demande en eau douce représenté dans la figure 4.8 à été dressé de manière à répondre aux intensités des besoins en eau durant la journée. Ainsi, on remarque que la demande s'accroît en début de la journée pour atteindre son maximum en mi-journée alors qu'elle diminue fortement durant la nuit.

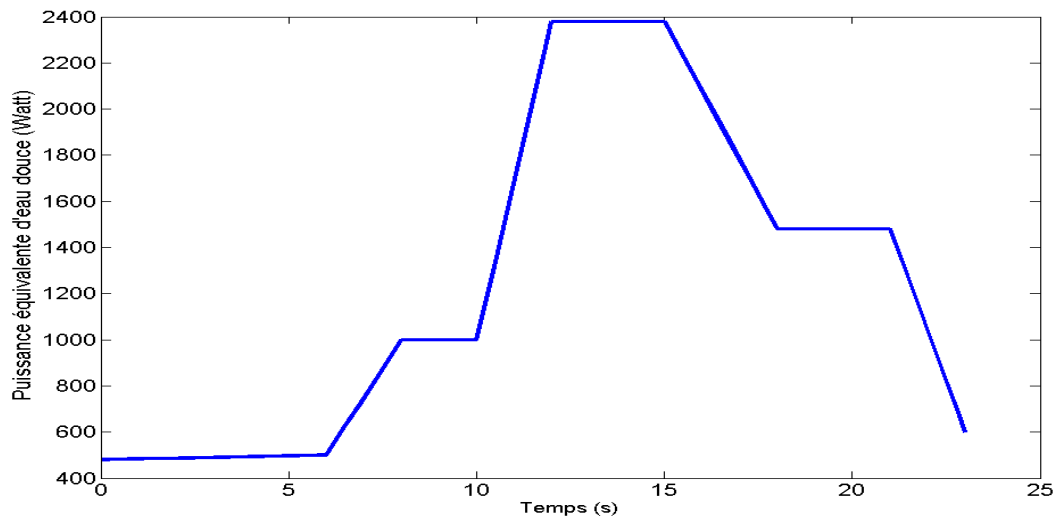


Figure 4.8 Profile de charge en puissance équivalente d'eau douce

Dans le RN, les données d'entrée / sortie sont injectées dans le NN de l'interface graphique. Les échantillons sont répartis comme suit:

Formation: 70% du total des échantillons ont été présentés au réseau pendant la formation, et le réseau a été ajusté en fonction de l'erreur

Validation: 15% des échantillons ont été utilisés pour mesurer la généralisation du réseau, et pour interrompre la formation lorsque la généralisation cesse de s'améliorer

Tests: 15% du total des échantillons ont été investis pour fournir une mesure indépendante de la performance du réseau pendant et après la formation.

#### 4.2.2.4 Résultats de test de l'apprentissage

Les courbes de régression suivantes de la figure 4.9 montrent les résultats des sorties réseau de la formation, de la validation et des tests de la cible. Pour un ajustement parfait, les données doivent tomber sur une ligne de 45 degrés, où les sorties du réseau sont égales aux

cibles. L'ajustement est assez bon pour tous les ensembles de données, avec les valeurs de R (le pourcentage de données tombant sur une ligne de 45 degrés) dans chaque cas valent 0,99.

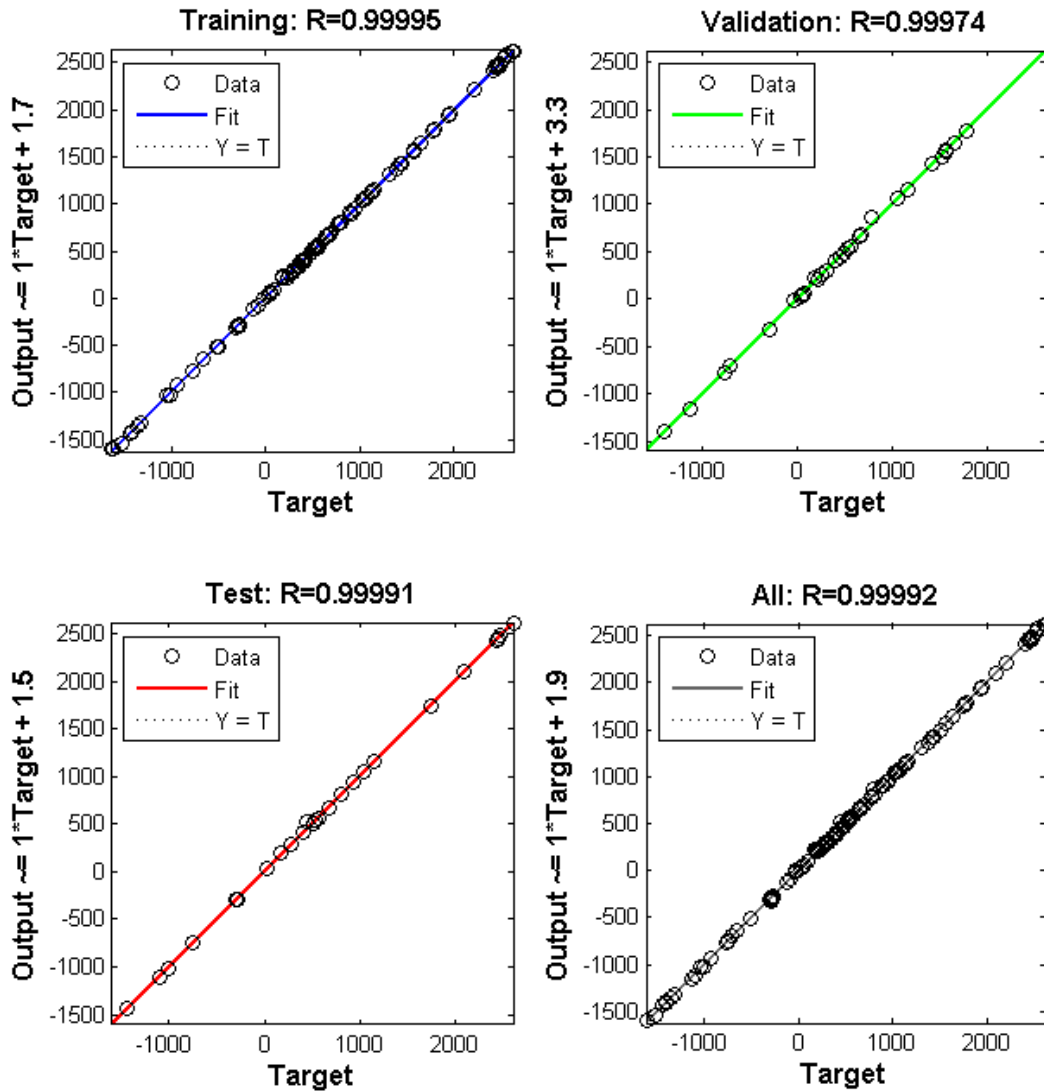


Figure 4.9 Courbes de régression

### 4.3 Commande rapprochée des différentes entités

#### 4.3.1 Choix de commande pour le générateur photovoltaïque

Pour obtenir la puissance maximale d'un panneau solaire, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking) en anglais est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules. A noter que la

caractéristique d'une cellule est affectée par l'éclairement et la température. Le principe de l'algorithme MPPT est d'agir par une commande d'un hacheur afin que le GPV fonctionne au point de puissance maximale de la caractéristique puissance-tension et d'y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre, et ce pour son utilisation fiable. Nous trouvons dans la littérature plusieurs exemples de ces techniques . Toutefois ces méthodes ne sont pas très performants en cas d'ombrage partiel que subit de temps à autre le GPV . Une des méthodes récentes qui peut contrecarrer cette carence est la méthode ESC (Extremum seeking control) ou control par recherche d'extremum qui a fait l'objet de notre choix, et qui sera présentée par la suite. La figure 4.10 présente l'architecture de commande par cet algorithme.

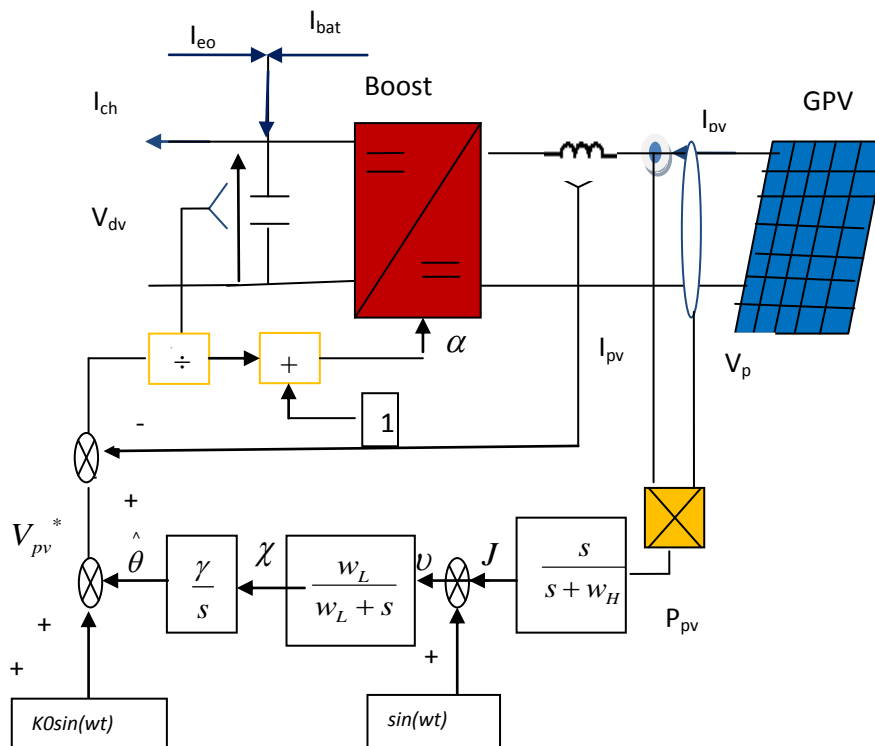


Figure 4.10 Schéma de contrôle du GPV par le contrôleur ESC

#### 4.3.1.1 Présentation de l'algorithme contrôle par recherche de l'extremum

La méthode Perturbe et observe P & O , la plus répandue parmi les techniques MPPT en cas d'ombrage partiel ne converge pas toujours au point de puissance maximal global vu que la caractéristique P-V sous l'effet de l'ombrage présente plusieurs extremum locaux.

L'algorithme ESC (Extremum seeking control) quant à lui est considéré comme mieux adapté pour converger à l'extremum global. La figure 4.11 montre l'effet de l'ombrage d'un panneau solaire[69].

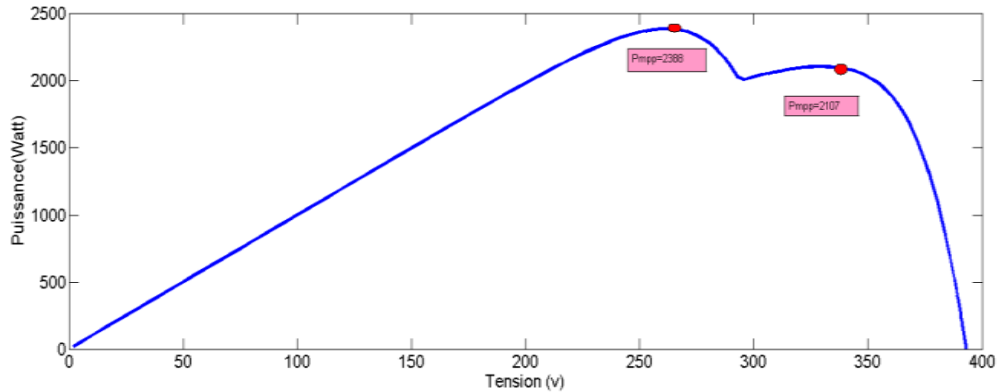


Figure 4.11 Effet de l'ombrage partiel sur le GPV

Nous pouvons trouver plus de détail sur cette technique dans la littérature dans les travaux de Sternby [70] et un aperçu plus récent peut être trouvé dans les travaux de Ariyur et Krstic [71]. Astrom et Wittenmark ont classé la recherche de l'extremum comme l'une des méthodes de contrôle adaptatif les plus prometteuses, puisque le contrôle de recherche d'extremum a de meilleures caractéristiques et performances que l'algorithme MPPT (P & O).

#### 4.3.1.2 Principe de la méthode ESC

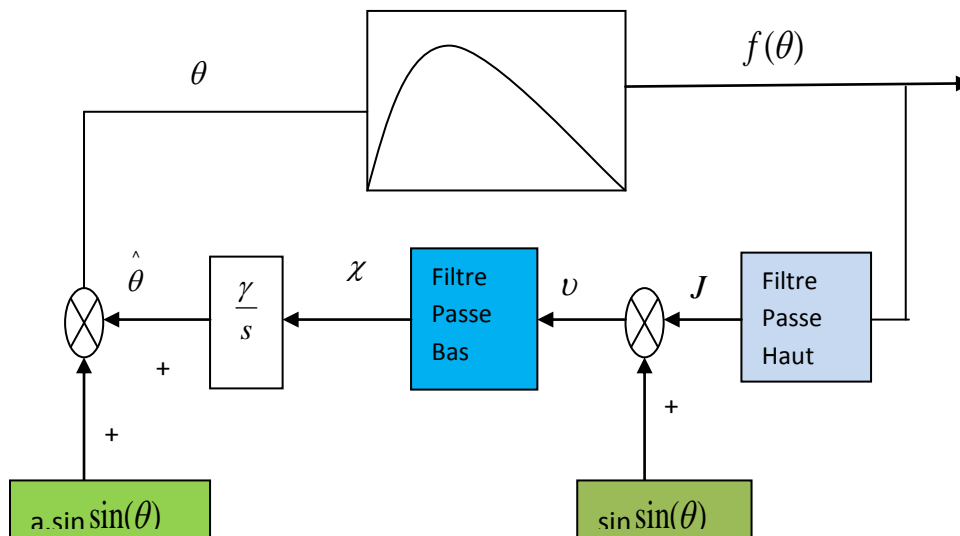


Figure 4.12 Principe de L'algorithme ESC

Comme le montre la figure 4.12, l'ESC utilise un signal de perturbation périodique lent,  $\sin(\omega t)$ , qui est ajouté au signal estimé  $\hat{\theta}$ . Si le signal de perturbation est suffisamment lent, le système apparaît comme une carte statique,  $y = f(\theta)$ , et sa dynamique n'interfère pas avec le schéma de recherche de pics. Si  $\theta$  est de chaque côté de  $\theta^*$ , qui est le point optimal, la perturbation ( $a \cdot \sin(\omega t)$ ) créera une réponse périodique de  $y$ , qui est soit en phase soit déphasée par rapport à ( $a \cdot \sin(\omega t)$ ). Le filtre passe-haut élimine la "composante continue" de  $y$ . Ainsi,  $a \cdot \sin(\omega t)$  et le filtre passe-haut seront approximativement deux sinusoidaux qui sont en phase si  $\theta < \theta^*$  ou déphasés si  $\theta > \theta^*$ . L'intégrateur  $\hat{\theta} = (\gamma / s) \chi$  oriente le gradient vers le sens du point optimal[69].

Dans la figure 4.13, la sortie de l'algorithme ESC a été illustrée lorsque le point de fonctionnement passe du côté gauche au côté droit de l'optimum de la courbe Puissance-Tension. Sur cette figure,  $x_1 + x_0 \sin(\omega_0 t)$  est le signal d'entrée modulé lorsque le point de fonctionnement est du côté gauche du point de puissance maximale,  $x_2 + x_0 \sin(\omega_0 t)$  est le signal modulé lorsque le point de fonctionnement coïncide avec le point de puissance maximale et  $x_3 + x_0 \sin(\omega_0 t)$  est un signal de sortie modulé lorsque le point de fonctionnement est du côté droit de la point de puissance maximale.

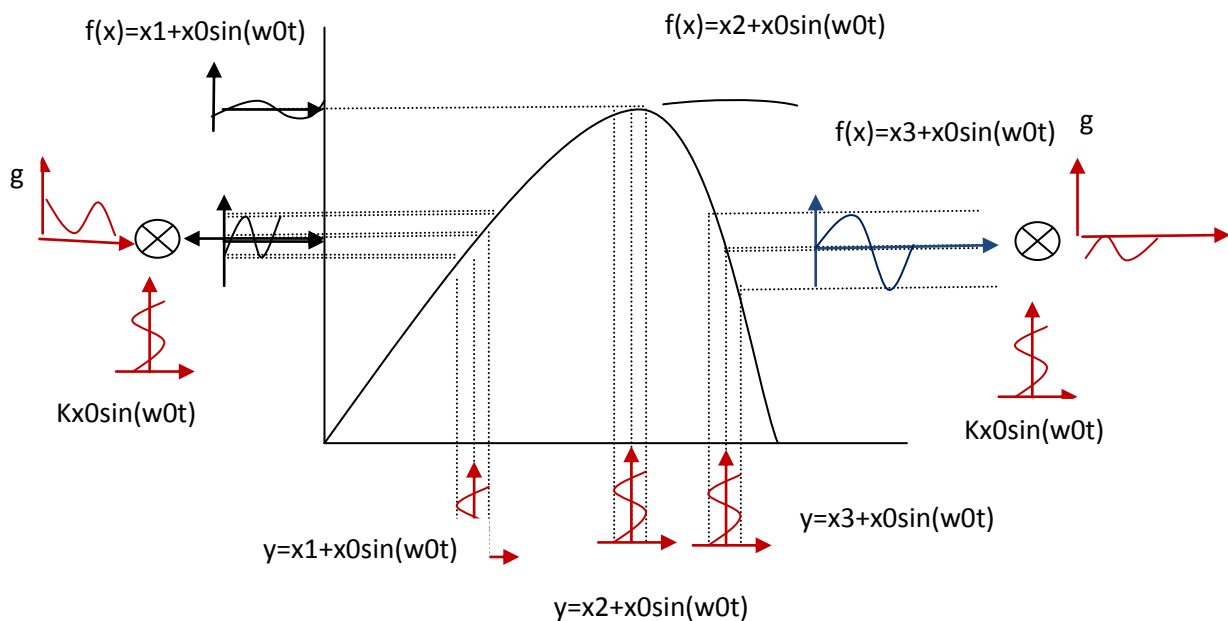


Figure 4.13 Principe de fonctionnement de l'algorithme ESC



Le système de la figure 4.10 peut être décrit mathématiquement comme suit:

$$\begin{cases} y = f(\hat{\theta} + a \sin(\omega t)) \\ \dot{\hat{\theta}} = -\gamma \chi \\ \chi = v * L^{-1}\{G_{LPF}(s)\} \\ v = [y * L^{-1}\{G_{HPF}(s)\}] \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4.1)$$

où \* est l'opérateur de convolution et  $L^{-1}$  est la transformée de Laplace inverse. Les fonctions de transfert du filtre passe-haut GHPF et passe-bas GLPF sont respectivement [69]:

$$\begin{cases} G_{HPF} = \frac{s}{s + \omega_H} \\ G_{LPF} = \frac{\omega_L}{s + \omega_L} \end{cases} \quad (4.2)$$

La conception des paramètres du contrôleur ESC est généralement un processus d'accord plutôt que d'un design analytique dû à la fonction non linéaire inconnue  $P=f(v)$ . Les valeurs choisies pour le contrôleur et dont les résultats étaient très satisfaisants sont donnés en Annexe.

#### 4.3.1.3 Analyse de la stabilité du contrôle par recherche d'extremum

L'analyse de stabilité de l'algorithme ESC a été étudiée dans la littérature [72]. Dans toutes ces publications, le contrôle traditionnel de l'extremum avec des filtres réguliers de premier ordre a été considéré. Selon la discussion précédente, la carte non linéaire dans le schéma ESC est considérée concave et présente un seul extrême en conditions de météo standard mais peut présenter plus d'extremums en cas d'ombrage. Par conséquent, le point de puissance maximale correspond à  $\theta^*$  pour lequel on a  $\frac{\partial f(\theta^*)}{\partial \theta} = 0$  et  $\frac{\partial^2 f(\theta^*)}{\partial \theta^2} < 0$ . Considérant le schéma de l'algorithme ESC, la variable de sortie de la courbe non-linéaire définie dans l'équation 4.3:

$$y = f(\hat{\theta} + a \sin(\omega t)) \quad (4.3)$$

Où  $a$  et  $\omega$  sont l'amplitude et la fréquence angulaire du signal de perturbation.

Puisque le signal de perturbation est supposé être petit, l'expansion de Taylor de cette équation peut s'écrire sous cette forme:

$$y = f(\hat{\theta}) + \frac{df(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}} a \sin(\omega t) + THO \quad (4.4)$$

où  $\hat{\theta}$  est l'approximation de  $\theta^*$  et THO correspond aux termes plus élevés. En passant à travers un filtre passe-haut de premier ordre, le signal de sortie y sera:

$$J \approx L^{-1} \left\{ \frac{s}{s + w_H} \right\} * f(\hat{\theta}) + L^{-1} \left\{ \frac{s}{s + w_H} \right\} * \left\{ \frac{df(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}} a \sin(\omega t) \right\} \quad (4.5)$$

Le filtre passe-haut du premier ordre agit comme un opérateur dérivé en série avec un filtre passe-bas  $[s. \frac{1}{s + w_H}]$ . En appliquant l'opérateur dérivé du filtre passe-haut dans (4.4),

cette équation devient:

$$J \approx L^{-1} \left\{ \frac{s}{s + w_H} \right\} * f(\hat{\theta}) + L^{-1} \left\{ \frac{1}{s + w_H} \right\} * \left\{ \frac{df(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}} a \sin(\omega t) \right\} \quad (4.6)$$

En Multipliant le signal de modulé  $\sin(\omega t)$  par le signal issu du filtre passe-haut donne:

$$v(t) = \left[ \frac{df(\hat{\theta})}{dt} \sin(\omega t) + \frac{df(\hat{\theta})}{2d\hat{\theta}dt} a + \frac{df(\hat{\theta})}{2d\hat{\theta}dt} a \omega \sin(\omega t) \cos(\omega t) \right] * L^{-1} \left\{ \frac{1}{s + w_H} \right\} \quad (4.7)$$

En passant par le filtre passe-bas le signal modulé devient:

$$v(t) = \left[ \frac{df(\hat{\theta})}{dt} \sin(\omega t) + \frac{df(\hat{\theta})}{2d\hat{\theta}dt} a + \frac{df(\hat{\theta})}{2d\hat{\theta}dt} a \omega \sin(\omega t) \cos(\omega t) \right] * L^{-1} \left\{ \frac{1}{s + w_H} \right\} * L^{-1} \left\{ \frac{w_L}{s + w_L} \right\} \quad (4.8)$$

Sous les hypothèses que l'amplitude de la perturbation sinusoïdale est petite et l'harmonique du filtre passe-haut est atténuée par un filtre passe-bas, la sortie du filtre passe-bas est proportionnelle au gradient de la carte non linéaire par rapport à son entrée et son temps,

$$\chi \approx \left[ \frac{a}{2} \frac{df(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}dt} \right] * L^{-1} \left\{ \frac{w_L}{s + w_L} \right\} \quad (4.9)$$

Le signal de sortie estimé deviendra:

$$\hat{\theta} \approx \left[ \frac{a}{2} \frac{df(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}dt} \right] * L^{-1} \left\{ \frac{w_L}{s+w_L} \right\} * L^{-1} \left( \frac{\gamma}{s} \right) \quad (4.10)$$

Cette équation devient finalement:

$$\hat{\theta} \approx \left[ \frac{a\gamma}{2} \frac{df(\hat{\theta})}{d\hat{\theta}dt} \right] * L^{-1} \left\{ \frac{w_L}{s+w_L} \right\} \quad (4.11)$$

Par conséquent, au voisinage du point extrême, l'amplitude du signal de sortie est faible puisque le gradient est faible. On peut voir que l'amplitude du signal estimé dépend de  $\gamma$  et  $a$ .

#### 4.3.2 Commande en courant des batteries

Le convertisseur statique associé aux batteries est contrôlé en courant. L'utilisation des batteries (charge ou décharge) est contrôlée par la référence générée par le gestionnaire d'énergie RN. La figure 4.14 représente le principe de cette commande. Vu la dynamique lente des batteries, on se permet d'utiliser un simple correcteur proportionnel intégral PI permettant d'imposer les signaux de commande au hacheur réversible pour contrôler le courant correspondant à la puissance qui doit être stockée ou restitués lors du fonctionnement du système.

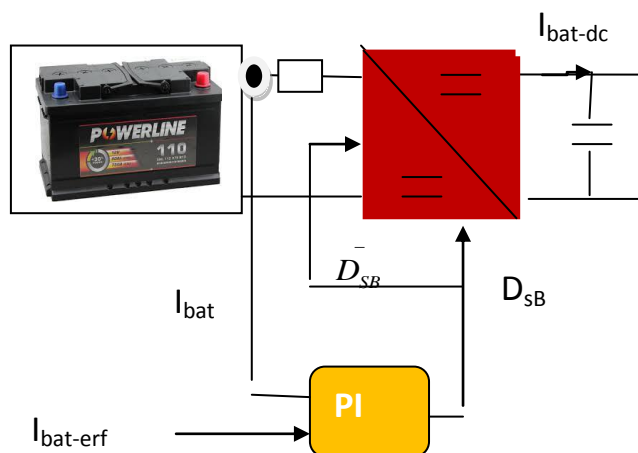


Figure 4.14 Schéma de principe du contrôle du convertisseur associé aux batteries.

Le régulateur PI des batteries pour un hacheur aux valeurs moyennes est de la forme:

$$PI(s) = \frac{K_p(1 + \tau_B s)}{\tau_B s} \quad (4.12)$$

Avec:  $K_p = \frac{L_B}{V_{dc} T_0}$  et  $\tau_B = \frac{L_B}{R_B}$

Un choix de  $T_0$  inférieure à la constante de temps du système garantira la convergence du régulateur PI.

#### 4.3.4 Choix de commande de l'éolienne.

La gestion d'énergie développée par l'algorithme des réseaux de neurones agit principalement sur le couple de référence de la turbine éolienne selon la vitesse de vent qui définit dans quelle zone fonctionne la turbine éolienne en se référant à sa courbe de puissance spécifique illustrée dans la figure 4.15[73]. Ainsi, on peut considérer les trois zones de fonctionnements suivants:

**Dans la zone I**, l'éolienne est arrêtée, car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis à vis de l'énergie de fonctionnement. Le démarrage de l'aérogénérateur s'effectue au-delà d'une vitesse minimale du vent  $V_{min}=2m/s$

**Dans la zone II**, l'aérogénérateur n'a pas encore atteint sa puissance nominale d'où la nécessité d'une commande MPPT qui maintient le couple aérodynamique maximal qui correspond au coefficient  $C_p$ -max se situant au sommet de la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne. Le gestionnaire d'énergie actionne le **Mode 1** quand l'éolienne se doit fonctionner dans cette zone pour assurer une maximisation de la puissance générée par la GSAP.

**Dans La zone III**, La vitesse du vent amène la GSAP à fonctionner à pleine charge pour une vitesse de vent  $V_n= 9m/s$  et l'aérogénérateur arrive à sa puissance nominale. Dans cette zone le gestionnaire d'énergie actionne le Mode de fonctionnement **Mode 2** permettant un fonctionnement de la turbine éolienne à sa puissance nominale ou **Mode 3** qui est le mode

de limitation de puissance qui doit être inférieure à la puissance nominale afin de respecter les contraintes de fonctionnement des autres sous-systèmes. Au-delà d'une vitesse  $V_{max}=17m/s$ , un système d'urgence est actionné pour arrêter le fonctionnement du système.

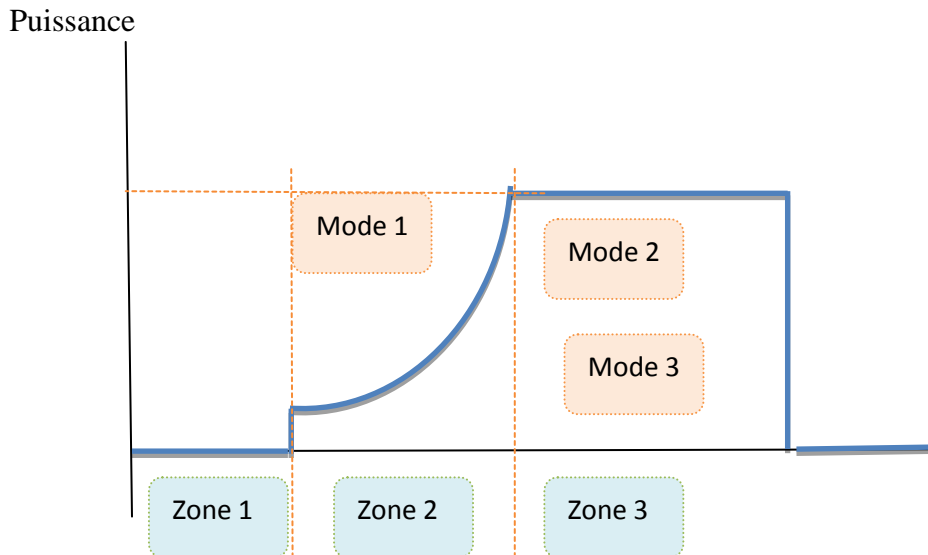


Figure 4.15 Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur

Afin d'assurer un fonctionnement optimum du générateur éolien en zone II, il est indispensable d'imposer au système un fonctionnement qui permet de soutirer le maximum de puissance que peut offrir la vitesse du vent disponible. Dans la littérature, nous pouvons trouver un grand nombre de techniques qui assurent cet objectif basée sur le principe de poursuite du point de fonctionnement de la puissance maximale dite **MPPT** (Maximum power point tracker) basée sur un fonctionnement à vitesse variable par la commande du couple ou de la vitesse. Dans cette étude nous avons choisi une commande en couple qui permet une permutation plus souple entre les modes de fonctionnement sans avoir recours à la mesure de la vitesse du vent.

#### 4.3.4.1 Commande en couple de la GSAP

Nous utiliserons la connaissance de la courbe caractéristique de la voile éolienne pour la commander en couple. Dans notre cas, nous choisissons de commander le couple de la Génératrice Synchrones à Aimants Permanents (GSAP), car celui-ci est proportionnel au courant quadratique  $I_q$ , et répond donc à la commande suivant les dynamiques électriques de la génératrice. Notre objectif est donc d'obtenir une référence souhaitée  $T_{ref}(n)$ , pour le couple électromagnétique  $T_{em}$  qui prend cette forme[74]:

$$T_{em} = \frac{C_p}{\lambda^3} \frac{\rho \pi R_t^5}{2} \frac{1}{G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (4.13)$$

Le couple électromagnétique de référence à imposer s'écrira comme suit :

$$T_{em-ref} = K_{op} \Omega_{mec}^2 \quad (4.14)$$

Avec 
$$K_{op} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{op}^3} \frac{\rho \pi R_t^5}{2} \frac{1}{G^3} \quad (4.13)$$

Cette loi de commande, en plus de la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure de l'éolienne, ne nécessite qu'une seule grandeur à mesurer ou à estimer : la vitesse mécanique du générateur synchrone à aimants permanents  $\Omega_{mec}$ .

Cette loi de commande correspond à la poursuite de puissance maximale (**MPPT**) appliquée en **Zone II**. Si la puissance capturée dépasse la puissance nominale de l'éolienne (**Zone III**), il faut concevoir une seconde loi de commande qui limiterait la puissance de l'éolienne à sa valeur nominale. Le couple électromagnétique de référence s'écrira alors :

$$T_{em-ref} = P_n / \Omega_{mec} \quad (4.15)$$

Avec  $P_n$  la puissance nominale de la génératrice synchrone.

Pour basculer à une puissance de référence inférieure à la puissance nominale et différente de la puissance MPPT à  $C_{pmax}$ , le couple de référence deviendra:

$$T_{em-ref} = P_{ref} / \Omega_{mec} \quad (4.16)$$

Les différents couples de références seront imposés par le gestionnaire d'énergie selon les conditions de fonctionnement de l'algorithme de gestion d'énergie proposé comme illustré par le tableau suivant:

Modes	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Couple de référence	$T_{em-ref} = K_{op} \Omega_{mec}^2$	$T_{em-ref} = P_n / \Omega_{mec}$	$T_{em-ref} = P_{ref} / \Omega_{mec}$

Tableau 4.1 Modes de contrôle du couple électromagnétique de la GSAP

### Commande vectorielle à PI fractionnaire pour le générateur éolien

L'éolienne est contrôlée à base d'une commande vectorielle grâce à un onduleur MLI qui impose les tensions  $[V_a, V_b, V_c]_{ref}$  des phases à la génératrice synchrone à aimants permanents. Nous avons choisi de contrôler le couple par des boucles de courants qui imposent les courants de référence dans le plan d-q prenant la forme suivante:

$$\begin{cases} I_{d-GSAP-ref} = 0 \\ I_{q-GSAP-ref} = \frac{2}{3p\phi} T_{em-ref} \end{cases} \quad (4.17)$$

Dans ces boucles, seront introduits des régulateur PI d'ordre non entier (fractionnaires) vu la capacité des ces régulateurs à assurer une précision et une robustesse vis à vis des perturbations internes (paramètres) et externes du système éolien. En effet les permutations entre les modes en fonctionnement variable accentuent ces perturbations, d'où la nécessité de les prendre en charge par de tels régulateurs. La figure 4.16 illustre le schéma de principe de la commande vectorielle avec PI fractionnaire.

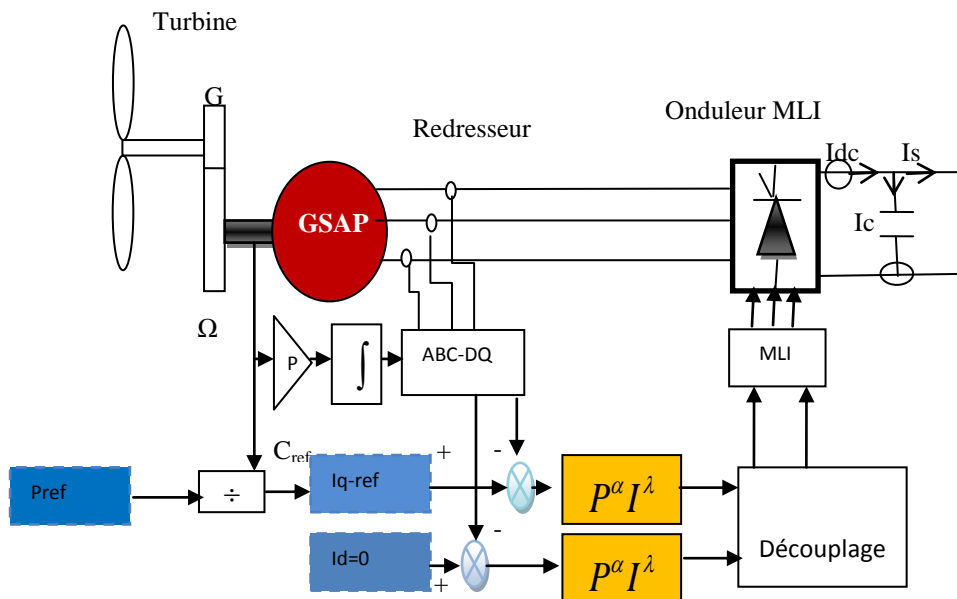


Figure 4.16 Schéma synoptique de la commande de la GSAP

#### 4.3.4.2 Présentation du correcteur PID d'ordre fractionnaire

Le régulateur PI (proportionnel intégral dérivateur) d'ordre fractionnaire est l'un des contrôleurs les plus populaires et attrayants pour les systèmes contrôlés. Cette popularité industrielle provient des raisons suivantes:

- Les contrôleurs PID fractionnaires ont une structure simple, ce qui les rend faciles à mettre en œuvre, ainsi que de supporter des variations paramétriques sans diverger.
- La robustesse de la performance dans ce type de contrôleurs est acceptable dans une large gamme d'applications.
- Il existe de nombreuses méthodes bien établies de réglage de ces régulateurs.

Les fondements du calcul par ordre fractionnaire passe par l'appréhension d'un certain nombre de fonctions à l'exemple de la fonction gamma et la fonction Mittag-Leffler ainsi qu'un certain nombre d'approximations des intégrateurs et dérivateurs fractionnaires à l'instar de celles de Grunwald-Letnikov, Reimann-Liouville et Caputo[75]. Nous trouverons dans la littérature les principales propriétés des ces régulateurs d'ordre fractionnaire dans les références suivantes[76].

Le contrôleur d'ordre fractionnaire ( $PI^\alpha D^\beta$ ) a été proposé en 1999 comme une forme généralisée du Contrôleur PID en remplaçant l'ordre entier de l'intégrateur et du dérivateur par un ordre fractionnaire La fonction de transfert du PID proposé est [77]:

$$C(s) = K_p + K_i s^{-\alpha} + K_d s^\beta \quad 0 < \alpha, \beta < 1 \quad (4.16)$$

où  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sont des gains proportionnels, intégraux et dérivés. Il est prévu que le contrôleur améliorerait la performance du contrôle du système en raison de l'élargissement de la zone de stabilité dans l'ordre fractionnaire PID comparé à l'ordre entier PID comme le montre la Fig. 4.17

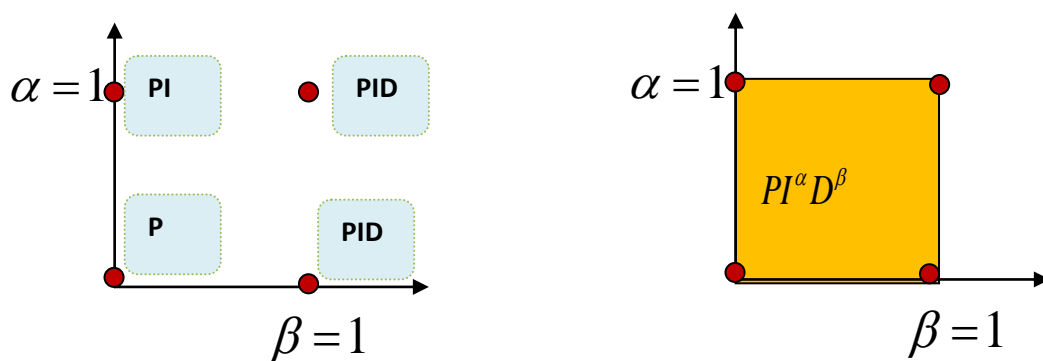


Figure 4.17 Famille des PID conventionnels et PID d'ordre fractionnaires

En cas de correction proportionnelle -intégrale seulement, le contrôleur PID prendra la forme d'un PI d'ordre fractionnaire de la forme suivante :



$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\alpha} \quad (4.18)$$

L'équation 4.17 peut aussi se mettre pour un PI d'ordre intégral sous la forme :

$$C(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right)^\lambda \quad (4.19)$$

Où  $K_p, K_i$  et  $\lambda \in (0, 1)$  sont des nombres positifs.

### A. Design et réglage du correcteur PI d'ordre fractionnaire.

Il existe plusieurs méthodes dans la littérature pour le réglage des PID fractionnaire[69]. Le principe de ces méthodes consiste à la connaissance de la fréquence de coupure et une marge de phase assignée de manière à remplir les critères de stabilité suivante:

- Critère de marge de phase

La phase de la chaîne directe à la fréquence de coupure est donnée par :

$$\text{Arg}(G(j\omega_c)) = \text{Arg}[C(j\omega_c)F(j\omega_c)] = -\pi + \phi_m \quad (4.20)$$

$G, C$  et  $F$  sont respectivement les fonctions de transfert de la chaîne directe du contrôleur et du système.  $\phi_m$  est la marge de phase.

- Critère de la fréquence de coupure :

$$|G(j\omega_c)| = |C(j\omega_c)P(j\omega_c)|_{dB} = |C(j\omega_c)|_{dB} |P(j\omega_c)|_{dB} = 0 \quad (4.21)$$

- Contrainte de robustesse aux variations de gain en boucle :

Cette contrainte exige que la dérivée du gain de la phase en boucle ouverte autour de la fréquence de coupure soit zéro.

$$\left. \frac{d(\text{Arg}|G(i\omega_c)|)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_c} = 0 \quad (4.22)$$

#### 4.3.4.3 Réglage du contrôleur PI fractionnaire de la GSAP.

Le schéma bloc des boucles de régulation des courants  $I_d$  et  $I_q$  se présente selon la figure 4.18

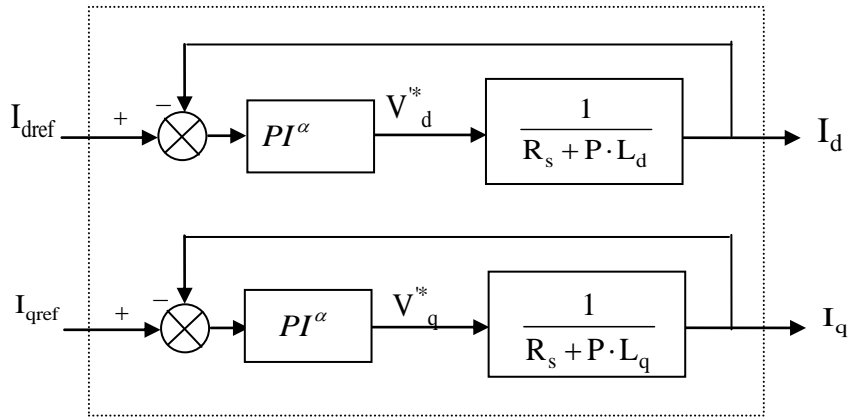


Figure 4.18 : Schéma block des boucles de régulation des courants

La fonction de transfert en boucle ouverte du système contrôlé avec le contrôleur fractionnaire PI est:

$$G(s) = \left( \frac{k_i}{s^\lambda} (1 + K_c) \right) \left( \frac{K_m}{T_m s + 1} \right) \quad (4.23)$$

Dans l'équation (4.23),  $K_i$  est le coefficient intégrateur du contrôleur et  $K_c = K_p / K_I$ .

La fonction de transfert du système en boucle fermée peut se mettre sous la forme:

$$F(s) = \frac{1}{1 + G^{-1}(s)} \quad (4.24)$$

Une bonne performance de suivi peut être assurée au sein de la bande passante  $w_B$ , qui définit  $F(j\omega_B) \approx 1 / \sqrt{2}$ .

La stratégie la plus immédiate pour rendre robuste la boucle fermée est de choisir une pulsation  $w_c$  se situant dans une plage de fréquence  $w_B$  où les variations de phase du procédé ne sont pas excessives et de réduire au maximum les variations de phase du régulateur. En adoptant cette stratégie, la variation de la marge de phase ne sera plus qu'égal à la variation de la phase du procédé. À cette fin, l'approche de mise en forme proposée dans la référence [81] tire parti des caractéristiques des diagrammes de Bode de l'intégrateur fractionnaire, qui montre une courbe de phase «plate» dans un intervalle de fréquence large et un diagramme d'amplitude avec des pentes fractionnaires de  $-20 \lambda$  dB / décade.

La marge de phase qui satisfait les conditions de stabilité précitées et correspondant à la pulsation de coupure se trouvant dans la bande passante  $w_B$  est de la forme:

$$\phi_m = 0.5(1 - \lambda)\pi \quad (4.25)$$

La pulsation de coupure pour la quelle l'intégrateur fractionnaire présente une courbe plate est dans la plage  $[w_B / 1.7, w_B / 13]$ .

Les paramètres appropriés  $K_p$  et  $K_c$  reliés à la fréquence de coupure sont donnés par les équations 4.26 et 4.27 :

$$K_c = \frac{w_c}{\left(\frac{w_c}{T_m}\right)^\lambda (\sin(0.5\lambda\pi - w_c \cos(0.5\lambda\pi))} \quad (4.26)$$

$$K_I = \frac{\sqrt{B(w_c, \lambda)}}{K_m} \left(\frac{w_c}{T_m}\right)^\lambda \quad (4.27)$$

$$\text{Avec :} \quad B(w_b, \lambda) = \frac{1 + w_c^2}{1 + d^2 w_c^2 + 2d w_c \cos(0.5\lambda\pi)} \quad (4.28)$$

$$\text{Où:} \quad d = \frac{1}{\sin(0.5\lambda\pi) - w_b \cos(0.5\lambda\pi)} \quad (4.29)$$

la simplicité de cette méthode consiste en le choix de la fréquence de coupure  $w_c = w_B / 1.7$  et puis les coefficients  $K_c$  et  $K_p$  ne dépendent que de l'ordre fractionnaire  $\lambda$ .

Le tableau suivant résume les résultats de calcul des paramètres du contrôleur fractionnaire:

Pulsation de coupure $w_c$	58.82 rd/s
Bande passante $W_B$	100 rd/s
Ordre fractionnaire $\lambda$	0.7
Marge de phase	27°
Coefficient intégrateur $K_I$	1.7762e+03
Coefficient proportionnel $K_p$	4.7945e-04

Tableau 4.2 Résultats de calcul des paramètres du contrôleur PI fractionnaire

### 3.3.5 Commande de la MSAP

Le contrôle de la MSAP qui entraîne la pompe du module RO est soumis à la demande en eau douce représentée par la puissance équivalente en eau douce qui s'impose comme référence de fonctionnement pour la MSAP. Il est donc impératif d'assurer l'acheminement de la puissance qu'impose le gestionnaire RN à la MSAP. Nous proposons à cet effet une commande du couple basée sur une commande vectorielle comportant deux boucles en cascade externe et interne comme illustré par la figure.4.19. La première boucle est dédiée la régulation du bus continu autour d'une valeur fixe par un régulateur robuste basée sur la théorie de Lyapounov. Quant à la seconde boucle, elle a pour rôle par le biais du contrôle des courant direct et en quadrature d'assurer le transfert de toute la puissance générée par le système hybride vers la MSAP. Alors que la référence du courant direct est nulle, le courant en quadrature est issu de la boucle externe pour assurer une égalité des puissances générée par les sources et la puissance consommée par la MSAP. A la sortie des régulateurs, nous obtenons les tensions de références à imposer à la MSAP par le biais de l'onduleur à commande MLI.

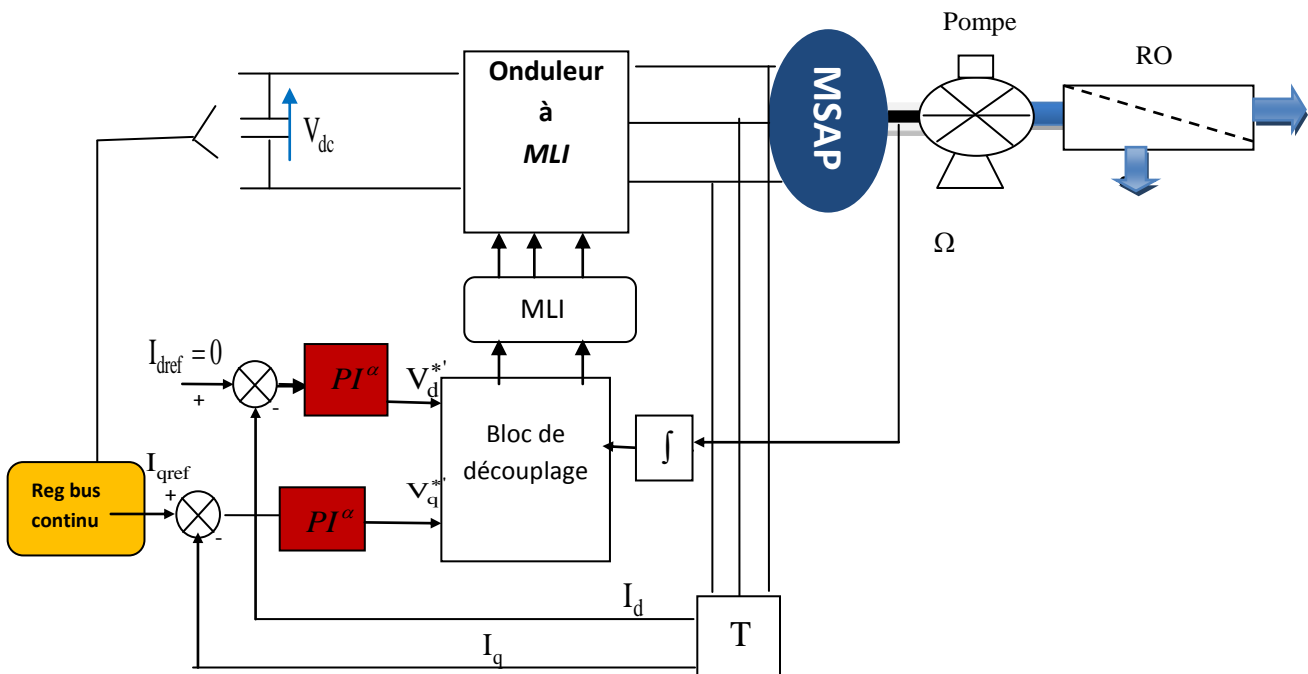


Figure 4.19 Schéma de commande de la MSAP

#### 4.3.5.1 régulation du bus continu par théorie de Lyapunov

L'équation du courant au bus continu est donnée par la relation suivante:

$$C \frac{dV_c}{dt} = I_c \quad (4.30)$$

Pour la régulation du bus continu, on choisit l'erreur entre la tension de référence et la tension du bus tel que:

$$e = V_{dcref} - V_{dc} \quad (4.31)$$

En choisissant une fonction de Lyapunov quadratique de la forme:

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (4.32)$$

Où  $e$  représente l'erreur, il suffit comme condition suffisante de stabilité d'assurer la dérivée de l'erreur définie négative tel que:

$$\dot{e} = -ke \quad (4.33)$$

De l'équation 3.35 on peut obtenir:

$$\dot{V} = \dot{e} e \quad (4.34)$$

Ainsi la dérivée de la tension peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{V} = -Ke^2 \quad (4.35)$$

A partir de l'équation du bus 4.32, on obtient:

$$I_c = -cKe \quad (4.36)$$

Pour une égalité des puissances en amont et en aval du bus continu en considérant la commande vectorielle, il faut satisfaire l'équation suivante:

$$V_q \cdot I_q = I_c \cdot V_{dc} - P_s \quad (4.37)$$

Où  $P_s$  est la somme des puissances des sources de puissance.

Le courant en quadrature issu de la boucle de régulation se détermine alors ainsi:

$$I_q = \frac{I_{cref} V_{dc} - P_s}{V_q} \quad (4.38)$$

La figure 4.20 schématise la boucle de régulation du bus continu générant le courant de référence  $I_q$  de la MSAP.

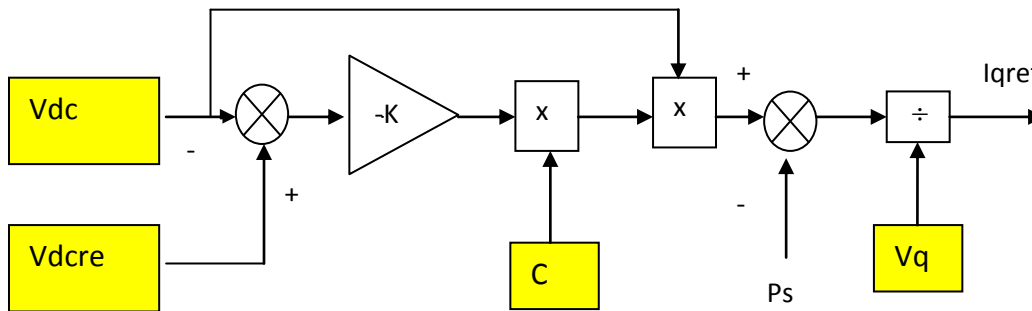


Figure 4.20 Schéma de la boucle de régulation du bus continu

#### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la stratégie de gestion d'énergie du système de dessalement hybride basée sur l'algorithme des réseaux de neurones a été développée pour contrôler les différents sous-systèmes tenant en compte l'équilibre production-consommation avec prise en charge des limitations survenant au cours du fonctionnement du système sous des entrées exogènes variables. Le principe de la commande MPPT basée sur le contrôle par recherche d'extremum (ESC) du générateur photovoltaïque a été explicitée. Une telle commande permettra de gérer les moments d'ombrage partiel pouvant survenir durant la journée. La commande des batteries associées au hacheur réversible a été présentée dont le courant de référence est généré par le gestionnaire RN. Par ailleurs, nous avons présenté les principes théoriques de la synthèse de commandes du générateur éolien par fonctionnant à différents Modes imposés par la zone de fonctionnement de la turbine éolienne, la demande de la charge et l'état de charge des batteries. Finalement, nous avons développé la commande de la MSAP entraînant l'unité de dessalement par une commande vectorielle par l'usage de contrôleurs d'ordre fractionnaire. La régulation du bus continu par l'approche de Lyapounov a été proposée pour acheminer la puissance générée par les sources de puissance vers l'unité de dessalement. L'approche de commande du système complet sera mise en œuvre grâce aux simulateurs et programmes développés afin de d'atteindre les finalités précitées et dont les résultats seront présentés dans le chapitre suivant.

# Chapitre V

---

RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUES

## 5.1 Introduction

Nous avons synthétisé dans le chapitre précédent tous les algorithmes de commande du système de dessalement, nécessaires à la réalisation des objectifs précités. Elles doivent donc maintenant être validées par des simulations avant d'être mises en œuvre expérimentalement. Nous utilisons les simulateurs développés pour vérifier d'une part, que la maximisation de la puissance au niveau des sources renouvelables est assurée et se fait efficacement et d'autre part, que la gestion de l'énergie est assurée par la technique basée sur les réseaux de neurone, qui assure une permutation précise et souple selon les modes de fonctionnement exigé par le profil de charge et l'approvisionnement de puissance disponible au niveau de chaque source. Les simulations seront effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink avec le solveur ode 23tb, une tolérance relative de  $tol=1.10^{-3}$ , et un pas variable de maximum  $t_{simu}=210^{-5}$ , afin de tenir compte de la période de découpage des différents convertisseurs. Le temps de simulation choisi est de 24s afin d'assimiler la durée d'une journée de fonctionnement du système de dessalement hybride.

## 5.2 Choix des entrées

Le choix des entrées exogènes du système est critique pour mettre en valeur les performances des commandes développés au cours de cette thèse. Nous considérons alors des allures d'éclairement, de vent et de température basées sur des données climatiques réelles pour des dates précises de la ville d'Illizi que nous avons choisie comme ville modèle.

### 5.2.1 Vitesse du vent

Nous considérons deux profils de vent correspondant à deux dates différentes de l'année et cela pour deux raisons: D'une part, un profil de vent correspondant à une forte demande en eau exigée par le profil de consommation pendant l'été et d'une part un second profil correspondant à la saison hivernale avec des moments de calme du vent. La figure 5.1 montre l'allure de ces deux profils. Il est remarquable que les vitesses varient entre 3m/s et 8 m/s pour le premier profil et entre 0 et 10 m/s pour le second avec un moment de calme durant la journée.. Le premier profil correspond à une journée de mai 2017 alors que le second correspond à une journée de Janvier de la même année.



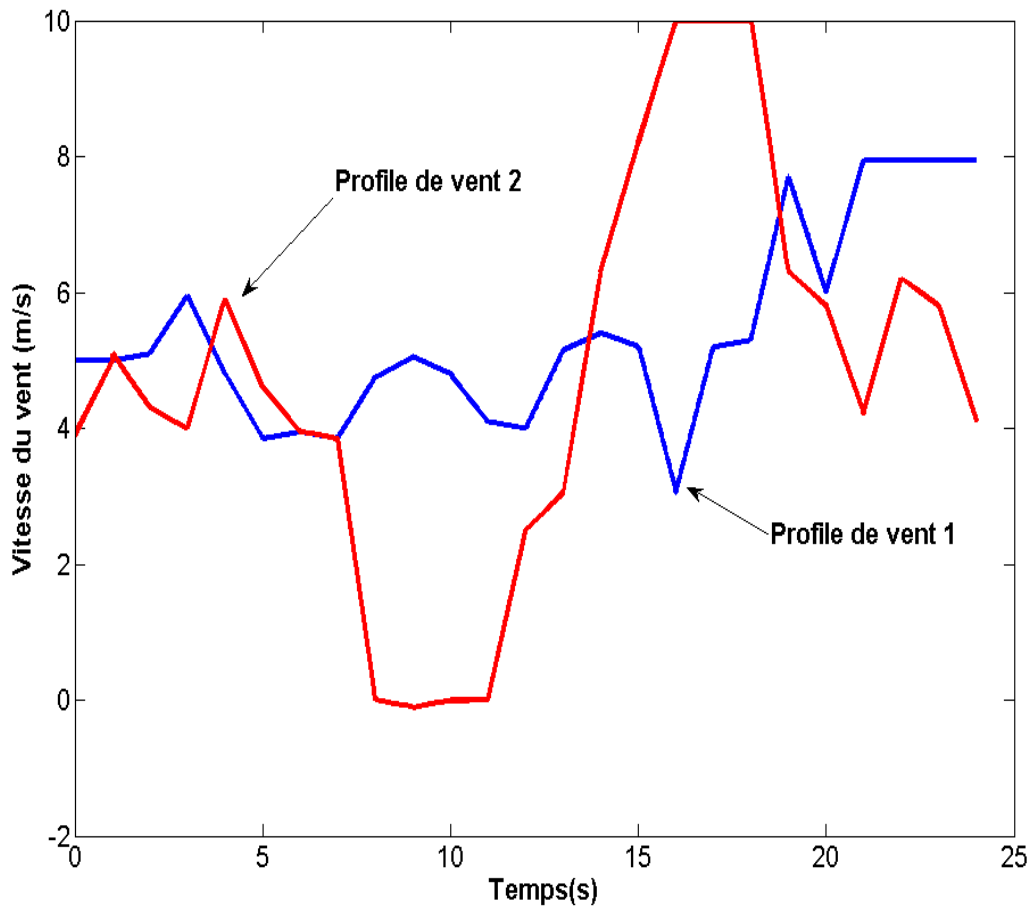


Figure 5.1 – Profil d'entrée de la vitesse du vent

### 5.2.2 L'irradiation solaire

Pour le générateur photovoltaïque, nous considérons comme entrée exogène l'irradiation solaire correspondant aux mêmes dates de l'entrée assignée à l'aérogénérateur. Alors que le profil estival est sans ombrage, nous introduisons avec le second profil hivernal un ombrage partiel sur une partie des modules solaires du GPV comme il est indiqué par la figure 5.2. L'ombrage touche deux panneaux du GPV réduisant l'éclairement jusqu'à  $450 \text{ W/m}^2$  pendant la mi-journée alors que le reste des panneaux est  $1000 \text{ W/m}^2$ .

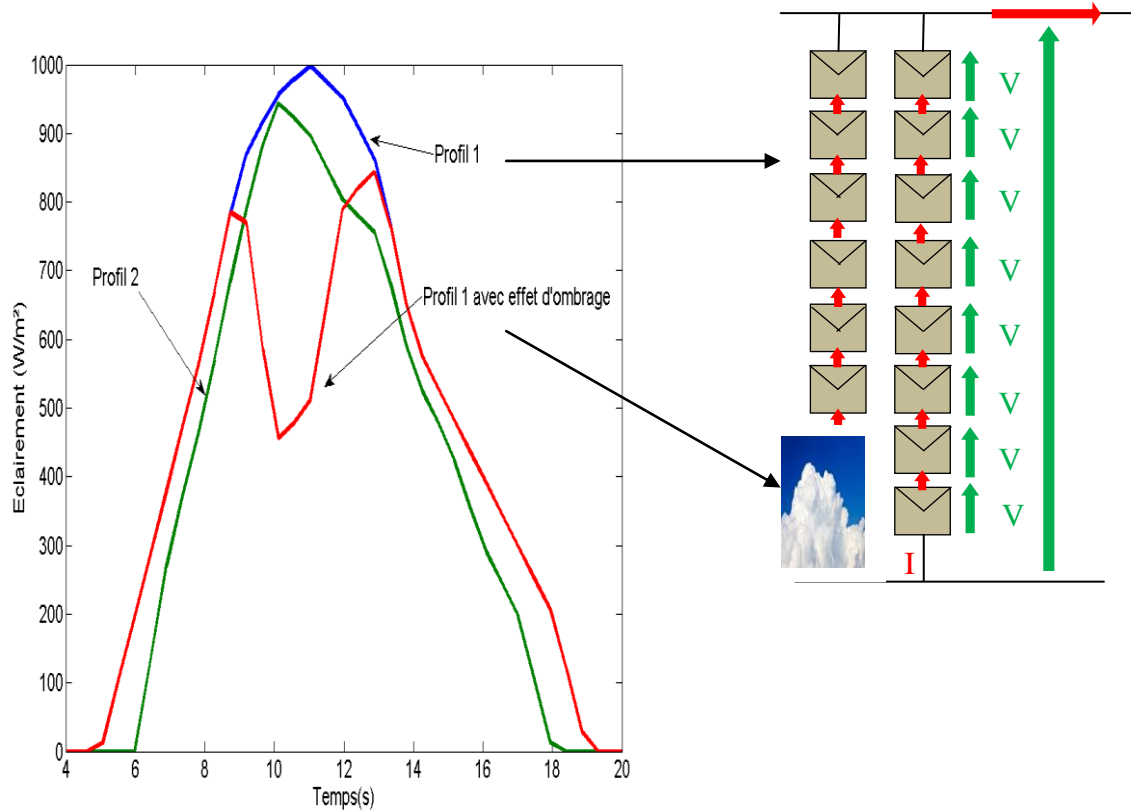


Figure 5.2 – Profil d’entrée de l’irradiation solaire  $I_r$  sous ombrage partiel

### 5.2.3 Les variations de charge

La dernière entrée exogène correspond à deux profils de demande en eau pour deux périodes différentes estivale et hivernale; représentant la consommation d’un ensemble d’habitations. Les profils choisis correspondent aux profils d’entrées des mêmes journées pour les sources d’énergie renouvelable du système complet. La figure 5.3 montre l’évolution de la demande d’eau pendant ces deux journées. Les profils de puissance correspondants ont été déterminés en se basant sur la demande en eau en utilisant les équations explicitées en chapitre 2. La figure 5.3 représente l’allure du profil des puissances durant ces deux journées.

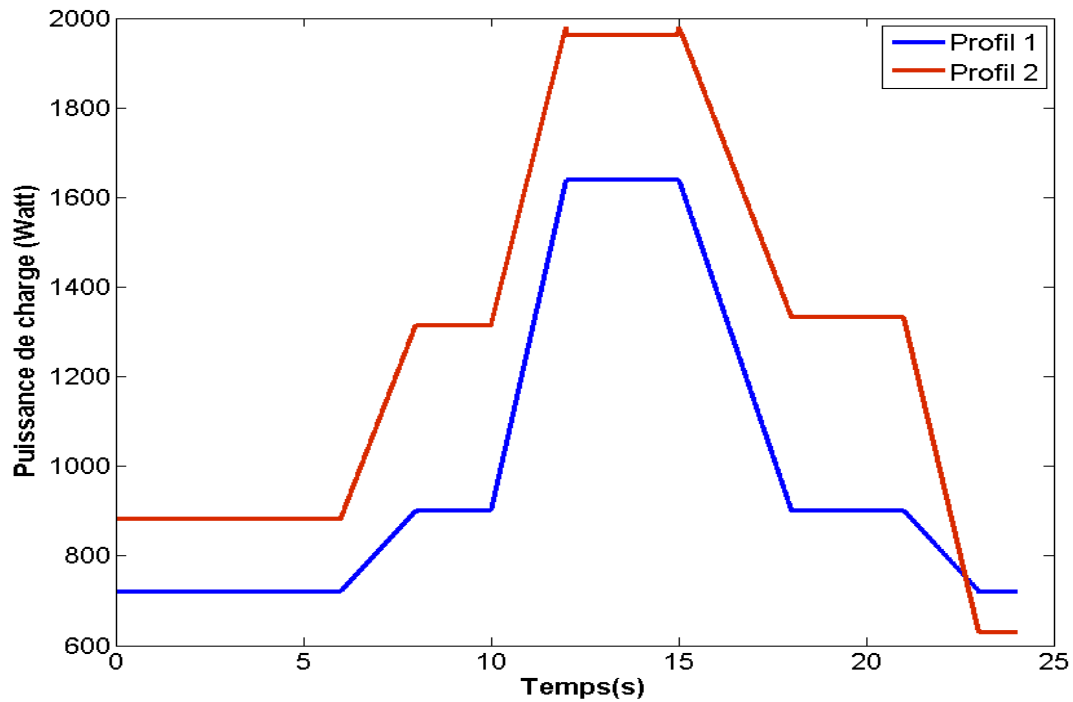


Figure 5.3 Représentation des profils de puissance équivalents à la demande en eau douce pour deux périodes

### 5.3 Résultat du système de dessalement pour un profil d'été

Les résultats de simulation pour le premier profile de vent et d'éclairement sont présentés dans les figures qui suivent

#### . 5.3.1 Résultats des générateurs de puissances

La figure 5.4 montre l'évolution des puissances générées par les générateurs de puissance. Il est clair que la maximalisation de la puissance est assurée par l'algorithme ESC. Le GPV offre une puissance avoisinant les 2500Watt correspondant à un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> à midi solaire. La puissance générée par la turbine éolienne suit parfaitement l'allure du vent alors que les batteries interviennent pour combler le déficit de puissance durant la journée et stockent le surplus de puissance au moment du fonctionnement du GPV.

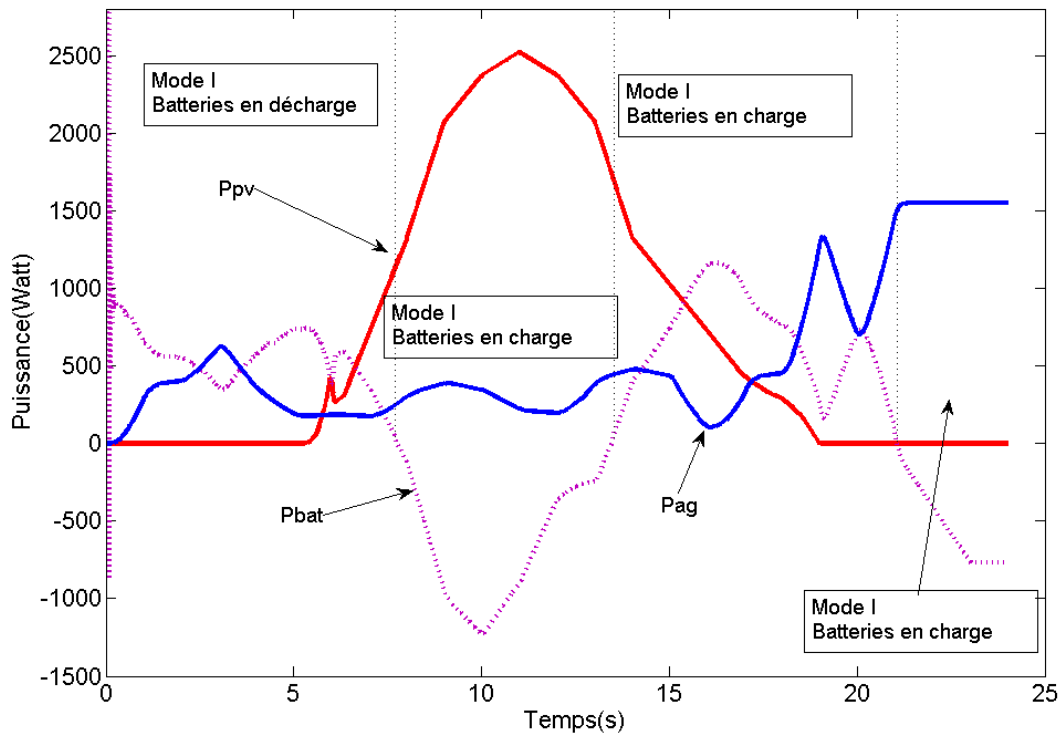


Figure 5.4 Puissance générées par le système hybride.

Un Mode de fonctionnement imposé par le gestionnaire d'énergie apparaît sur cette figure. Alors qu'en début de journée le générateur photovoltaïque est à l'arrêt, seules la turbine éolienne et les batteries génèrent la puissance requise par la charge. La turbine éolienne fonctionne en mode **MPPT** correspondant à la zone 2 de sa courbe de puissance correspondant au **Mode I**. Durant la journée, le générateur photovoltaïque intervient et le surplus d'énergie est stocké alors que la turbine éolienne est en mode MPPT comme on peut le constater à partir de la figure 5.6 représentant l'évolution du coefficient de puissance et correspond au **Mode I**. En fin de journée, dû à la baisse de l'éclairement du GPV et la présence d'une puissance éolienne faible, les batteries sont sollicitées pour combler le déficit de puissance signalé et le gestionnaire se maintient en **Mode I** tant que les batteries ne sont pas complètement chargées ou déchargées. Durant la nuit, le GPV est à l'arrêt. La puissance de l'aérogénérateur appuyé par une vitesse de vent élevée atteint la valeur de 1500 W satisfaisant la demande de la charge alors le surplus d'énergie est stocké par les batteries correspondant au Mode I avec chargement des batteries..

La figure 5.5 présente la puissance de charge équivalente en eau douce ainsi que la puissance transmise par la MSAP à la pompe. Comme indique la figure l'allure de la

puissance utile de la MSAP suit parfaitement l'allure de la puissance de charge de référence imposée par le gestionnaire RN et qui est l'image du profil d'eau douce que l'unité de dessalement RO doit produire chaque jour. La différence entre le référence et la puissance de la MSAP est dû au régime de démarrage de la machine qui n'a pas encore atteint le régime permanent. Toutefois après le démarrage ,il est remarquable qu'en régime permanent la puissance de la MSAP est très proche de la puissance de charge de référence.

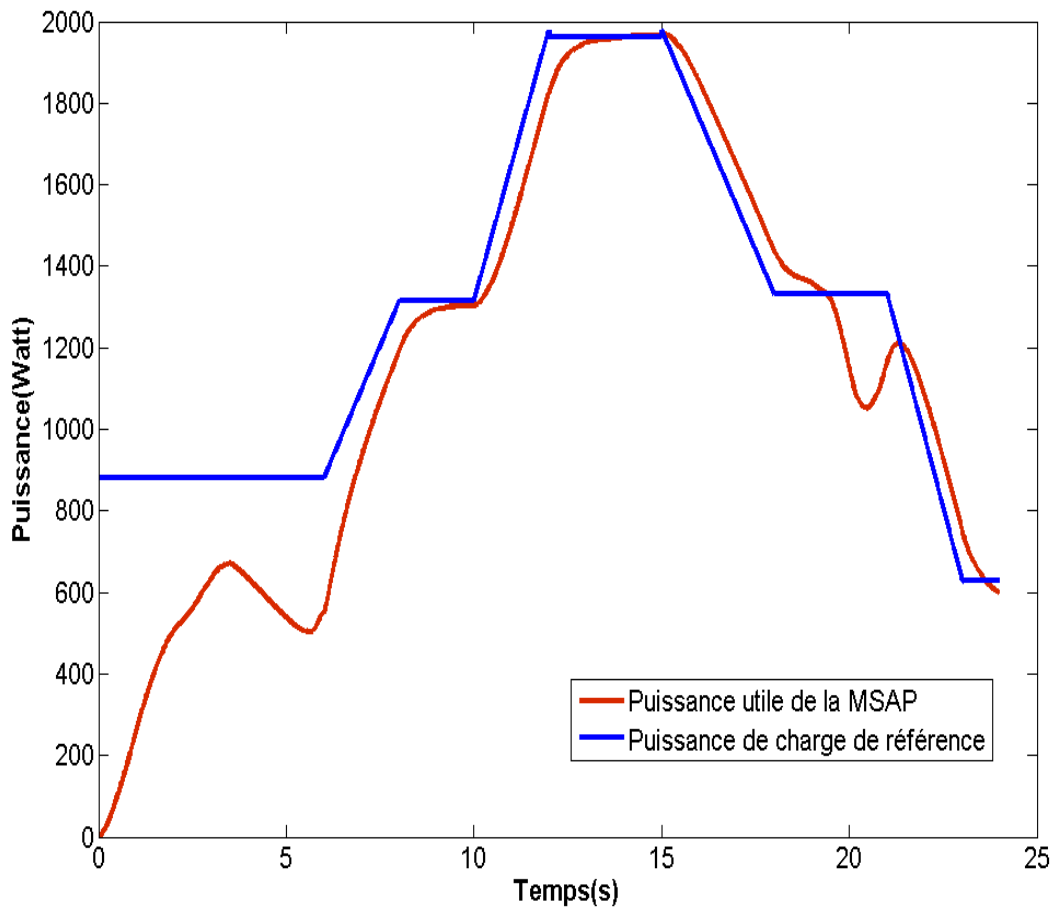


Figure 5.5 Puissance équivalente en eau douce et Puissance transmise à la pompe

### 5.3.1.1 Résultats de l'aérogénérateur

Dans cette section, nous présenterons les performances électriques et mécaniques de l'aérogénérateur durant le cycle de fonctionnement choisi pour s'adapter avec le nombre d'heure de la journée.

#### 5.3.1.1.1 Coefficient de puissance

La figure 5.6 permet de vérifier la variation du coefficient de puissance  $C_p$  de la GSAP soumise à une variation du vent selon le profil 1 décrit par la figure 5.1. L'allure du coefficient de puissance permet de distinguer le mode de fonctionnement imposés par le gestionnaire RN. Selon le profile du vent, on remarque que la turbine éolienne est en Mode de fonctionnement I puisque le coefficient de puissance est maintenu à sa valeur maximale qui est de l'ordre de 0.4 pour les vitesse de vent moyennes en début et fin du cycle de simulation. Les détériorations constatées au milieu du cycle sont dues aux faibles vitesses du vent qui se rapprochent de la vitesse d'arrêt de la turbine éolienne à ces périodes.

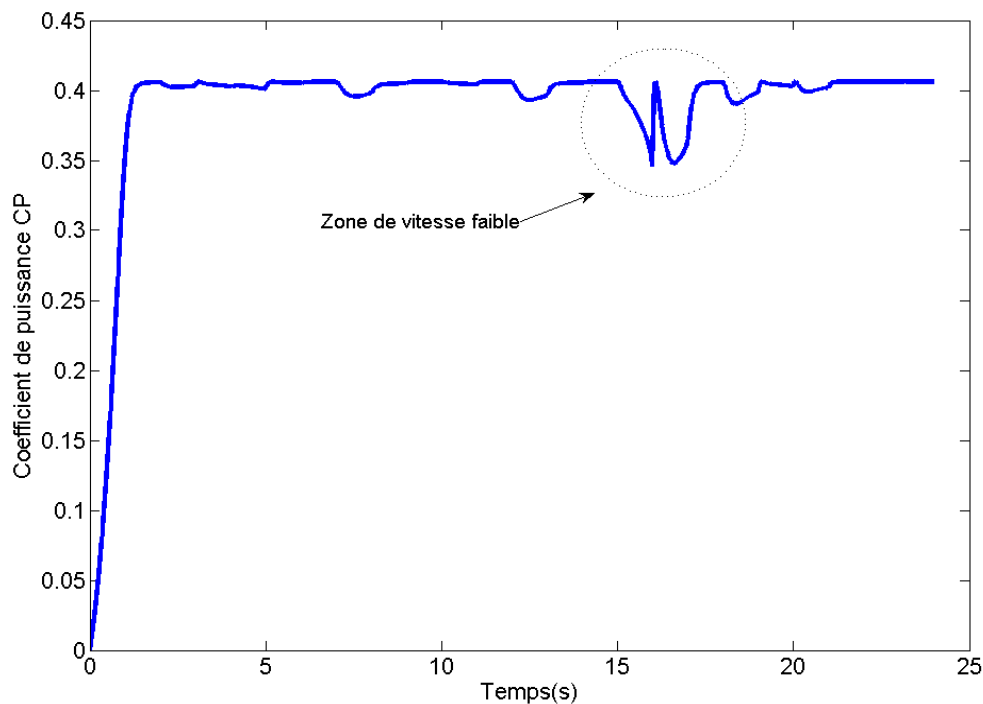


Figure 5.6 Coefficient de puissance  $C_p$

### 5.3.1.1.2 Courant direct et en quadrature

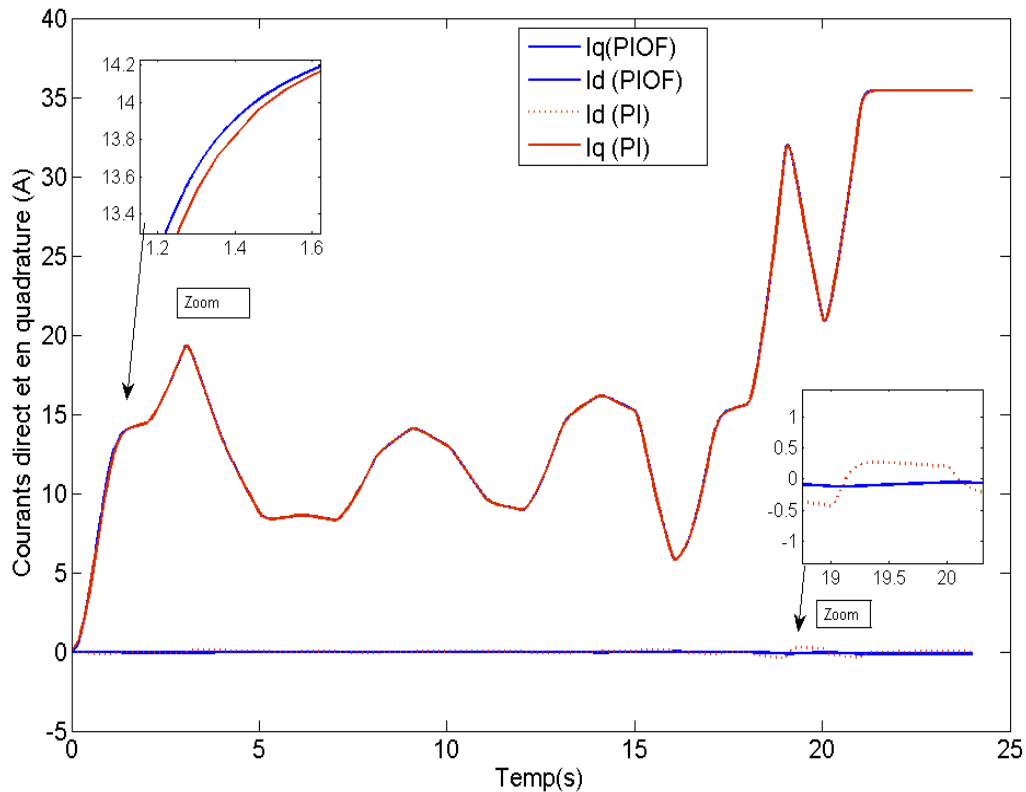


Figure 5.7 Courants direct Id et quadratique Iq de la GSAP

La figure 5.7 nous permet de mettre en valeur la commande du générateur éolien. On donne l'allure de la réponse des courants direct et en quadrature avec un régulateur PI conventionnel et leur réponse avec un régulateur PI fractionnaire. Il est intéressant de remarquer qu'avec les deux types de régulateurs la commande est assurée de manière que les courants direct et en quadrature suivent leurs références durant le fonctionnement du système. Toutefois, le contrôleur d'ordre fractionnaire prouve des performances plus robustes et plus précises par rapport au conventionnel. En effet, les résultats montrent des erreurs statiques très sensibles sur le courant direct avec le PI conventionnel alors que le PI d'ordre non entier suit d'une manière plus précise et plus stable la référence nulle. Ce constat est affirmé même pour les courants en quadrature où le zoom permet de constater un temps de réponse plus rapide sur la zone de transition.

### 5.3.1.2 Résultats du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque connecté au bus continu est commandé de manière à optimiser la puissance générée tout au long de la journée sous l'effet des conditions des entrées exogènes tels que l'éclairement et la température. La commande assurée par l'algorithme de recherche d'extremum (ESC) permet la poursuite du point caractéristique optimale de la courbe P-V du générateur à tout moment. Les résultats suivants démontrent ses performances lors du fonctionnement sous le profil d'éclairement sans ombrage décrit par la figure 5.2

#### 5.3.1.2.1 Puissance du GPV

La figure 5.8 correspond à la puissance fournie par le GPV durant une journée de juillet. La puissance fournie progresse selon le profil d'éclairement qui atteint sa puissance maximale durant la journée au midi solaire vrai achevant une valeurs de  $1000\text{W/m}^2$  pour laquelle le GPV fournit sa puissance maximale de l'ordre de  $2500\text{ Watt}$  qui s'accorde avec les données techniques des modules choisis présentées en ANNEX.

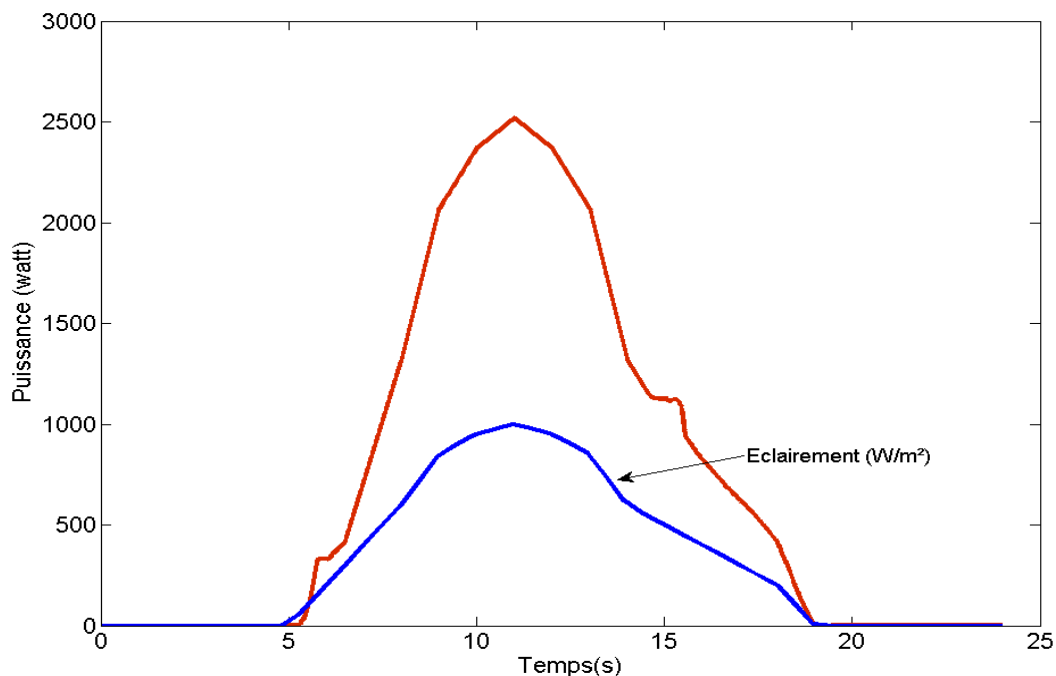


figure 5.8 Puissance générée par le GPV et profil d'éclairement



### 5.3.2 . Résultats de la MSAP

La machine synchrone à aimant permanent qui entraîne la pompe centrifuge est contrôlée à base d'une commande vectorielle dont l'intérêt est d'assurer d'une part la régulation de la tension du bus continu et d'autre part l'acheminement des puissances générées par le système de puissance hybride afin de satisfaire les besoins de charge représentés par la puissance équivalente d'eau douce. Les résultats qui suivent, nous renseignent sur l'évolution des paramètres électriques et mécanique de la MSAP durant son fonctionnement permettant ainsi de tester la fiabilité de la technique de commande à l'épreuve.

La figure 5.9 nous permet de remarquer que les courants statoriques de la MSAP qui évoluent pendant le fonctionnement du système de dessalement hybride en changeant d'amplitude en fonction de la puissance que doit générer la machine. ils prennent la même allure que celle du profile de charge.

L'orientation du flux par la commande adoptée peut paraître sur l'allure des courants direct et en quadrature. Le courant direct est maintenu nulle pendant le cycle de fonctionnement avec absence de perturbation donnant à constater que les régulateurs PIOF sont très performants. Le courant en quadrature qui est l'image du couple électromagnétique de la MSAP prend la même allure que ce dernier.

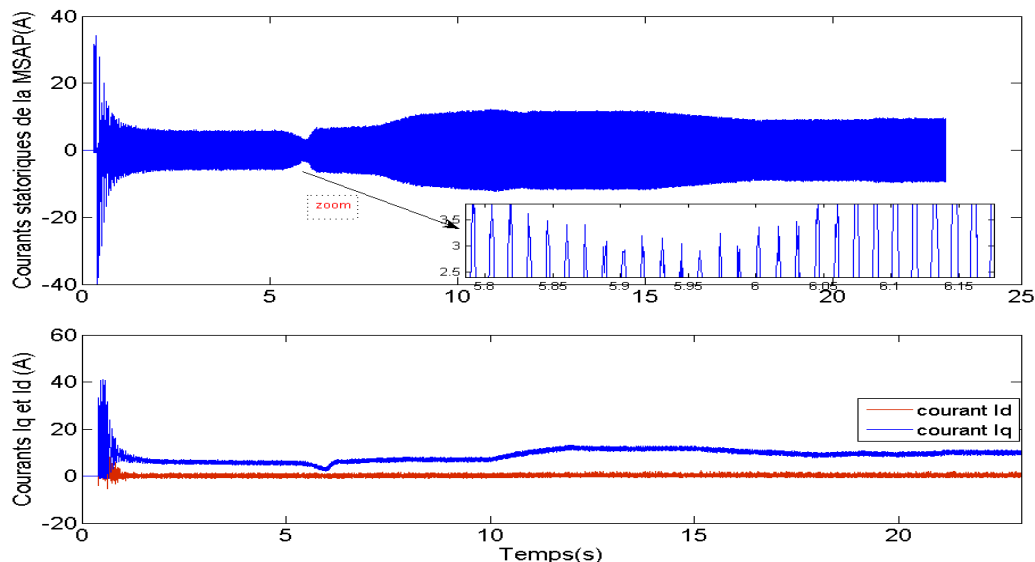


Figure 5.9 Courants statoriques et courants dans le plan d-q

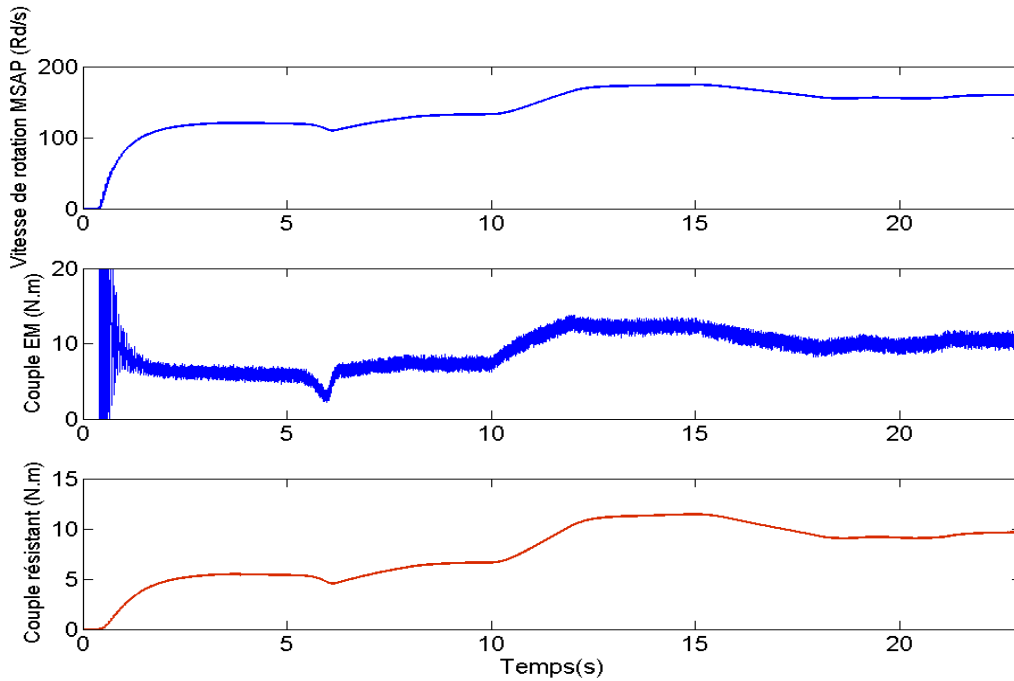


Figure 5.10 Performances mécaniques de la MSAP.

On voit sur la figure 5.10 que la vitesse de rotation de la machine après le régime transitoire dû au démarrage fonctionne variablement pour se rapprocher de sa vitesse de rotation nominale en mi journée accentuée par la forte demande de charge durant cette période de la journée. Le couple électromagnétique de la machine qui est la grandeur commandée présente une allure variable suivant la référence qui prend l'allure de la vitesse et la puissance de charge.

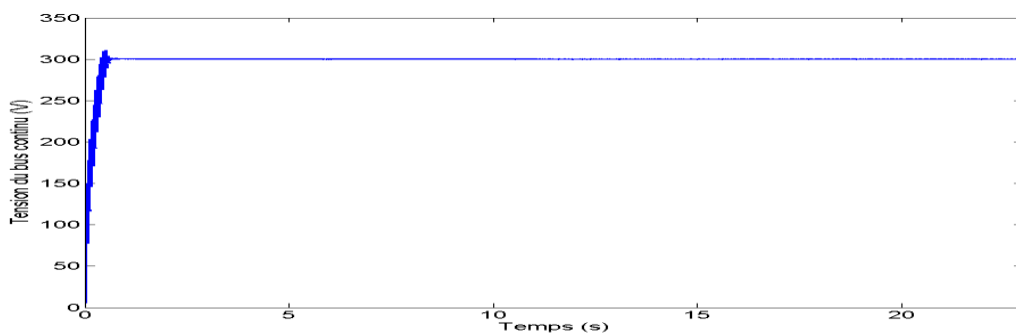


Figure 5.11 Tension du bus continu

La tension du bus continu comme il est visible sur la figure 2.11 est maintenue constante à la valeur de 300V en dépit des variations du couple et de la vitesse. On est amené à

considérer que le régulateur du bus continu est très robuste vu l'absence de perturbations sur la tension.

### 5.3.3 Résultats de la pompe centrifuge

Soumise à la vitesse de rotation de la MSAP, la pompe centrifuge se dote de la puissance mécanique utile de la MSAP et la transforme en puissance hydraulique sous forme d'une pression appliquée sur l'entrée du module d'osmose inverse en plus du débit. Ce sont des paramètres de service de l'unité de dessalement. Par l'usage des équations de la pompe présentés en chapitre 3, nous trouvons l'évolution de ces deux grandeurs dont on présente l'allure dans les figures suivantes.

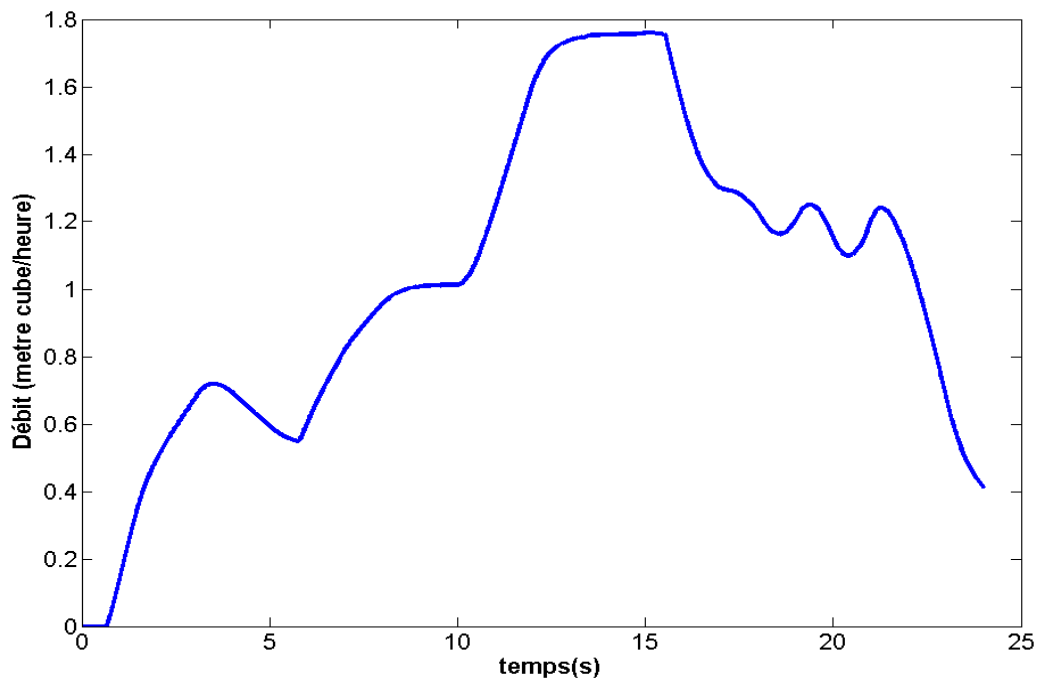


Figure 5.12 Débit de la pompe centrifuge multi-cellulaire.

La figure 5.12 montre l'évolution du débit au cours du cycle de simulation et qui varie entre 0 et 1.75 m<sup>3</sup>/h.

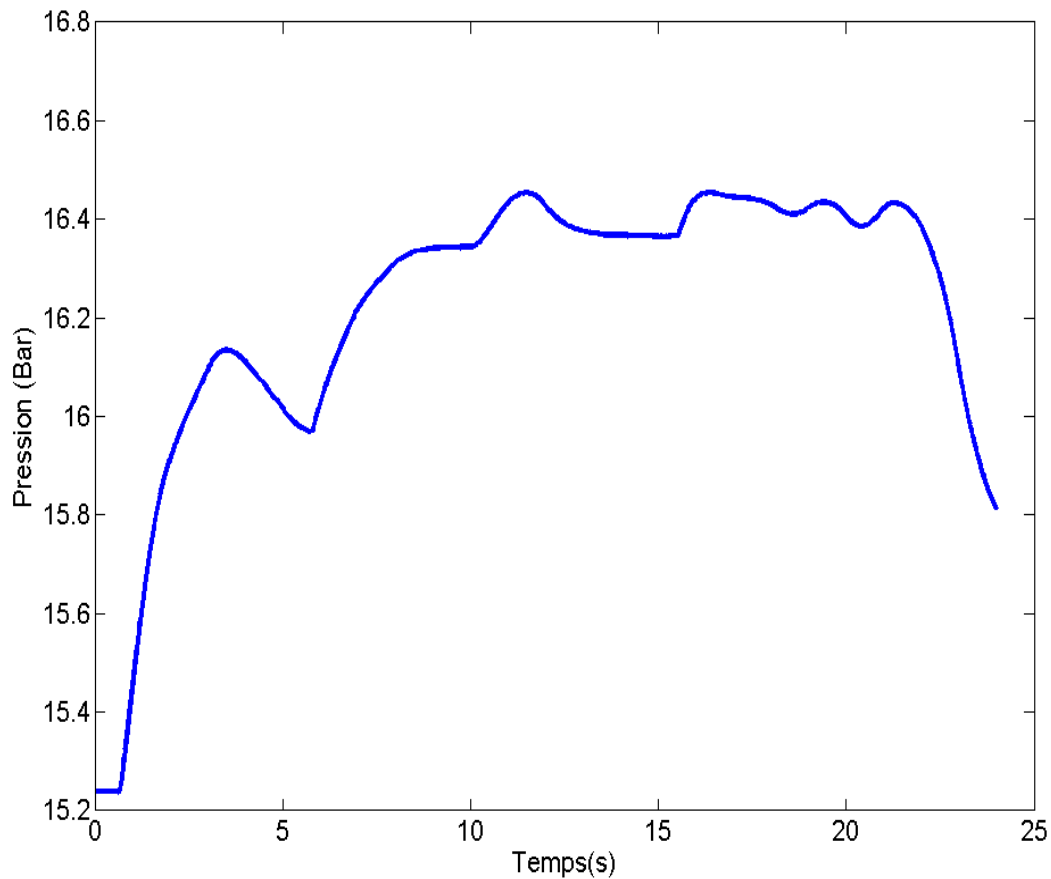


Figure 5.13 Pression de la pompe centrifuge multi cellulaire

Il est intéressant de remarquer à partir de la figure 5.13 que la pression de service durant le cycle de simulation prend des valeurs entre 15.2 bar et 16.4 bar qui correspondent parfaitement à des point de fonctionnement appartenant à la zone optimale de la pompe HP.

### 5.3.4 Résultats du module RO

Dans cette section sont présentées les performances de l'unité de dessalement à osmose inverse. Les résultats sont donnés pour une concentration de l'eau saumâtre  $c_f = 2\text{g/l}$  et une température correspondant à la journée choisie pour le profil.

La figure 5.14 représente l'allure du débit du permeat .Le débit du permeat varie entre 5.4 et 5.9 l/ mn.I Il faut savoir que le débit est en fonction de la concentration de l'eau d'alimentation. En effet une augmentation de la salinité aura un effet inverse sur le débit de l'eau douce produite par l'unité de dessalement.

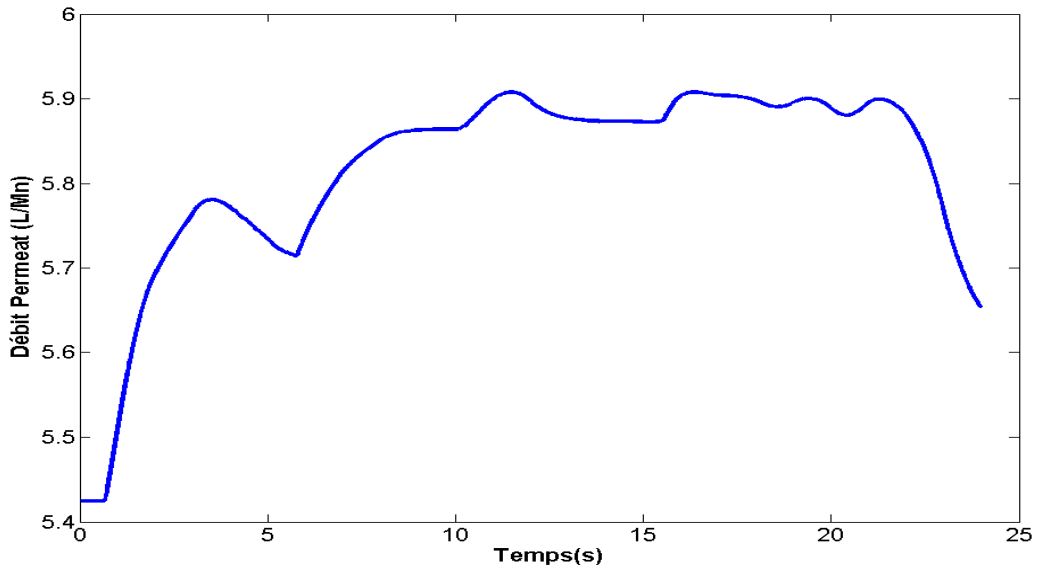


Figure 5.14 Allure du débit du permeat

Le taux de recouvrement de l'unité de dessalement paraissant sur la figure 5.15 indique des valeurs entre 1 et 0.21 %. Il faut noter qu'un taux de recouvrement de 30% serait très intéressant pour un fonctionnement plus stable. Par conséquent ces valeurs en fonctionnement variables sont très tolérables car il évitent un colmatage de la membrane qui n'admet pas des taux très élevés. Les taux élevés en début et fin de cycle de simulation sont dus à la forte pression et au faible débit infligé par la pompe centrifuge pendant ces moments.

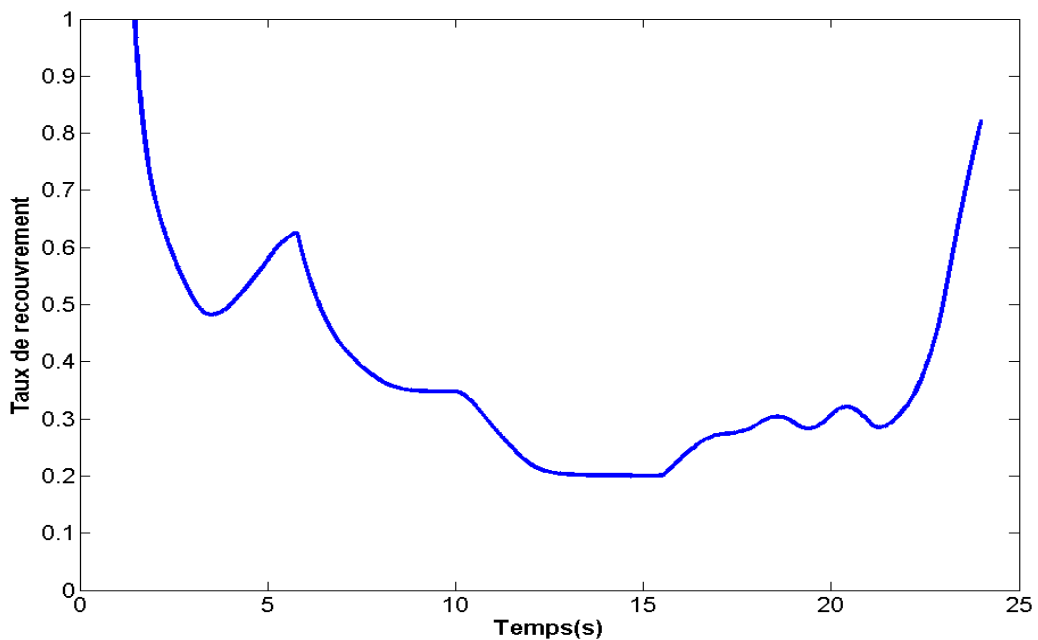


Figure 5.15 Allure du taux de recouvrement

La figure 5.16 montre l'allure de la concentration en sel du permeat. Le taux de sel rejeté par la membrane dépasse 99.5% qui agrée avec le critère donné par le constructeur de la membrane (Voir Annexe) .

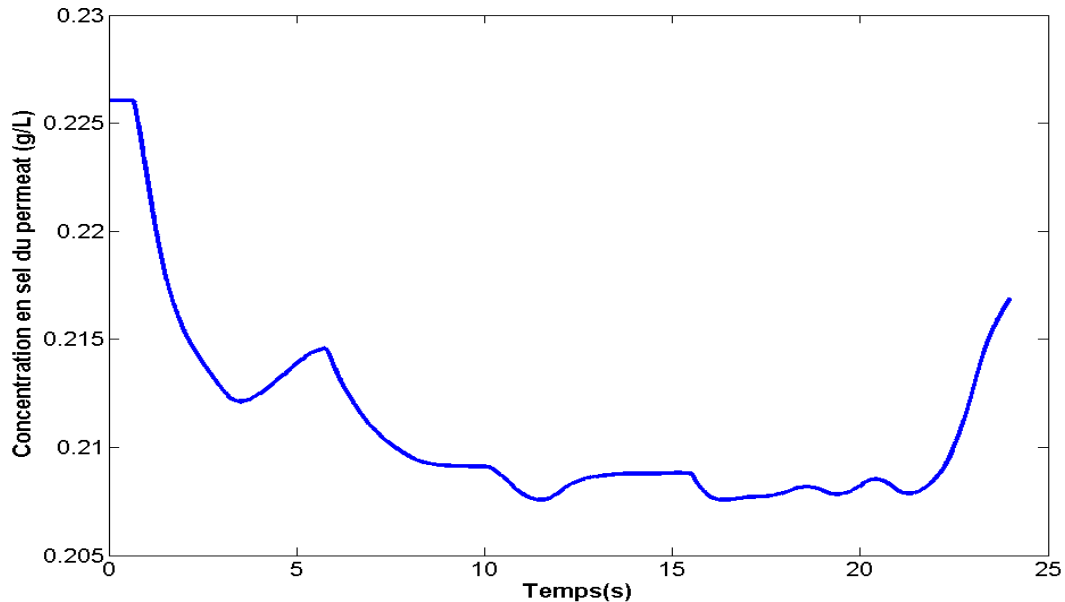


Figure 5.16 Allure de la concentration du permeat

#### 5.4 Résultat du système de dessalement pour un profil d'hiver

Les résultats de simulation pour le second profil de vent et d'éclairement sont présentés dans les figures qui suivent

##### 5.4.1 Résultats des générateurs de puissances

La figure 5.17 montre l'évolution des puissances générées par les générateurs de puissance pour le second profil. Nous constatons sur la figure, l'effet de l'ombrage partiel et le moment de calme du vent. Le GPV sous l'effet de l'ombrage perd de la puissance aux heures de crête. Nous pouvons aussi voir que la puissance générée par la turbine éolienne suit parfaitement l'allure du vent. Il est intéressant de voir que le Mode II est atteint au moment où la turbine entre en Zone III de sa courbe de puissance et la puissance est limitée à sa puissance nominale de 2000 Watt. Pour identifier le mode fonctionnement III exigée par le gestionnaire RN, nous avons prémédité un état de charge de 0.8 au moment où l'éolienne fonctionne à sa puissance nominale et on voit bien que l'aérogénérateur bascule en Mode III offrant une

puissance égalant la puissance de la charge étant donné que les batteries sont complètement chargées et la puissance disponible par le vent est supérieure à la puissance de charge.

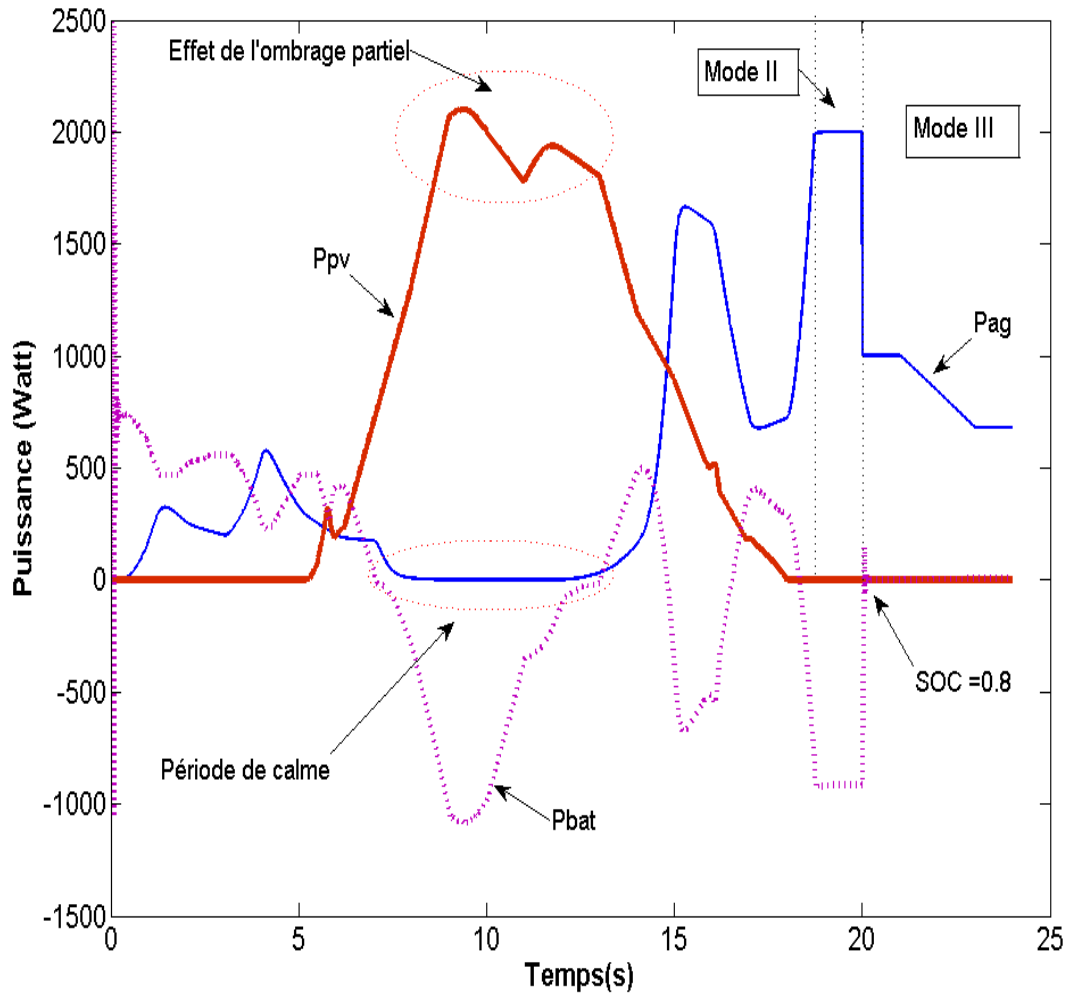


Figure 5.17 Puissances générées par le système de puissance hybride.

En dépit du moment de calme et l'effet de l'ombrage, le gestionnaire RN arrive à assurer l'équilibre énergétique entre les sources de puissance et la demande exigée par la charge. En effet comme on peut le constater sur la figure 5.18, la puissance de charge équivalente en eau douce ainsi que la puissance transmise par la MSAP à la pompe sont très proches en régime permanent en prenant la même allure.

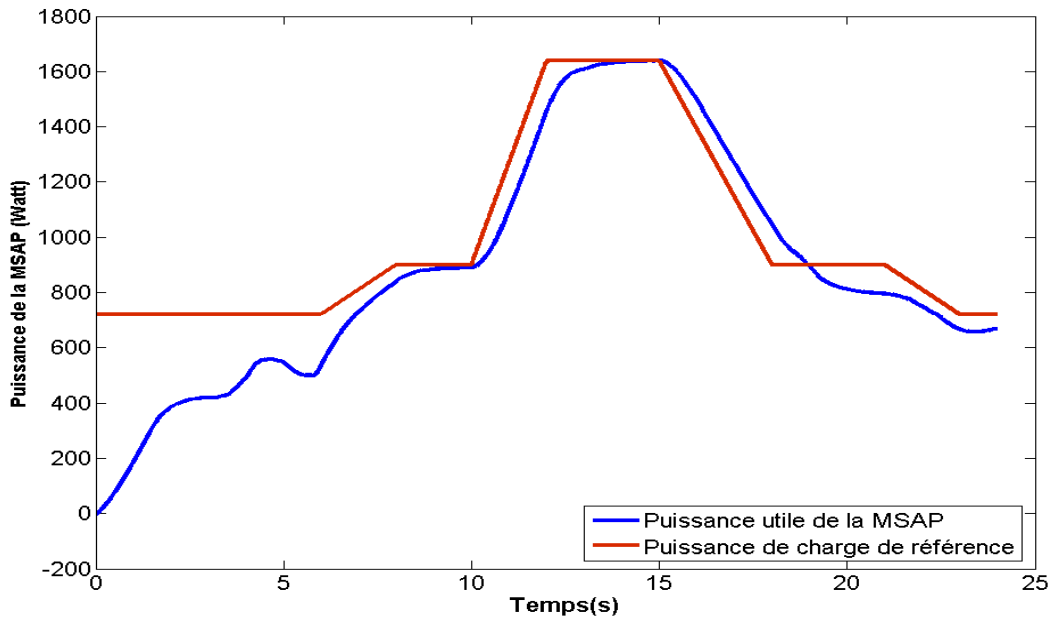


Figure 5.18 Puissance équivalente de référence et Puissance transmise à la pompe

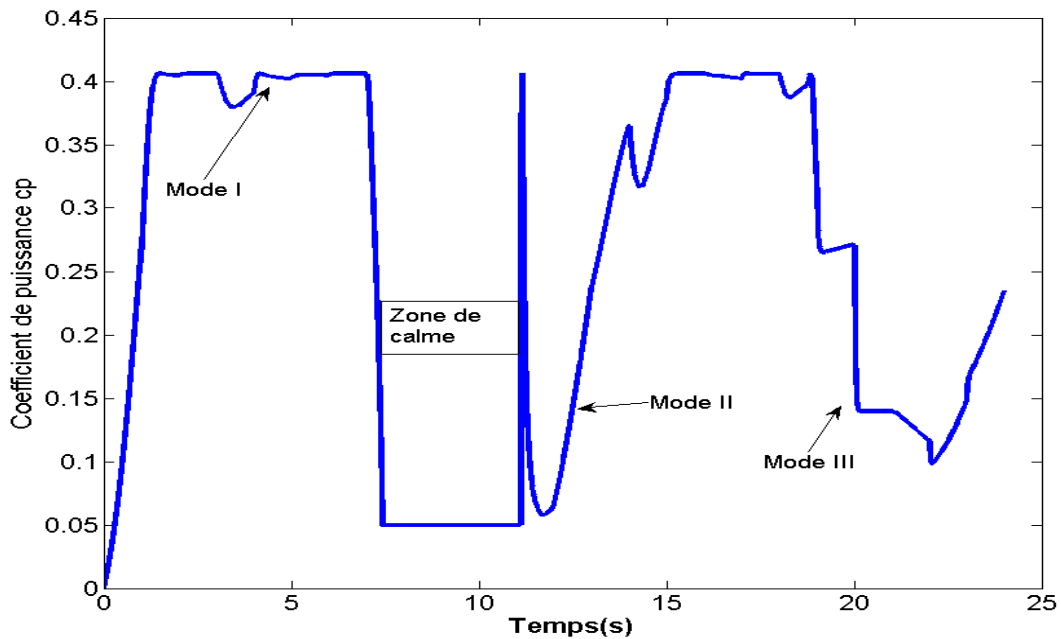


Figure 5.19 Coefficient de puissance CP

La figure 5.19 nous permet de distinguer les trois modes de fonctionnement imposés par le gestionnaire RN pour le second profil. Le Mode I est en début de cycle de simulation durant lequel l'aérogénérateur est en mode MPPT puis après le moment de calme où on voit que le coefficient de puissance est nul, le mode III est actionné quand la puissance de référence change pour quitter sa valeur optimale.



### 5.5 Performances du système de dessalement hybride

Nous présentons numériquement dans la tableau 5.1 les performances du système de dessalement hybride sous les entrées des deux profils précités. On doit noter cependant que les calculs se font sur la base des puissances de références générées par le gestionnaires RN et non selon les puissances de la MSAP et cela pour les raisons suivantes:

- Le régime transitoire de la machine en deux secondes est l'équivalent de deux jours si on considère ce temps assimilable à une journée de fonctionnement.
- Le régime variable de fonctionnement cause des fluctuations en régimes transitoires qui affecteront la précision de calcul.

Les Quantités journalières produites seront calculés par l'usage de la formule suivante

$$QT = \int_0^{24} GRdt \tag{5.1}$$

Où QT représente la quantité journalière et GR la variation de la grandeur à estimer.

Profil	Energie PV (Wh)	Energie Eolienne (Wh)	Energie Batteries (Wh)	Energie équivalente de production d'eau douce(kWh)	Quantité d'eau douce M <sup>3</sup> /j
Profil 1	17.4	12.19	4.1	38.2	4.17
Profil 2	14.86	12.77	-0.529	26.7	3.10

Tableau 5.1 Performances du système de dessalement hybride pour deux profils

Le tableau 5.1 permet de s'octroyer des valeurs numériques représentatifs des performances du système de dessalement hybride impl anté à Illizi dans le sud algérien.

la quantité journalière produite pour deux périodes de l'année varient entre 3.10 M<sup>3</sup>/jour et 4.17 M<sup>3</sup>/jour . Ces résultats donnent pour le système une consommation spécifique d'énergie (SEC) du système variant entre 9.16 kWh/m<sup>3</sup>et 8.61 kWh/m<sup>3</sup>.De ces résultats , nous pouvons estimer le prix de la production d'eau qui avoisine 37 DA/m<sup>3</sup> en considérant le prix du kilowattheure algérien.

## 5.6 Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons présenté les résultats obtenus à partir des simulateurs et programmes développés mettant en œuvre les modèles mathématiques et les stratégies de commande adoptées. Les résultats de la gestion d'énergie par l'algorithme des réseaux de neurones a permis au système de gérer intelligemment l'équilibre énergétique production-demande des entrées exogènes variables ainsi que le profil de charge variable tout en exploitant les informations obtenues des différent sous systèmes formant la chaine de conversion avec prise en charge des limitations de fonctionnement des différentes sources de puissance. Le contrôle MPPT du GPV par le contrôleur de recherche d'extremum global a permis de bien optimiser cette source surtout sous les conditions d'ombrages qui surviennent durant certaines périodes de fonctionnement. Le contrôle des batteries par l'usage du gestionnaire RN a permis d'assurer la continuité de service du système de dessalement durant les moments d'arrêt de l'une des sources d'énergie renouvelable.

## Conclusion générale et perspectives

---

Dans un contexte à la fois académique et industriel, l'objectif de cette thèse était d'examiner et d'étudier la faisabilité d'un système de dessalement alimenté par des sources d'énergies renouvelables en appliquant des techniques de modélisations, d'identifications et de commande en vue d'un fonctionnement optimal de ce système. Cette étude a permis d'acquérir un état de l'art et des techniques propres aux systèmes de dessalement associés aux source d'énergie non conventionnelle dans une perspective de conception et d'application en Algérie qui devrait faire face à un stress hydrique dans les prochaines années à venir. Dans ce contexte, le travail élaboré dans cette thèse ouvre les volets d'une nouvelle conception de systèmes d'alimentation en eau potables dans plusieurs régions où abondent l'eau saumâtre ainsi que les sources d'énergie propre. Dans cette optique, le travail s'est focalisé tant sur le système dans sa globalité que sur ses sous-ensembles notamment à travers l'optimisation via le contrôle de toutes les entités formant la chaîne de conversion dans un souci de bien gérer l'énergie et assurer un fonctionnement optimal dans le cadre des contraintes de fonctionnement du système.

De ce fait, un ensemble de conclusion ont été déduites :

- 1- La faisabilité d'un système de dessalement à osmose inverse alimenté par une source d'énergie hybride solaire-éolien a été mis à l'épreuve par la conception et la simulation du système.
- 2- La technique de commande (seeking control) du générateur photovoltaïque en cas d'ombrage partiel adoptée pour le système montre bien son efficacité en minimisant les pertes d'énergie causés par les facteurs externes dus à l'ombrage comparée aux commandes MPPT conventionnels.
- 3- La commande appliquée à la chaîne de conversion éolienne durant des modes de fonctionnement différents dans les trois zones de fonctionnement de la courbe de puissance des turbines éoliennes assure d'une part une permutation souple entre les modes de fonctionnement répondant au besoin d'assurer un équilibre énergétique qui tient en compte l'énergie offerte par les sources d'énergie variables et la satisfaction des besoins exigées par la charge (production d'eau douce)
- 4- Le contrôle de la machine synchrone entraînant le module d'osmose inverse par le biais d'une commande vectorielle avec régulation du bus continu a permis une

transition robuste et stable de la puissance générée par la source hybride vers la charge formée par le module d'osmose inverse.

- 5- Le gestionnaire d'énergie basée sur un algorithme adaptatif (réseaux de neurone) a assuré pour tout le système une supervision globale de l'énergie par la synthèse des décisions relatives aux différents modes de fonctionnements du système assurant à la fois la transition de l'énergie disponible et la satisfaction de la demande de la charge tout en respectant les contraintes de fonctionnement dues à l'aspect variables des sources d'énergie ainsi que le profil de charge de la demande en eau douce.

Les perspectives à ces travaux sont nombreuses en raison du grand nombre de possibilités d'association entre les sources d'énergie renouvelables et les procédés de dessalement d'une part et les possibles scénarios de contrôle relatifs aux différents étages formant le système. Une comparaison technico économique entre certains scénarios possibles sur le plan de la conception et la commande permettrait de réduire le cout de revient de l'eau douce produite par ces systèmes. Aussi, une comparaison entre différentes possibles approches de commande devrait fournir plus d'informations quant à la précision, la rapidité et la robustesse pour les systèmes de dessalement renouvelables. Enfin, une validation expérimentale sur un banc d'essai permettrait de déceler les problèmes techniques rencontrés durant le fonctionnement du système.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

---

- [1] <https://www.planetoscope.com/>
- [2] Al-Karaghoul, A., Renne, D., & Kazmerski, L. L. (2009). Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2397-2407.
- [3] <http://www.wabag.com/fr/performance-range/processes-and-technologies/msf-multi-stage-flash/>
- [4] Jimmy L. Humphrey, George E. Keller, Procédés de séparation, Techniques, sélection, dimensionnement, Collection: Technique et Ingénierie, Dunod/Industries et Technologies, 2001
- [5] Charcosset, C. (2009). A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, 245(1-3), 214-231.
- [6] Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2245-2262.
- [7] Mathioulakis, E., Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2007). Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*, 203(1-3), 346-365.
- [8] Manwell, J. F., & McGowan, J. G. (1994). Recent renewable energy driven desalination system research and development in North America. *Desalination*, 94(3), 229-241.
- [9] Qingfen Ma a, Hui Lu b, "Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art", *Desalination* 277 (2011) 274–280.
- [10] Carta, J. A., Gonzalez, J., & Subiela, V. (2003). "Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands. *Solar Energy*", 75(2), 153-168.
- [11] Pohl, Robert, Martin Kaltschmitt, and Robert Holländer. "Investigation of different operational strategies for the variable operation of a simple reverse osmosis unit." *Desalination* 249.3 (2009): 1280-1287.

- [12] Miranda, Marcos S., and David Infield. "A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries." *Desalination* 153.1 (2003): 9-16.
- [13] Moreno, F., & Pinilla, A. (2005). Preliminary experimental study of a small reverse osmosis wind-powered desalination plant. *Desalination*, 171(3), 257-265.
- [14] P.Feron, The use of wind power in autonomous reverse osmosis sea water desalination, *Wind Eng.* 9(1985)180–199.
- [15] Petersen, G., et al. "Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units- description of two demonstration projects." *Desalination* 31.1-3 (1979): 501-509
- [16] Manwell, James F., and Jon G. McGowan. "Recent renewable energy driven desalination system research and development in North America." *Desalination* 94.3 (1994): 229-241.
- [17] Richards, B. S., Park, G. L., Pietzsch, T., & Schäfer, A. I. (2014). Renewable energy powered membrane technology: safe operating window of a brackish water desalination system. *Journal of Membrane Science*, 468, 400-409.
- [18] Park, G. L., Schäfer, A. I., & Richards, B. S. (2011). Renewable energy powered membrane technology: The effect of wind speed fluctuations on the performance of a wind-powered membrane system for brackish water desalination. *Journal of Membrane Science*, 370(1-2), 34-44.
- [19] Rahal, Z., 2001. *Wind powered desalination* (Doctoral dissertation, © Zeina Rahal).
- [20] Fahmy, F. H., Ahmed, N. M., & Farghally, H. M. (2012). Optimization of renewable energy power system for small scale brackish reverse osmosis desalination unit and a tourism motel in Egypt. *Smart Grid and Renewable Energy*, 3(01), 43.
- [21] Qiblawey, H., Banat, F., & Al-Nasser, Q. (2011). Performance of reverse osmosis pilot plant powered by Photovoltaic in Jordan. *Renewable energy*, 36(12), 3452-3460.
- [22] Ghermandi, A., & Messalem, R. (2009). Solar-driven desalination with reverse osmosis: the state of the art. *Desalination and water treatment*, 7(1-3), 285-296.
- [23] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Ph.D. thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [24] 11. Muller, Matthew. " Measuring and Modeling Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)." PV Performance Modeling Workshop. 2010.

- [25] Ndiaye, Ababacar, et al. "A novel method for investigating photovoltaic module degradation." *Energy Procedia* 36 (2013): 1222-1231
- [26] I. Hadj Mahammed, S. Boualit, A. Hadj Arab, F. Youcef Ettoumi, and S. Semaoui, "application d'un modèle généralisé de courant - tension d'une cellule photovoltaïque pour des mesures extérieures sur le module de type monocristallin, sharp nt-r5e3e", *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda* (2007), 149–152.
- [27] M. Urbain, "*Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs lithium-ion. estimation en ligne du SoC et du SoH*", Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [28] Glaize, C., & Geniès, S. (2013). Les accumulateurs électrochimiques au lithium, haute température et à circulation d'électrolyte. *Paris: Lavoisier*.
- [29] Davigny.A ;"Participation aux services système aux fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie" Thèse de doctorat de l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur de Lille.2008
- [30] Kim, H. W., Kim, S. S., & Ko, H. S. (2010). Modeling and control of PMSG-based variable-speed wind turbine. *Electric Power Systems Research*, 80(1), 46-52.
- [31] Migue Lopez, "Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée ".*Thèse de Doctorat en physique de l'Université de Paris-Sud11.2006*
- [32] Multon, Bernard. "Les machines synchrones autopilotées." (2010): 62.
- [33] Smigiel, E. Sturtzer, G. " *Modélisation et Commande Des Moteurs Triphasés, Commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs DSP*". Edition Ellipses, 2000.
- [34] A.S. Toledo, ' Commande Directe et Observation des Convertisseur de Puissance: Application à l'Onduleur de Tension Triphasé ', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique, Grenoble, 2000
- [35] Paire, D. (2010). *Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie* (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard).
- [36] <https://www.grundfos.com/>
- [37] Turki, M.; BenRhouma, A.; Belhadj, J.; "Control strategy of an autonomous desalination unit fed by PV-Wind hybrid system." *J.Electrical Systems* 4-2(2008):1-12.



- [38] <https://www.lennntech.com/.../CRN-3-25-A-P-G-E-HQQE.htm>
- [39] Abderrahim Abbas ; "Simulation and analysis of an industrial water desalination plant .Chemical engineering and processing 44(2005) 999-1004 , ELSEVIER.
- [40] Sourirajan, S., "*Reverse Osmosis*".Academic Press, New York, 1975.
- [41] K.S. Spiegler and O. Kedem, "Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes, *Desalination*, 1 (1966)311–326.
- [42] CHARROUF, O. (2012). *Optimisation d'un système de dessalement renouvelable* (Magister dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [43] Djebedjian B, Gad H, Khaled I et AbouRayan M ; "*Optimization of reverse osmosis system using genetic algorithms technique*", Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008, Alexandria, Egypt
- [44] Murthy, Z.V.P., et Vengal, J.C., "*Optimization of a Reverse Osmosis System using Genetic Algorithm*," *Separation Science and Technology*, Vol. 41, No. 4, 2006, pp. 647-663.
- [45] DOW Chemical Corporation. *FILMTEC Membrane Elements Guide*. (1996).
- [46] Himri Y, Rehman S, Draoui B, Himri S. Wind power potential assessment for three locations in Algeria. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2008;12(9):2495–504.
- [47] Himri Y, Malik AS, Stambouli AB, Himri S, Draoui B. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2009;13(6):1584–91.
- [48] Chellali F, Khellaf A, Belouchrani A, Recioui A. A contribution in the actualization of wind map of Algeria. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2011;15(2):993–1002.
- [49] Diaf S, Notton G. Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in southern Algeria. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2013;23:379–390.
- [50] <https://en.tutiempo.net/climate/algeria.html>
- [51] Rocha PAC, De Sousa RC, De Andrade CF, Da Silva MEV. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Appl Energy.* 2012;89(1):395–400.
- [52] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. *Wind energy explained: theory, design and application*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

- [53] Ogimi K, Kamiyama S, Palmer M, Yona A, Senju T, Funabashi T. Optimal operation planning of wind farm installed BESS using wind power forecast data of wind turbine generators considering forecast error. *Int J Emerg Electr Power Syst.* 2013;14(3):207–18.
- [54] Rocha, Paulo Alexandre Costa, et al. "Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil" *Applied Energy* 89.1 (2012): 395-400.
- [55] Lashin Aref, and Ahmed Shata. "An analysis of wind power potential in Port Said, Egypt" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.9 (2012): 6660-6667
- [56] Islam MR, Saidur R, Rahim NA. Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. *Energy.* 2011;36(2):985–92.
- [57] Boudia SM, Benmansour A, Ghellai N, Benmedjahed M, Hellal MAT. Temporal assessment of wind energy resource at four locations in Algerian Sahara. *Energy Convers Manag.* 2013;76:654–64.
- [58] Adaramola MS, Oyewola OM. On wind speed pattern and energy potential in Nigeria. *Energy Policy.* 2011;39(5):2501–06.
- [59] <http://www.draaistroom.net/contents/nl/windspot%20manual.pdf>
- [60] <https://www.indiamart.com/proddetail/wind-turbine-system-2kw-1406443512.html>
- [61] Ohunakin OS, Akinnawonu OO. Assessment of wind energy potential and the economics of wind power generation in Jos, Plateau State, Nigeria. *Energy Sustainable Dev.* 2012;16(1):78–83.
- [62] <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/daily.cgi>
- [63] Esfahani, Iman Janghorban, and ChangKyoo Yoo. "An optimization algorithm-based pinch analysis and GA for an off-grid batteryless photovoltaic-powered reverse osmosis desalination system." *Renewable Energy* 91 (2016): 233-248.
- [64] Kellogg, W., Nehrir, M.H., Venkataramanan, G., Gerez., V., 1996. Optimal unit sizing for a hybrid PV/wind generating system. *Electric Power System Research* 39, 35–38.
- [65] Yokoyama, R., Ito, K., Yuasa, Y., 1994. Multi-objective optimal unit sizing of hybrid power generation systems utilizing PV and wind energy. *Journal of Solar Energy Engergy* 116, 167–173.

- [66] Diaf, S., Diaf, D., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2007). A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*, 35(11), 5708-5718.
- [67] Tabanjat, A. (2015). Modélisation, commande et supervision d'un système multi-sources connecté au réseau avec stockage tampon de l'énergie électrique via le vecteur hydrogène (Doctoral dissertation, Belfort-Montbéliard).
- [68] Borne, P., Benrejeb, M., & Haggège, J. (2007). Les réseaux de neurones: présentation et applications (Vol. 15). Editions OPHRYS.
- [69] Malek, H. (2014). Control of grid-connected photovoltaic systems using fractional order operators.
- [70] J. Sternby, "An extremum control systems: An area for adaptive control," Proceedings of International Symposium on Adaptive Systems, vol. 24, pp. 151–160, 1980.
- [71] K. B. Ariyur and M. Krstic, Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003.
- [72] Leyva, R., Alonso, C., Queinnec, I., Cid-Pastor, A., Lagrange, D., & Martínez-Salamero, L. (2006). MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 42(1), 249-258.
- [73] Munteanu, Iulian. "Wind turbine control systems. Principles, modelling and gain scheduling design. Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista and Ricardo J. Mantz, Springer, London, 2006. No. of pages: XIX+ 207. Price: \$119." *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal* 18.7 (2008): 796-797.
- [74] El Aimani, S. (2004). *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).
- [75] C. Li, D. Qian, and Y. Chen, "On Riemann-Liouville and Caputo derivatives," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2011, 2011.
- [76] I. Petras, *Fractional Order Nonlinear Systems, Modeling, Analysis and Simulation*. New York: Springer, 2011.

- [77] I. Podlubny, *Fractional Differential Equations. An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations, Some Methods of Their Solution and Some of Their Applications*. San Diego: Academic Press, 1999.
- [78] Connor, R. (2015). *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world (Vol. 1)*. UNESCO Publishing.
- [79] García -Rodríguez, L. (2003). Renewable energy applications in desalination: state of the art. *Solar energy*, 75(5), 381-393.
- [80] Kalogirou, S. A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in energy and combustion science*, 31(3), 242-281.
- [81] Lino, P., & Maione, G. (2013). Loop-Shaping and Easy Tuning of Fractional-Order Proportional Integral Controllers for Position Servo Systems. *Asian Journal of Control*, 15(3), 796-805.

# ANNEXES

## A- Les paramètres des constituants du système de dessalement éolien

Composants	Paramètres	Symboles	Valeurs
Turbine éolienne	Rayon Pale	R	1.47m
	Ceff puissance	Cp-max	0.4061
	Ratio de vitesse	$\lambda_{op}$	6.8
	Inertie	Jt	0.089
	Multiplicateur	GM	7/3
GSAP	Puissance nomlinale	Pn	2.2 Kw
	Tension entre lignes	Un	220V
	féquence	f	60 Hz
	Flux	$\varphi_r$	0.175wb
	Inertie du rotor	J	0.089
	Coeff frottement	F	0.005
	Résistance stator	Rs	0.2 $\Omega$
	Inductance	Ld=Lq	0.0085
	Poles	2P	H 8

## B - Données techniques du panneau solaire Victron Solaris 80W

Type de cellules :	Monocristallines
Puissance Nominale :	80 W
Tension à puissance max (Vmp) :	18,5 V
Courant à puissance max (Imp) :	4,35 A
Tension en circuit ouvert (Voc) :	22,50 V
Courant de court-circuit (Isc) :	4,66 A
Nombre de cellules en série :	36
Tension maximale système :	1000 V
Température de fonctionnement :	-40° à +80°
Charge de surface maximale :	200 kg/m <sup>2</sup>
Résistance aux impacts (grêle) :	23m/s, 7,35g
Type de connecteur :	MC4
Longueur des câbles :	900 mm
Cadre :	Aluminium
Garantie produit :	2 ans

**c-Membrane Toray TM 710 :**

<b>Surface active S (m<sup>2</sup>)</b>	<b>7</b>
<b>Rejet minimal en sel (%)</b>	<b>99</b>
<b>Pression de service maximale (bar)</b>	<b>69</b>
<b>Débit minimal du Perméat (m<sup>3</sup>/jour)</b>	<b>5</b>
<b>Température maximale de l'alimentation (°c)</b>	<b>45</b>

**D-Paramètres du contrôleur ESC:**

Fréquence de coupure du filtre passe haut :  $W_H=100$

Fréquence de coupure du filtre passe bas :  $W_L=10$

Amplitude du signal de perturbation :  $a=0.1$

Gain de l'intégrateur  $\delta = 2$

# Publications

---

## Communications internationales

- 1- **Omar CHARROUF** et Achour BETKA, "Optimisation d'un système de dessalement à osmose inverse alimenté par un système de conversion d'énergie éolienne" in Proceedings of the ICRE2012 (2<sup>nd</sup> International Conference On Renewable Energy), Béjaia 15/16 avril 2012.
- 2- **Omar CHARROUF** et Achour BETKA, "Optimisation d'un système de pompage éolien" in Proceedings of the ICEECA'2012 (1<sup>st</sup> International Conference On Electrical Engineering and Control Applications), Khenchela 20/22 Novembre 2012.
- 3- **Omar CHARROUF**, A. BETKA, A. GOLEA, "Performance optimization of photovoltaic reverse osmosis desalination system", in Proceedings of ICEE'2014 (The First International Conference on Electrical Engineering), Dec 07-08, 2014, Biskra, Algeria.
4. **Charrouf, O.**, Betka, A., Taleb-ahmed, A., & Amar, G. Wind energy potential and economic analysis of WECS in four selected locations in Algeria. international conference on *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016 Birmingham UK
5. **Charrouf, O.**, Betka, A., hadef, H., Djebabra, M., & Tiar, M. Degradation evaluation of PV modules operating under Northern Saharan environment in Algeria. International Conference on Technologies, and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. 2016 Paris
6. Abdeddaim, S., A. Betka, and **O. Charrouf**. "Optimal tracking and second order sliding power control of the DFIG wind turbine." International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation (ICEREGA 17). Belfort, France

---

## Articles

- 1- **Charrouf, O.**, Betka, A., Becherif, M., & Tabanjat, A. (2018). Techno-economic Analysis of Wind Turbines in Algeria. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 19(1).
- 2- **Charrouf, O.**, Betka, A., hadef, H., Djebabra, M., & Tiar, M. (2017, February). Degradation evaluation of PV modules operating under Northern Saharan environment in Algeria. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1814, No. 1, p. 020030). AIP Publishing.
- 3- Abdeddaim, S., A. Betka, and **O. Charrouf**. "Optimal tracking and second order sliding power control of the DFIG wind turbine." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1814. No. 1. AIP Publishing, 2017