

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Département d'Automatique**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN AUTOMATIQUE**

**THEME**

**COMMANDE NON LINEAIRE D'UN SYSTEME  
HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE  
CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE**

*Etudié par :*

Mlle BOUDIAF Imène et Melle OUZAICH Siham

*Proposé et dirigé par*

*Pr. H. CHEKIREB et Dr. O. STIHI*

Jun 2013

Ecole Nationale Polytechnique, 10, Avenue Hassen badi, BP 182 El Harrach 16200, Alger, Algérie

## المخلص

إهتمنا في هذه المذكرة بالتحكم في أنظمة الطاقة الهجينة المكونة من طاقة الرياح و الطاقة الكهروضوئية و المتصلة بشبكة الكهرباء

النظام المقترح مكون من سلسلة لإنتاج الطاقة الكهروضوئية و أخرى لإنتاج طاقة الرياح مجموع الطاقة المنتجة تخزن في بطاريات بعد وصف هذا النوع من الأنظمة إقترحنا نماذج لمختلف مكونات هذا النظام . التحكم في هذا النظام يمزج بين التحكم في سلسلتي إنتاج الطاقة المذكورتين سالفًا بغية إستخراج أكبركم من الطاقة و ذلك عن طريق تتبع نقطة الإستطاعة القصوى و أيضا من أجل ضمان نوعية الطاقة الكهربائية التي تمول الشبكة الكهربائية كل هذا عن طريق التحكم في توتر موصل المحول المستمر و توتر المحول جهة شبكة الكهرباء

## كلمات مفتاحية

تحكم ، كهروضوئي ، رياحي ، بطاريات ، الشبكة الكهربائية ، نقطة الإستطاعة القصوى ، موصل المحول المستمر ، محول

## Résumé

Dans ce mémoire, notre intérêt s'est porté sur la commande d'un système non linéaire hybride éolien-photovoltaïques connecté au réseau. Le système proposé se compose d'une chaîne de production photovoltaïque et éolienne, et l'énergie produite sera stockée dans des batteries.

Après un état de l'art sur ce type des systèmes, des modèles de différents composants du système sont proposés. La commande de ce système a combiné la commande des deux sous-systèmes pour assurer : la maximisation des énergies photovoltaïque et éolienne extraites, en poursuivant leurs points de puissance maximale (MPP), et pour assurer aussi la qualité de l'énergie électrique injecté au réseau, en commandant la tension du bus continu et la tension du convertisseur coté réseau.

**Mot clés :** commande, photovoltaïque, éolien, batteries de stockage, réseau, MPP, bus continu, convertisseur.

## Abstract

In this work, our interest is focused on the control of a networked nonlinear hybrid wind-solar system. The proposed system consists of a chain of solar and wind power, the energy is stored in batteries. After a state of the art for this type of systems, models of different components of the system are proposed. The control of this system combined the control of the two subsystems, to maximize the photovoltaic and wind extracted energy by pursuing their Maximum Power Point (MPP), and also to ensure the quality of the electrical energy injected to the network by controlling the DC bus voltage and line voltage converter side.

**Key words:** control, photovoltaic, wind, battery storage, network, MPP, DC bus converter.

## *Remerciements*

*Nous remercions le bon Dieu de nous avoir accordé la patience, le courage, la volonté et la motivation qui nous ont permis d'achever ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude, notre grand respect et notre sincère reconnaissance à nos promoteurs le Pr. H.CHEKIREB et Dr. O.Stihi de l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir assumé la lourde responsabilité de nous encadrer, de nous avoir orienté et conseillé tout au long de ce travail, pour leurs disponibilité ainsi pour la confiance qu'il nous ont accordée .*

*Nous remercions chaleureusement messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous accordent d'avoir accepté d'évaluer notre projet.*

*Nous souhaitons aussi remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et en particulier, Nos professeurs d'Automatique qui nous ont encadrés auparavant et tous nos enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*La personne qui m'est la plus chère au monde : Ma mère...  
symbole de tendresse , de sacrifice et d'amour , Sans ton soutien  
rien n'aurait été possible que dieu te protège et te garde pour  
moi.*

*La mémoire de ma deuxième mère, ma grand-mère, que j'ai  
tant voulu avoir à mes cotés ce jour là, que dieu t'accueille dans son  
vaste paradis, repose en paix.*

*Mon grand père qui a toujours été à mes cotés, que dieu te garde  
pour nous.*

*Ma famille*

*Mes amis*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment...*

*S mène*

## *Dédicaces*

*En signe d'amour, de gratitude et de respect, Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents qui m'ont toujours apporté leur amour et leur soutien pour affronter les difficultés de la vie. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance la plus dévouée.*

*A mes frères : Djelloul , Mounir et Yacine*

*A mon adorable petite sœur Celya*

*À tous mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

*Un grand merci à amine*

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*Siham*

## Tables des matières

<i>Introduction générale</i> .....	<i>1</i>
<i>Chapitre I : Commande du système hybride global</i>	
I.1 Structure du système hybride.....	4
I.2 Stratégie de la gestion du système hybride.....	5
I.3 Résultats de Simulation du fonctionnement du système hybride.....	7
I.3. 1. Fonctionnement de jour en mode I.....	7
▪ Résultats de simulation du fonctionnement de jour en mode 1.....	8
▪ Interprétation des résultats.....	11
I.3. 2. Fonctionnement de nuit en mode I.....	13
▪ Résultats de simulation du fonctionnement de nuit en mode 1.....	13
▪ Interprétation des résultats.....	16
<b>I.4 Conclusion</b> .....	17
<i>Conclusion générale</i> .....	<i>19</i>
<i>Références bibliographiques</i> .....	<i>21</i>
<i>Annexe(2)</i> .....	<i>24</i>

## TABLE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> Structure globale du système hybride et sa commande .....	4
<b>Figure I.2</b> Organigramme de la supervision du système hybride .....	7
<b>Figure I.3</b> Profil de l'ensoleillement, du vent et de la charge .....	8
<b>Figure I.4</b> réglage des tensions et des puissances du système hybride .....	9
<b>Figure.I.5</b> Bilan des puissances au niveau du bus AC.....	11
<b>Figure I.6</b> profils du vent et de la charge .....	13
<b>Figure I.7</b> Réglages des tensions et puissances du système hybride.....	14
<b>Figure I.8</b> Bilan des puissances au niveau du bus AC.....	16

## Abréviations et symboles

### Abréviations

<b>AC</b>	Courant Alternatif (Alternating Current)
<b>ANN</b>	Réseau de Neurones Artificiels (Artificial Neuronal Network)
<b>DC</b>	Courant Continu (Direct Current)
<b>F.é.m.</b>	Force électromotrice
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>MADA</b>	Machine Asynchrone à Double Alimentation
<b>MCC</b>	Moteur à Courant Continu
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<b>MPP</b>	Point de Puissance Maximal (Maximum Power Point)
<b>MPPT</b>	Poursuite du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)
<b>Ni-Cd</b>	Nickel-Cadmium
<b>Pb-acide</b>	Plomb-Acide
<b>PI</b>	Régulateur Proportionnel Intégral
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>SEH</b>	Système d'Energie Hybride

### Symboles latins

		unités
<b>C</b>	Capacité	F
<b><math>C_p</math></b>	Coefficient de puissance	N.m
<b><math>C_{aero}</math></b>	Couple aérodynamique	N.m
<b><math>C_{arbre}</math></b>	Couple de l'arbre	N.m
<b><math>C_{em}</math></b>	Couple électromagnétique	N.m
<b><math>C_{em\ ref}</math></b>	Couple électromagnétique de référence	N.m
<b><math>C_{mec}</math></b>	Couple mécanique	N.m
<b><math>C_{visq}</math></b>	Couple des frottements visqueux	N.m
<b><math>E_0</math></b>	Tension constante	V
<b><math>E_{batt}</math></b>	Tension non linéaire de la batterie	V
<b><math>E_g</math></b>	Bande énergétique du gap du semi-conducteur	V

$E_r$	F.é.m. créé au niveau rotor	N
$E_s$	F.é.m. créé au niveau stator	N
$Exp(s)$	Zone dynamique exponentielle	V
$f$	Coefficient du frottement visqueux	N.m.s/rad
$f_r$	Fréquence des courants rotoriques	Hz
$f_s$	Fréquence des courants statoriques	Hz
$f_s$	Fréquence de hachage	Hz
$G$	l'ensoleillement	W/m <sup>2</sup>
$G$	gain du multiplicateur	
$G$	conductance de la source	A/V
$g$	Glissement	
$I$	courant	A
$I^c$	Courant de la cellule photovoltaïque	A
$I^G$	Courant du générateur photovoltaïque	A
$I_0$	Courant de saturation de la diode	A
$I_b$	Courant de la batterie	A
$I_{diode}$	Courant direct de la diode	A
$I_{light}$	Photo-courant de cellule	A
$I_m$	Courant de point de puissance maximale	A
$I_{pv}$	Courant de la cellule	A
$I_r$	Courant rotorique	A
$I_s$	Courant statorique	A
$I_{sc}$	Courant de court-circuit	A
$I_{sc}^c$	Courant de court-circuit de la cellule photovoltaïque	A
$I_{sc}^G$	Courant de court-circuit du générateur photovoltaïque	A
$J_g$	Inertie du générateur	kg. m <sup>2</sup>
$J_T$	Inertie totale	kg. m <sup>2</sup>
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine	kg. m <sup>2</sup>
$K$	Constante de Boltzmann	
$K_I$	Constante d'intégralité	
$K_P$	Constante de proportionnalité	
$L_r$	Inductance cyclique rotorique	H
$L_s$	Inductance cyclique statorique	H

<b>M</b>	rapport de conversion	
<b><math>M_{sr}</math></b>	Inductance mutuelle	H
<b>n</b>	coefficient d'idéalité	
<b><math>N_p</math></b>	Nombre de cellules en parallèle	
<b><math>N_r</math></b>	Nombre de spires des bobinages rotoriques	
<b><math>N_s</math></b>	Nombre de spires des bobinages statoriques	
<b><math>N_s</math></b>	Nombre de cellules en série	
<b>p</b>	nombre de paire de pôles	
<b>P</b>	puissance	W
<b><math>P_{aero}</math></b>	Puissance aérodynamique	W
<b><math>P_m</math></b>	Puissance mécanique	W
<b><math>P_{max}</math></b>	Puissance maximale	W
<b><math>P_r</math></b>	Puissance active au niveau rotor	W
<b><math>P_{rcp}</math></b>	Puissance active demandée par le récepteur	W
<b><math>P_{res}</math></b>	Puissance active fournie au réseau	W
<b><math>P_s</math></b>	Puissance active au niveau stator	W
<b><math>P_{sh}</math></b>	Puissance active fournie par le système hybride	W
<b><math>P_{vent}</math></b>	Puissance du vent	W
<b>q</b>	charge de l'électron	C
<b><math>Q_r</math></b>	Puissance réactive au niveau rotor	VAR
<b><math>Q_{rcp}</math></b>	Puissance réactive demandée par le récepteur	VAR
<b><math>Q_s</math></b>	Puissance réactive au niveau stator	VAR
<b><math>R_r</math></b>	Résistance rotorique	$\Omega$
<b><math>R_s</math></b>	Résistance statorique	$\Omega$
<b><math>R_s</math></b>	Resistance série	$\Omega$
<b><math>R_s^C</math></b>	Resistance interne de la cellule photovoltaïque	$\Omega$
<b><math>R_s^G</math></b>	Resistance interne du générateur photovoltaïque	$\Omega$
<b><math>R_{shunt}</math></b>	Resistance shunt	$\Omega$
<b><math>R_t</math></b>	Rayon de la turbine ou longueur d'une pale	m
<b><math>sel(s)</math></b>	Mode de la batterie	
<b><math>S_{eol}</math></b>	Surface balayée par l'éolienne	$m^2$
<b>T</b>	Température	$^{\circ}C$
<b><math>T_C</math></b>	Température de la jonction	K

$T_s$	Période de commutation	s
$v$	vitesse du vent	m/s
$v_{est}$	vitesse du vent estimée	m/s
$V$	tension	V
$V^c$	Tension de la cellule photovoltaïque	V
$V^G$	Tension du générateur photovoltaïque	V
$V_b$	Tension de la batterie	V
$V_c$	Tension du condensateur	V
$V_m$	Tension de point de puissance maximale	V
$V_{oc}$	Tension du circuit ouvert	V
$V_{oc}^c$	Tension du circuit ouvert de la cellule photovoltaïque	V
$V_{oc}^G$	Tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque	V
$V_r$	Tension rotorique	V
$V_{ref}$	Tension de référence	V
$V_s$	Tension statorique	V
$V_T$	Potentiel thermique	V
$Z$	l'impédance équivalente d'entrée	

### Symboles grecques

$\alpha$	rapport cyclique	
$\beta$	angle d'inclinaison des pales	°
$\Delta D$	pas d'échantillonnage	s
$\Delta G$	incrémentale conductance	A/V
$\Phi_r$	Flux rotorique	Wb
$\Phi_s$	Flux statorique	Wb
$\lambda$	rapport de vitesse	
$\Omega_{gen}$	vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
$\Omega_r$	vitesse mécanique du rotor	rad/s
$\Omega_s$	vitesse du champ magnétique dans l'entrefer	rad/s
$\Omega_t$	vitesse de rotation de la turbine	rad/s
$\omega$	pulsation de synchronisme	rad/s
$\omega_s$	Pulsation du réseau (pulsation des courants statoriques)	rad/s
$\omega_r$	pulsation des courants rotoriques	rad/s

$\rho$	masse volumique de l'air	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\theta$	l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique	rad
$\theta_r$	Angle électrique rotorique	rad
$\theta_s$	Angle électrique statorique	rad
$\tau$	Constante de temps	s
$\mu I_{sc}$	coefficient de température du courant de court-circuit	A/K

---

---

---

## *Introduction générale*

---

---

# Introduction générale

---

La consommation d'énergie, au cours du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive et elle continuera à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part.

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale. L'énergie électrique est essentiellement produite à partir des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) ou nucléaires (minerais d'uranium).

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines fossiles, ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, de démantèlement prochain des vieilles centrales et de risque industriel.

Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium).

L'urbanisation rapide représente un des facteurs aggravants le dérèglement climatique. Jusqu'à 80 % de l'énergie mondiale est consommée dans les villes et a pour conséquence des quantités importantes d'émissions de gaz à effet de serre [22]. Le secteur du bâtiment consomme aujourd'hui 47% de l'énergie produite et est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre [28]. La production de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) due à l'utilisation des carburants fossiles est maintenant reconnue comme cause majeure du réchauffement de l'atmosphère.

Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, le recours aux énergies renouvelables et à une meilleure utilisation des combustibles fossiles devient impératif.

Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'énergie électrique et thermique proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre de l'atmosphère lors de leur exploitation. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement et l'intégration des énergies renouvelables plus particulièrement dans le secteur de l'habitat.

Les moyens de production tels que l'éolien, le photovoltaïque, le solaire thermique etc. présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la

# Introduction générale

---

charge. Le but premier de notre travail est d'assurer l'énergie demandée par le consommateur, de rendre maximale la puissance provenant des sources d'énergie renouvelable et, si possible, rendre le bilan d'énergie positif et d'injecter le surplus d'énergie dans le réseau.

Dans ce travail, nous avons retenu le système photovoltaïque et le système éolien comme sources renouvelables d'énergie électrique. Le stockage d'énergie est le facteur clef dans un système d'énergie hybride; dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont reliées aux systèmes de production d'énergie, photovoltaïque et éolienne, à travers un bus continu et des convertisseurs de puissance.

Dans ce contexte, le travail présenté ici se focalise sur la modélisation, la commande et la gestion d'un système hybride de production d'énergie renouvelable. Aussi, ce travail sera focalisé sur les quatre grands axes suivants :

- l'optimisation des énergies renouvelables, photovoltaïque et éolienne, à travers des commandes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).
- Un contrôle efficient des énergies.
- Le maintien des conditions nécessaires à un fonctionnement correct des différents dispositifs du système (contrôle des bus continus et contrôle du système de stockage).
- Une planification et une gestion adéquate de l'énergie produite.

Dans ce but, le travail présenté est organisé en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons les différentes configurations des systèmes hybrides et leurs intérêts. Notre travail portant sur un système d'énergie hybride photovoltaïque/éolienne et batteries de stockage, une attention particulière a été consacrée à ces types de source d'énergie.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différents dispositifs constituant le système hybride étudié. Ces derniers sont modélisés dans le but d'analyser le comportement dynamique du système complet face aux variations climatiques et de charge.

La synthèse de la commande des différents dispositifs du système hybride est développée au chapitre III, sans tenir compte des différentes interactions pouvant existées entre ses dispositifs. En effet, la stratégie MPPT est mise en contribution pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque et éolienne tandis que la puissance du générateur est maîtrisée en exploitant tour à tour la méthode de Lyapunov et celle par les modes glissants. La méthode de contrôle de la charge et la décharge de la batterie de stockage est également exposé dans ce chapitre. De plus, la stabilisation de la tension continue est effectuée pour assurer un fonctionnement correct du système.

# Introduction générale

---

Le fonctionnement du système hybride global est étudié au chapitre IV, en tenant compte de l'effet de la présence des différents composants. Ce fonctionnement est lié à la stratégie adoptée pour la gestion de l'énergie et dépend également des dispositifs existants. Ainsi, nous traitons le cas d'un abonné du réseau électrique qui se veut également un petit producteur d'énergie. Nous proposons donc, un algorithme de la gestion de l'énergie dans le cadre de la stratégie adoptée. Pour valider ceci, la simulation des différents modes de fonctionnement du système hybride global est effectuée.

Ce travail est clôturé par une conclusion générale où sont exposées nos observations et remarques ainsi que quelques perspectives relatives au développement de ce type de système.

---

---

# Chapitre I

---

---

**Commande du système hybride global**

---

---

# Chapitre I

## Commande du système hybride global

### I.1 Structure du système hybride

L'intérêt du système hybride relève de la complémentarité des deux sources d'énergie. Connaissant la contribution de chaque source (photovoltaïque et éolienne) pour l'alimentation de la charge (maison individuelle), nous avons développé, dans un premier temps, la commande de chaque sous-système constituant le système hybride étudié sans tenir compte des interactions entre les différents sous-systèmes. Ces interactions apparaissent au niveau des deux bus continus. Dans ce chapitre, nous passons à l'étape finale qui consiste à associer tous les éléments du système hybride et par la suite commander ce dernier afin d'assurer une bonne gestion de l'énergie produite.

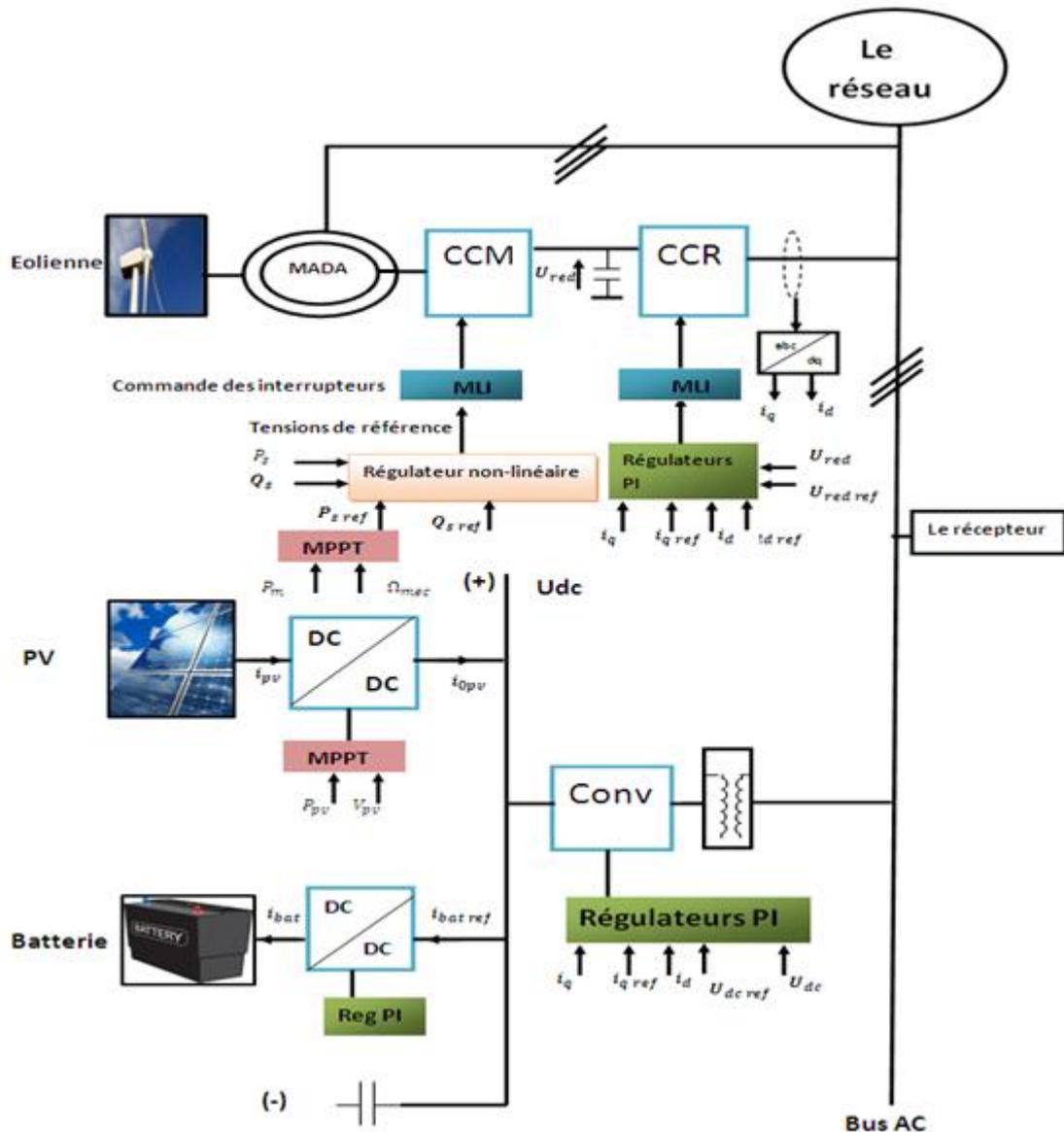


Fig.I.1 Structure globale du système hybride et sa commande.

# Chapitre I

## Commande du système hybride global

La figure I.1 montre la structure globale du système hybride ainsi que la commande des différents éléments le constituant .En effet la commande de la chaîne éolienne comporte la commande des deux convertisseurs : CCR et CCM

le CCR est commandé en MLI afin de maintenir la tension  $U_{red}$  du bus continu à la valeur de référence (600V), et ce à l'aide un régulateur PI

le convertisseur CCM est commandé par des commandes non-linéaires (la commande par modes glissants et la commande utilisant le critère de stabilité de Lyapunov) afin que les puissances statoriques actives et réactives ( $P_s$  et  $Q_s$ ) suivent leurs références ( $P_s = P_{MPPT}$  et  $Q_s = -Q_{rcp}$ )

La commande de la chaîne photovoltaïque se base sur l'algorithme MPPT (P&O) ayant comme entrée la puissance et la tension aux bornes du panneau photovoltaïque cherche à maximiser la puissance extraite

Le convertisseur réversible en courant relié à la batterie est commandé à l'aide d'un régulateur PI afin de maintenir le courant de la batterie  $I_{bat}$  à sa valeur de référence contrôlant ainsi la charge et décharge de la batterie.

Le convertisseur, au niveau du bus AC est commandé en MLI afin de maintenir la tension  $U_{dc}$  du bus continu à la valeur de référence (120V), et ce à l'aide un régulateur PI

### I.2 Stratégie de la gestion du système hybride

Les différentes situations rencontrées durant le fonctionnement du système, et qui peuvent causer la dégradation des éléments le constituant, des pertes en énergie et, la réduction de la durée de vie du système de stockage, font qu'une bonne supervision de ce système est nécessaire. Pour éviter ces problèmes, nous avons développé un algorithme qui permet la gestion et le contrôle de ce système.

Nous considérons le cas d'un abonné au réseau électrique dont les installations exigent une puissance de pointe de 2.4kW. Cet abonné au réseau électrique s'est équipé d'une éolienne de puissance nominale de 4 kW et d'un générateur photovoltaïque de 1.3kW et d'un système de stockage d'énergie par une batterie d'accumulateurs. Par cette installation, l'abonné peut fournir théoriquement une puissance de 2.9 kW donc il peut être considéré comme un petit producteur d'énergie électrique.

Nous avons dimensionné la capacité de la batterie de telle sorte qu'elle puisse stocker l'énergie moyenne produite par le panneau photovoltaïque durant une journée moyenne d'été.

Nous considérons que le gestionnaire du réseau électrique peut recevoir et fournir de l'énergie à tout instant de la journée à l'abonné. Cependant dans un souci de participer à l'effort de réduire les contraintes sur le réseau électrique, nous considérons que l'abonné maintient un facteur de puissance unitaire au niveau de son point commun de connexion (PCC) au réseau électrique. De plus, l'énergie

# Chapitre I

## Commande du système hybride global

---

stockée doit être fournie au réseau au moment de la forte demande qui se situe pour ce réseau entre 19h et 22h.

Donc, pour la gestion du fonctionnement du système hybride, nous considérons les deux cas principaux importants qui sont le fonctionnement de jour et le fonctionnement de nuit ayant chacun deux modes.

- **Fonctionnement de jour (mode1)** : la puissance consommée par l'abonné est faible et la puissance produite par le panneau photovoltaïque charge la batterie. Par contre, la puissance produite par l'éolienne est livrée directement au réseau pour couvrir les besoins de l'abonné et le surplus de puissance produit est renvoyé sur le réseau électrique. Dans le cas où la puissance produite par l'éolienne est insuffisante pour satisfaire les besoins de l'abonné celui-ci tire le complément de puissance à partir du réseau électrique car il en est constamment connecté.

- **Fonctionnement de jour (mode2)** : Ce mode peut survenir les jours d'été où les journées sont longues et la capacité de la batterie risque d'être dépassée c'est-à-dire que la charge de la batterie a atteint sa valeur maximale  $C_{bat\ max}$ . Dans cette situation, la batterie est débranchée et la puissance produite par le PV est transférée au bus AC par l'intermédiaire du redresseur à MLI. L'éolienne continue à fournir de la puissance au bus AC. Les besoins de l'abonné sont couverts par la puissance provenant du PV et de l'éolienne et le surplus de puissance est directement livré au réseau électrique.

- **Fonctionnement de nuit (mode1)**: le panneau photovoltaïque ne produit plus de puissance et la batterie est commandée de manière qu'elle puisse fournir une puissance constante durant la période de forte demande (dans notre cas entre 19h et 22h). Cette puissance électrique sous forme continue est transférée au bus AC par l'intermédiaire du redresseur à MLI (CONV). Donc, la batterie va se décharger jusqu'à atteindre  $C_{bat\ min}$ , et dès que le niveau  $C_{bat\ min}$  est atteint la décharge est stoppée et la batterie est débranchée. En plus de la puissance provenant de la batterie, le bus AC continue à recevoir de la puissance fournie directement par l'éolienne. Nous considérons qu'il y a aussi une augmentation de la puissance consommée par l'abonné dans la période de forte demande. Malgré cela, un surplus de puissance par rapport à la consommation de l'abonné est dégagé et il est directement fourni au réseau.

- **Fonctionnement de nuit (mode2)**: C'est un fonctionnement de nuit au de là de la forte demande où nous considérons que la batterie est déchargée mais elle est débranchée en attente de charge pour le jour suivant. La puissance produite par l'éolienne couvre largement les faibles besoins de l'abonné et le surplus de puissance est livré au réseau électrique .

# Chapitre I

## Commande du système hybride global

Tenant compte de ces différents modes de fonctionnement, la supervision du système hybride est représentée sur l'organigramme de la figure I.2

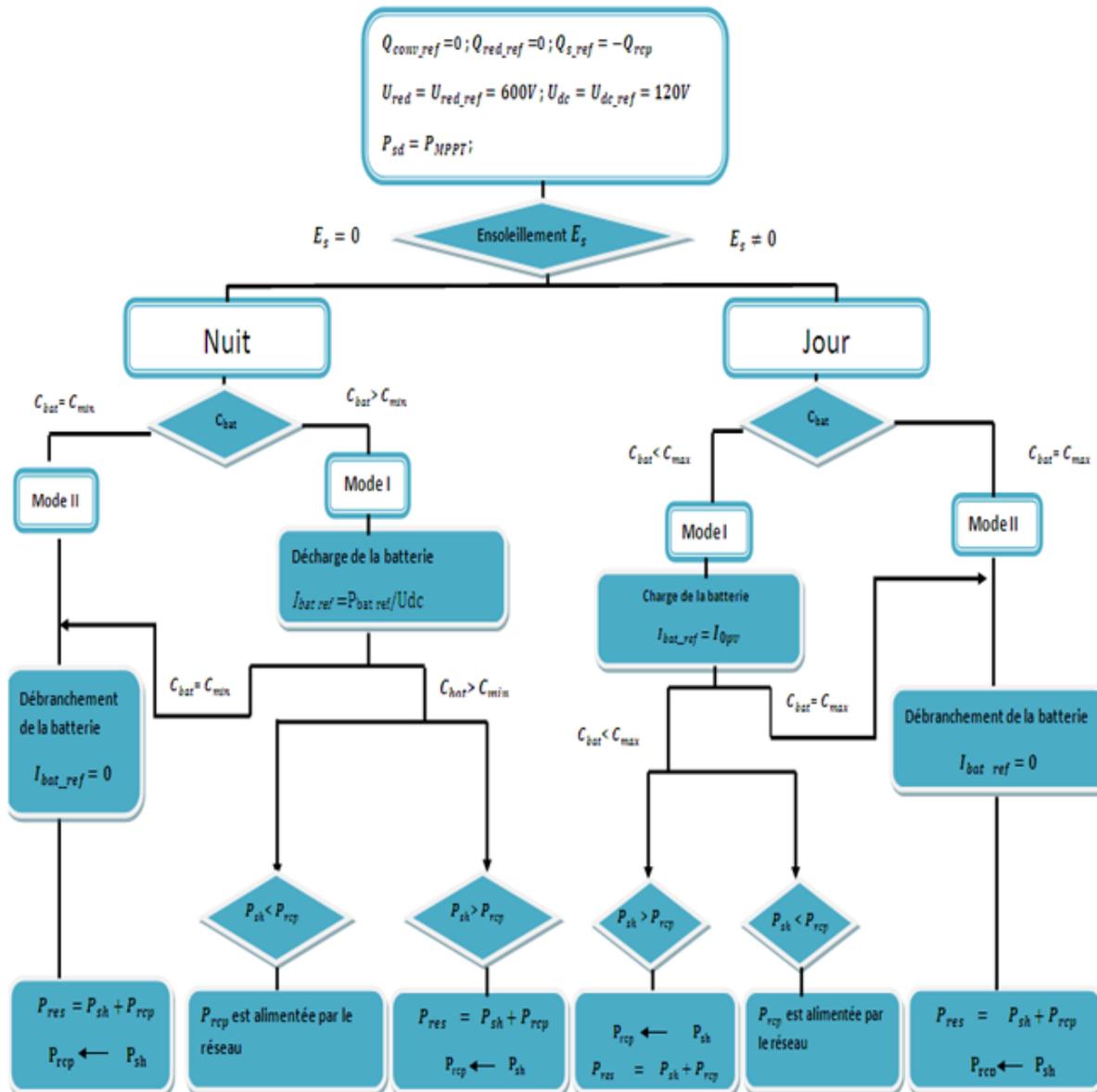


Fig. I.2 Organigramme de la supervision du système hybride

### I.3 Résultats de Simulation du fonctionnement du système hybride

#### I.3.1. Fonctionnement de jour en mode I

On considère qu'initialement la batterie est à sa charge minimale  $C_{bat\ min}$  et que la vitesse du vent et l'ensoleillement ont chacun le profil représenté respectivement à la figure I.3.b et I.3.a. Il est à noter

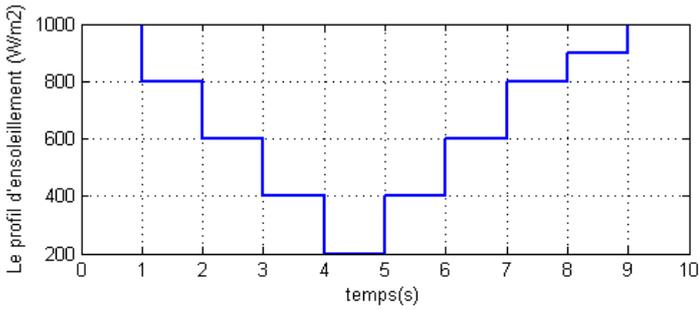
# Chapitre I

## Commande du système hybride global

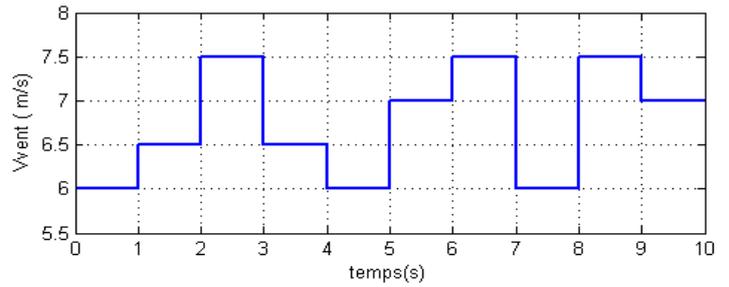
que ces profils sont théoriques et n'ont de valeur que pour illustrer le fonctionnement du système hybride. De plus, le profil de la puissance consommée par le récepteur (la consommation de l'abonné) est indiquée à la figure I.3.c

Nous considérons que de jour, l'abonné consomme une puissance qui reste tout le temps inférieure à la moitié de sa puissance maximale demandée.

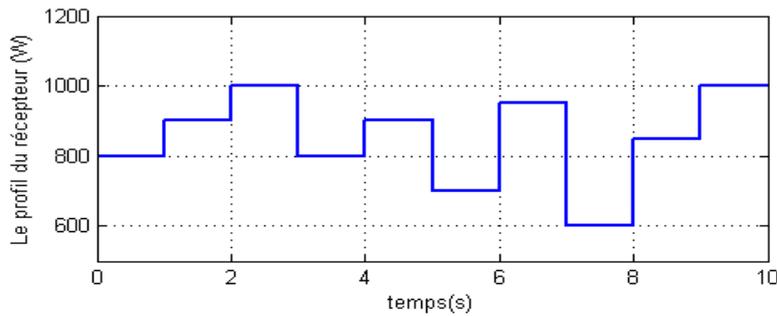
- **Résultats de simulation du fonctionnement de jour en mode I**



(a) Profil de l'ensoleillement



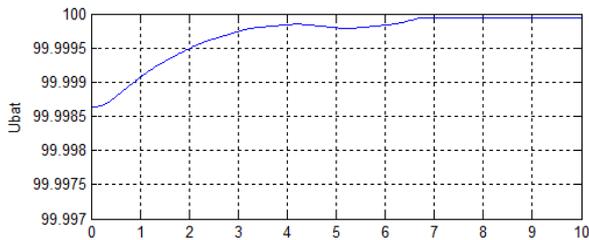
(b) Profil du vent



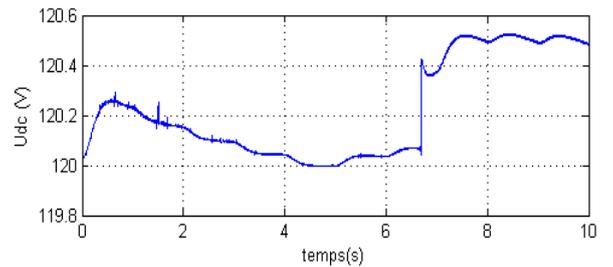
(c) Profil de la puissance active de la charge Prcp

**Fig. I.3 : Profil de l'ensoleillement, du vent et de la charge**

Les résultats obtenus après simulation sont illustrés dans les figures I.4, I.5:



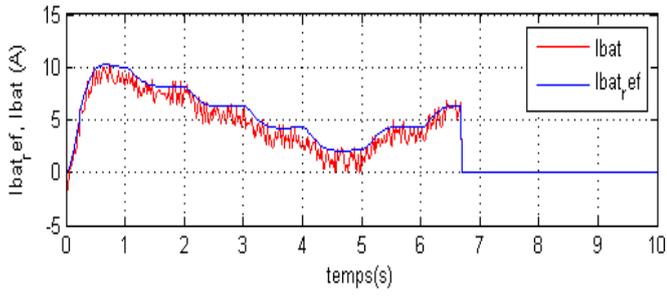
a) tension aux bornes de la batterie



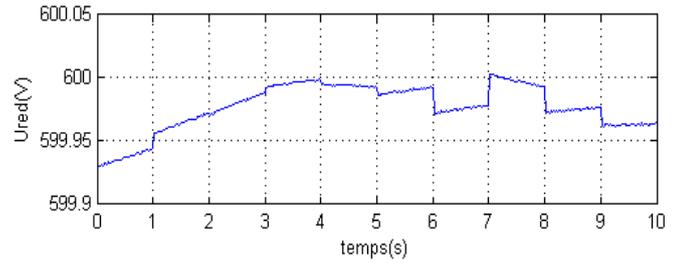
b) tension du bus continu

# Chapitre I

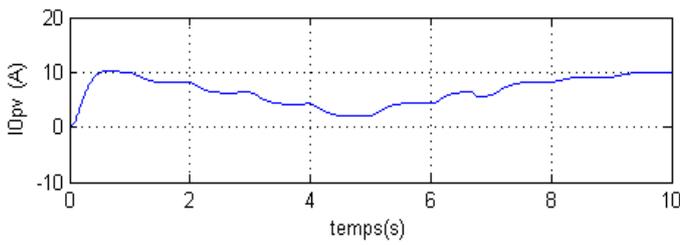
## Commande du système hybride global



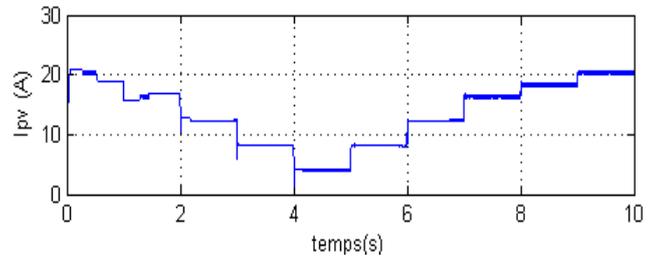
c) courant dans la batterie et sa référence



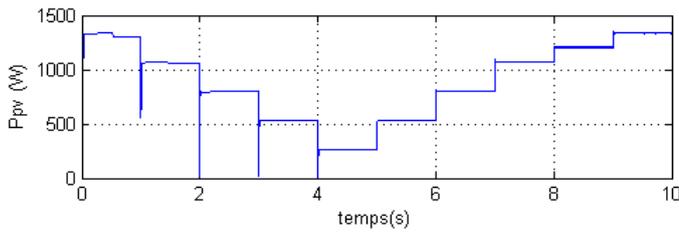
d) tension aux bornes du redresseur



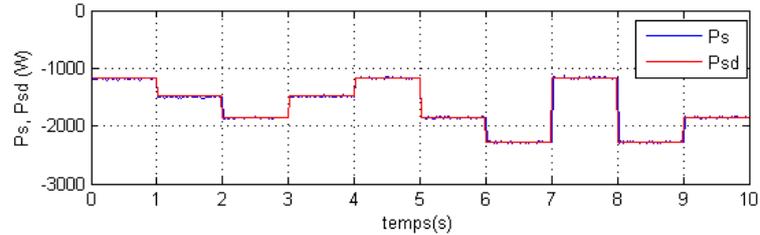
e) courant à la sortie du hacheur boost



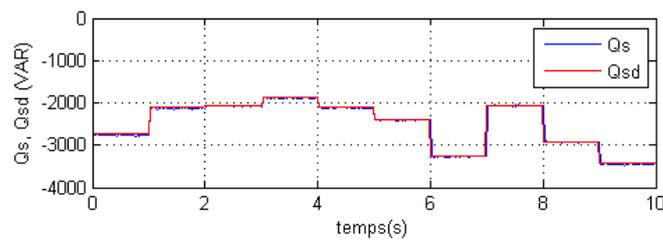
f) courant à la sortie du panneau photovoltaïque



g) Puissance délivrée par le panneau photovoltaïque



h) Puissance active statorique

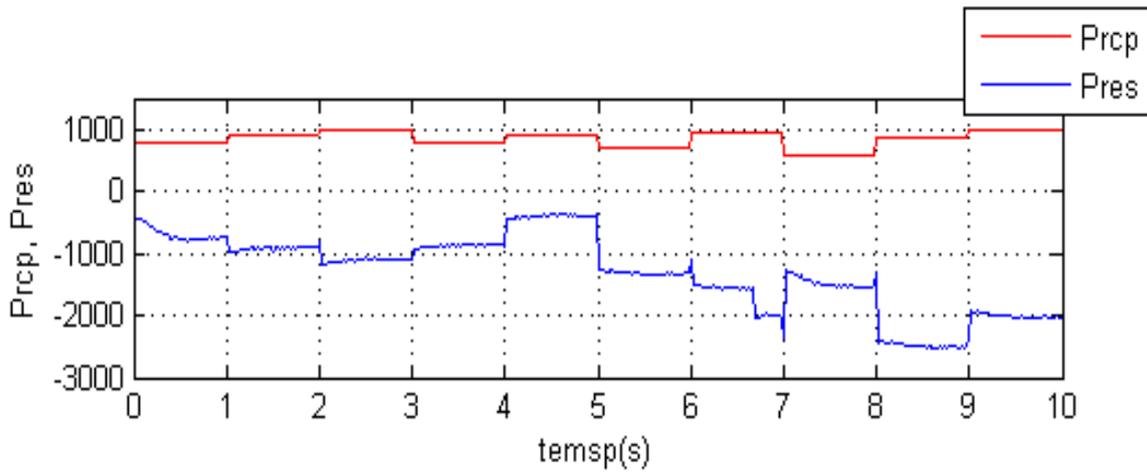


i) Puissance réactive statorique

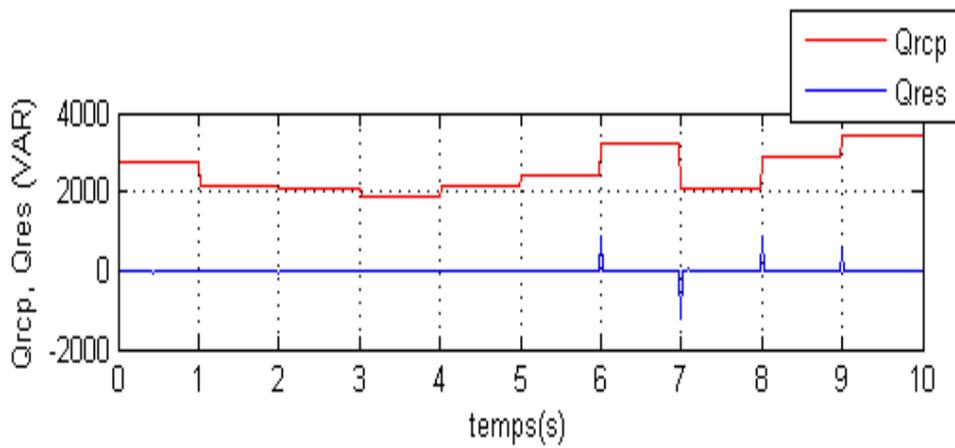
Fig. I.4 : réglage des tensions et des puissances du système hybride

# Chapitre I

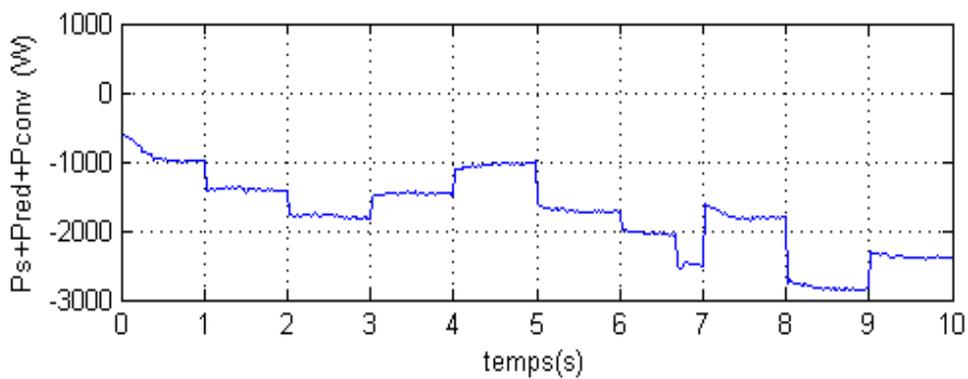
## Commande du système hybride global



a) Puissance active demandée par le récepteur et la puissance fournie au réseau



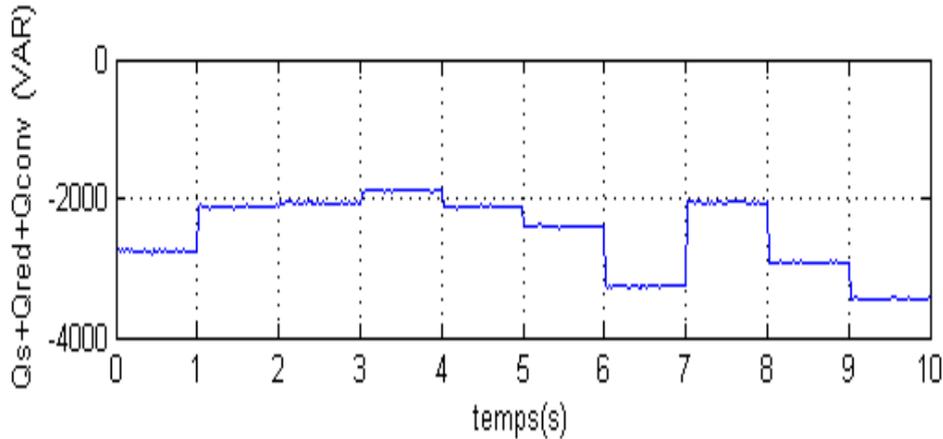
b) Puissance réactive  $Q_{rcp}$  et la puissance réactive  $Q_{res}$



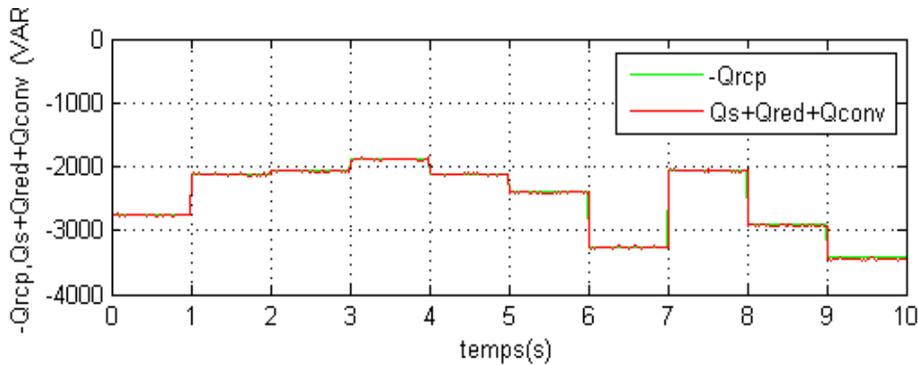
c) Puissances actives fournies au réseau

# Chapitre I

## Commande du système hybride global



d) Puissances réactives du SH Qsh



e) Puissances réactives Qsh et la puissance réactive -Qrcp

**Fig.I.5 : Bilan des puissances au niveau du bus AC**

### Interprétation des résultats

En fonctionnement de jour mode I, la batterie est en état de charge et son courant de référence  $I_{bat\_ref}$  correspond au courant à la sortie du hacheur boost  $I_{o\_pv}$  donc,  $I_{bat\_ref} = I_{o\_pv}$ . Le hacheur de courant (régulateur de la charge) a pour rôle d'imposer la charge de la batterie à cette valeur de référence.

Du fait que le gestionnaire du réseau a imposé au petit producteur qui est notre abonné, de maintenir un facteur de puissance unitaire au PCC du réseau électrique par conséquent les références des puissances réactives sont imposées comme suit :

$$Q_{s\_ref} = -Q_{rcp};$$

$$Q_{red\_ref} = 0;$$

$$Q_{conv\_ref} = 0;$$

Où  $Q_{rcp}$  est la puissance réactive du récepteur (facteur de puissance positif) de plus,  $Q_{red\_ref}$  et  $Q_{conv\_ref}$  sont respectivement la référence de la puissance réactive du convertisseur CCR et la référence de la puissance réactive du convertisseur CONV.

Dans les conditions citées plus haut et pour les profils du vent, de l'ensoleillement et des puissances actives et réactives envisagées (fig. I.3&4), nous avons simulé le fonctionnement global du système

# Chapitre I

## Commande du système hybride global

hybride de jour. Les résultats de la simulation ont été obtenus dans le cas où les gains des différents régulateurs ont été imposés tels qu'indiqué en Annexe(2)

Ces résultats apparaissent aux figures I.4& I.5

Le profil de la puissance  $P_{pv}$  (fig.I.4.g) produite par le PV et celui du courant  $I_{pv}$  (fig.4.f) à la sortie du PV suivent le profil de l'ensoleillement. Le courant de la batterie  $I_{bat}$  (fig.4.c) suit avec une faible erreur sa référence représentée par le courant de sortie du hacheur boost  $I_{o,pv}$  (fig.4.e).

La circulation des courants  $I_{bat}$ ,  $I_{o,pv}$  et  $I_{red}$  au niveau du bus continu de tension  $U_{dc}$  affecte faiblement la tension du bus puisque l'erreur maximale de réglage est de l'ordre de 2% (fig.4.b).

Les puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  au stator de la MADA sont régulées chacune à sa valeur de référence avec une faible erreur en régime statique (fig.4.h et fig.4.i).

La circulation de la puissance de glissement entre le rotor de la MADA et le bus continu de tension  $U_{red}$  n'influence pratiquement pas la valeur de la tension (fig.4.d) puisqu'elle reste très proche de la valeur de référence (600V).

Au niveau du bus AC c'est le bilan des puissances qui nous permet d'évaluer la situation de l'installation par rapport au réseau électrique. En effet, la puissance réactive  $Q_s$  (fig.4.i) produite au stator par la MADA suit sa référence imposée  $-Q_{rcp}$  elle est donc l'opposée de la puissance réactive du récepteur. La somme de puissance réactive produite par l'installation

$Q_{sh} = Q_s + Q_{red} + Q_{conv}$  (fig.5.d) compense pratiquement la puissance exigée par le récepteur puisque la puissance réactive au PCC avec le réseau  $Q_{res}$  (fig.5.b) est pratiquement nulle sauf aux instants relatifs aux sauts du profil de la puissance réactive.

En comparant le profile de la puissance active  $P_{sh}=(P_s+P_{red}+P_{conv})$  produite par le SH (fig.5.c) et celui de la puissance active  $P_{rcp}$  du récepteur (fig I.3.c), il se dégage un surplus de puissance qui est reçu par le réseau en effet la puissance  $P_{res}$  est négative (renvoi de la puissance au réseau électrique) (fig.5.a).

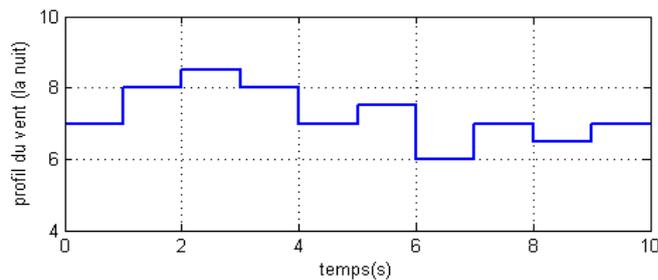
A l'instant  $t=6.5s$  la tension aux bornes de la batterie atteint sa valeur maximale (fig I.4. a).

La batterie est donc complètement chargée ( $C_{bat} = C_{bat,max}$ ), le système hybride bascule du fonctionnement de mode I vers celui de mode II où la batterie est complètement chargée. Cette dernière est donc débranchée, la puissance active  $P_{sh}$  produite par le SH (fig.5.c) augmente car le panneau photovoltaïque débite directement sur le bus AC.

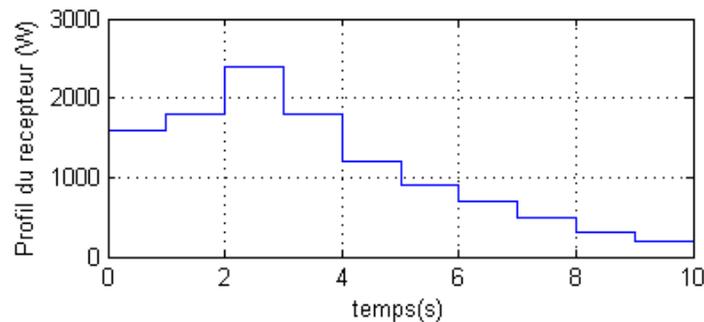
### I.3. 2. Fonctionnement de nuit en mode I

On considère qu'initialement la batterie est à sa charge maximale  $C_{bat\ max}$  et que la vitesse du vent admet le profil de la figure I.6.a. Il est à noter que ce profil admet une vitesse moyenne nettement supérieure à celle envisagée le jour car le vent est généralement plus puissant la nuit que le jour. De plus, le profil de la puissance active consommée par le récepteur (la consommation de l'abonné) est indiquée à la figure I.6.b. Nous considérons que durant la nuit l'abonné consomme une puissance dont la pointe peut atteindre la valeur maximale installée.

- **Résultats de simulation du fonctionnement de nuit en mode 1**



(a) profil du vent durant la nuit

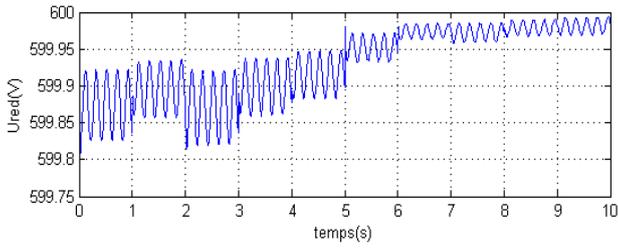


(b) profil du récepteur durant la nuit

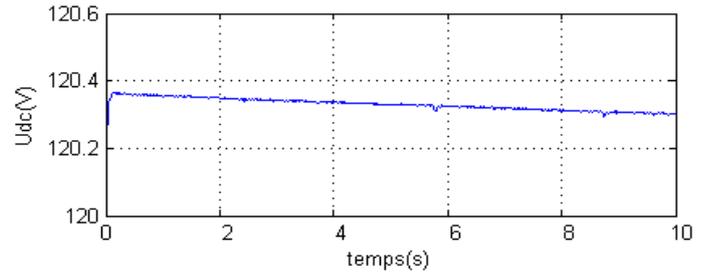
*Fig . I.6 Les profils du vent et de la charge durant la nuit*

# Chapitre I

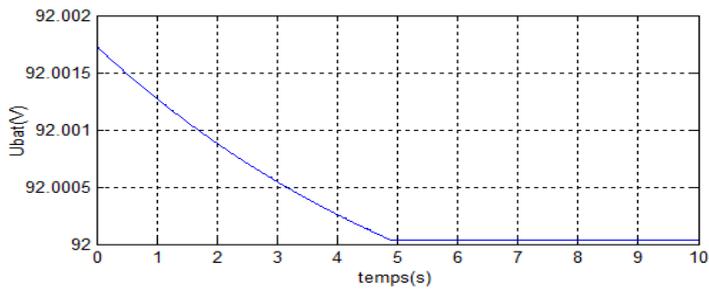
## Commande du système hybride global



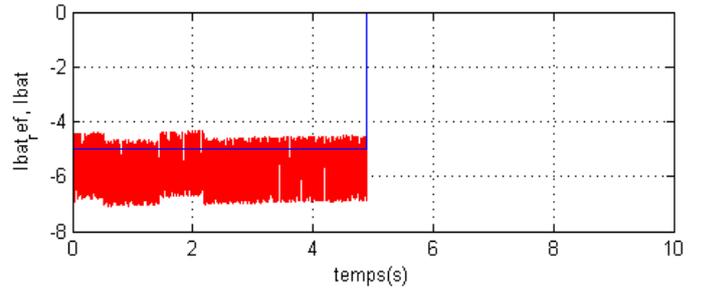
a) tension aux bornes du redresseur



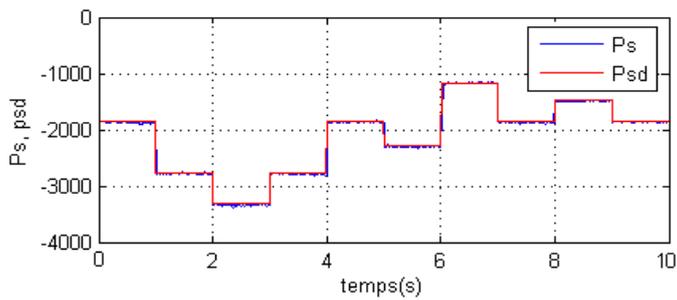
(b) Tension du bus continu



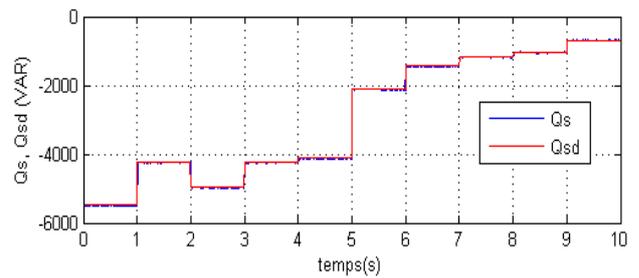
(c) Tension aux bornes de la batterie



(d) courant dans la batterie et sa référence



(e) Puissance active statorique

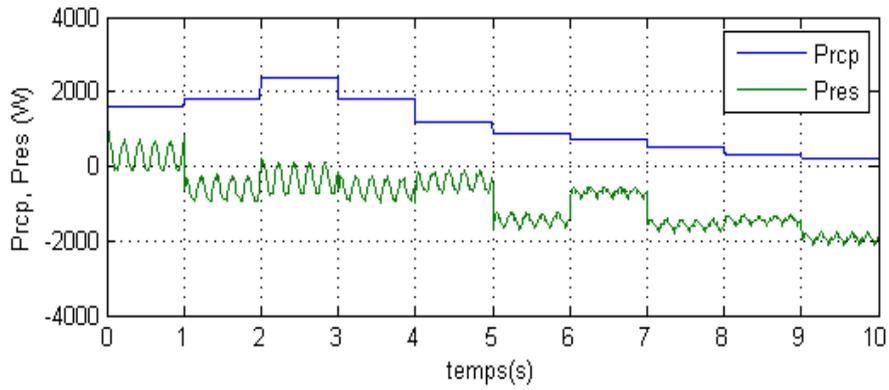


(f) Puissance réactive statorique

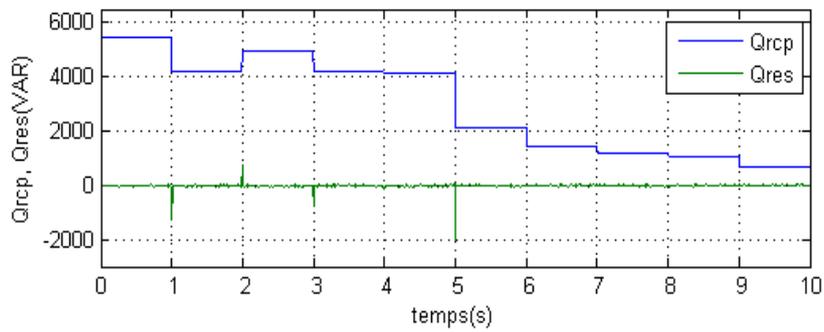
**Fig. I.7 Réglages des tensions et puissances du système hybride**

# Chapitre I

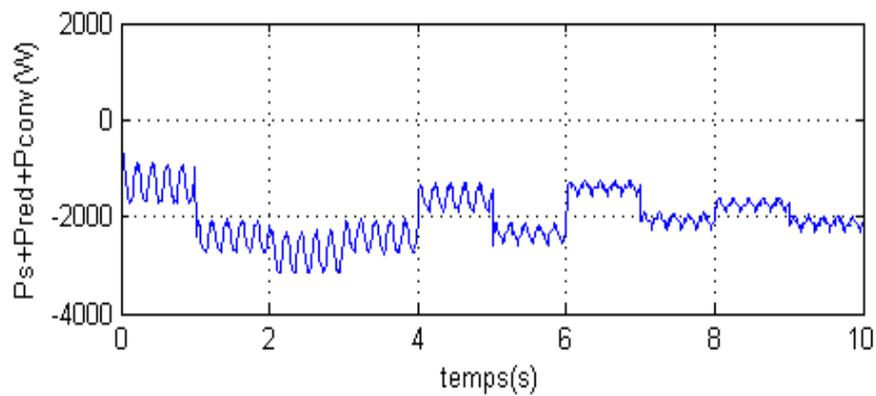
## Commande du système hybride global



(a) Puissance active demandée par le récepteur et Puissance fournie au réseau



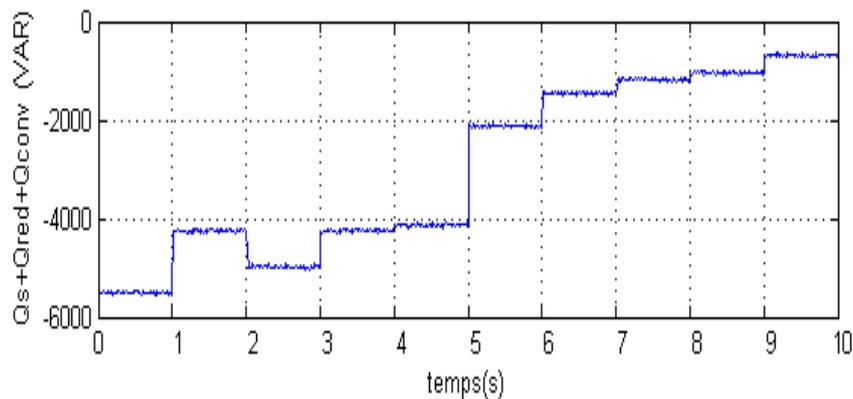
(b) La puissance réactive du récepteur et la puissance réactive du réseau



(c) les puissances actives fournies au réseau

# Chapitre I

## Commande du système hybride global



(d) les puissances réactives fournies au réseau

**Fig.1.8 : Bilan des puissances au niveau du bus AC**

### Interprétation des résultats

En fonctionnement de nuit en mode I, la batterie est en état de décharge et son courant de référence  $I_{bat\_ref}$  correspond à :

$$I_{bat\_ref} = P_{bat\_ref} / U_{dc}$$

La puissance  $P_{bat\_ref}$  est relative à la puissance moyenne de débit de la batterie pour qu'elle puisse atteindre son état de charge minimal  $C_{bat\_min}$  dans un intervalle de temps de 3h (c.à.d. entre 19h et 22h).

Pour les mêmes raisons évoquées au point précédent, le facteur de puissance doit être unitaire au PCC au réseau électrique. Par conséquent les références des puissances réactives sont imposées comme suit :

$$Q_{s\_ref} = -Q_{rcp};$$

$$Q_{red\_ref} = 0;$$

$$Q_{conv\_ref} = 0;$$

Dans les conditions citées plus haut et pour les profils du vent, de la charge et des puissances actives et réactives envisagés, nous avons simulé le fonctionnement global du système hybride. Les résultats de la simulation ont été obtenus dans le cas où les gains des différents régulateurs sont maintenus

Ces résultats sont présentés aux figures I.7, I.8 et leurs analyse est donnée ci-dessous.

Le courant de la batterie  $I_{bat}$  (fig.7.d) est réglé, avec une faible erreur, à sa valeur de référence représentée par le courant  $I_{bat\_ref}$  (fig.7.d).

La tension du bus continu  $U_{dc}$  varie faiblement sous l'effet de la présence des courants  $I_{bat}$  et  $I_{red}$ . En effet, l'erreur maximale de réglage est de l'ordre de 2% (fig.7.b).

# Chapitre I

## Commande du système hybride global

Les figures I.7.e & I.7.f montrent que la puissance active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  au stator de la MADA sont régulées chacune à sa valeur de référence avec une précision satisfaisante en régime statique.

La tension du bus continu  $U_{red}$  est maintenue à sa valeur de référence (600V) malgré la circulation de la puissance de glissement entre le rotor de la MADA et le bus continu  $U_{red}$  (fig.I.7.a).

En effectuant le bilan des puissances au niveau du bus AC, nous pouvons déterminer l'état de puissance de l'installation par rapport au réseau électrique c'est-à-dire au PCC du réseau. En effet, la puissance réactive  $Q_s$  (fig.I 7.f) produite au stator par la MADA suit sa référence imposée comme étant  $-Q_{rcp}$ . La somme des puissances réactives  $Q_{sh}$  produites par l'installation (fig.I.8.d) compense pratiquement la puissance exigée par le récepteur. En effet, la puissance réactive  $Q_{res}$  au PCC avec le réseau (fig.I.8.b) est pratiquement nulle sauf aux instants relatifs aux sauts du profil de la puissance réactive.

Tenant compte du profil de la puissance active  $P_{sh}$  produite par le SH (fig.I.8.c) et de celui de la puissance active  $P_{rcp}$  du récepteur, un surplus de puissance est obtenu et est renvoyé au le réseau puisque la puissance au point PCC du réseau  $P_{res}$  est négative (renvoi de la puissance au réseau électrique) (fig.I.8.a).

A l'instant  $t=5s$  la tension aux bornes de la batterie atteint sa valeur minimale (fig.I.7. c).

La batterie est donc complètement déchargée ( $C_{bat} = C_{bat,min}$ ) et nous basculons au mode II où la batterie est débranchée. Etant donné que la puissance demandée par le récepteur est faible, un surplus de puissance est obtenu et est renvoyé sur le réseau en effet la puissance  $P_{res}$  est négative (fig.8.a).

### I.4 Conclusion

L'étude effectuée dans ce chapitre montre que les systèmes hybrides éoliens photovoltaïques munis d'un système de stockage, sont des systèmes capables de fournir l'électricité au réseau.

De jour, la batterie se charge à partir du panneau photovoltaïque, son courant suit sa référence qui est le courant de sortie du hacheur boost, De nuit, elle se décharge à un débit constant.

Les tensions au niveau des bus continus sont maintenues à leurs valeurs de référence.

A travers les simulations, que nous avons effectuées, nous constatons que les puissances actives et réactives statoriques suivent leurs références, et , la puissance extraite du panneau photovoltaïque est maximale.

# Chapitre I

---

## Commande du système hybride global

La puissance produite donc par le système hybride satisfait la demande de la charge et le surplus est renvoyé au réseau. Ceci témoigne que le Système hybride a un comportement bénéfique face aux changements climatiques et à la variation de la charge.

---

---

---

## *Conclusion générale*

---

---

## Conclusion générale

---

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent, l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de production d'électricité, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne) et équipé d'un système de stockage par des batteries d'accumulateurs.

Arrivés au terme de ce projet et avant d'en évoquer les perspectives, nous proposons de faire un bilan rapide des principaux résultats obtenus, à travers le résumé du contenu des chapitres qui ont été développés.

En premier, nous avons présenté les connaissances de base relatives aux énergies renouvelables, plus particulièrement éoliennes et photovoltaïques et avons rappelé que l'Algérie dispose d'un potentiel important dans ce secteur. Après avoir passé en revue quelques systèmes hybrides, nous avons fait le choix d'une structure qui soit appropriée à un petit producteur abonné du réseau électrique.

Pour atteindre les objectifs astreints à ce projet, il était nécessaire de passer par l'étape de modélisation de chaque dispositif du système hybride. Ainsi, nous avons effectué tour à tour la représentation mathématique de l'aérogénérateur et de son alimentation par convertisseur AC-DC-AC, de la chaîne photovoltaïque et enfin du système de stockage par batterie d'accumulateurs. Bien sûr que les modèles établis intègrent les paramètres métrologiques (température, ensoleillement, vitesse du vent) influant sur la production de l'électricité éolienne et photovoltaïque.

Une bonne exploitation du système hybride exige une sûreté de fonctionnement, une bonne durée de vie et surtout une optimisation de l'énergie produite. Ces objectifs peuvent être atteints entièrement ou partiellement par une commande appropriée de chaque dispositif du système. En effet, l'optimisation de l'énergie éolienne est obtenue en déterminant la référence de la puissance à extraire par un algorithme du type 'MPPT' pour commander la MADA. La synthèse de la commande de cette dernière a été effectuée en appliquant deux méthodes : celle basée sur le critère de stabilité de Lyapunov et celle des modes glissants. De même, la maximisation de l'énergie produite par le Gpv a nécessité le recours à la MPTT du type 'perturber observer' pour piloter le hacheur boost intercalé entre le bus continu et le Gpv.

Nous avons également proposé une commande de la charge et la décharge de la batterie à travers un hacheur réversible de courant placé entre celle-ci et le bus continu. Ce dispositif doit pouvoir assurer une durée de vie satisfaisante de la batterie.

# Conclusion générale

---

Un bon fonctionnement du convertisseur AC-DC-AC qui est une interface entre le rotor de la MADA et le réseau AC nécessite un réglage de la tension du bus continu. Là aussi, nous avons proposé un réglage PI avec découplage de la tension du bus continu.

Pour valider les méthodes proposées, nous avons simulé numériquement le fonctionnement de chaque dispositif en tenant compte des conditions inhérentes à son exploitation. Ainsi, nous avons pu vérifier que les méthodes proposées permettent effectivement de réaliser les objectifs astreints.

Le but intime de notre travail est l'exploitation du système hybride par une gestion rationnelle des ressources disponibles. En effet, dans le cadre de la structure proposée à l'étude et des objectifs du petit producteur et abonné au réseau électrique, nous avons dégagé un organigramme pour une gestion rigoureuse de ce système. Ensuite, nous avons simulé le fonctionnement de ce système dans les situations les plus importantes :

- fonctionnement de jour et charge de la batterie à partir du Gpv ;
- fonctionnement de nuit et décharge de la batterie aux heures de forte demande.

Ces situations ont montré que le petit producteur a effectivement dégagé un surplus d'énergie fourni au réseau électrique tout en s'astreignant aux exigences du gestionnaire du réseau électrique. De plus, nous avons constaté qu'effectivement, un système hybride équipé d'un système de stockage permet une bonne flexibilité dans la gestion de l'énergie.

La filière concernant les systèmes hybrides d'exploitation des énergies renouvelables est relativement neuve sur le plan mondial. Son champ d'application est très vaste et nécessite l'apport de tous les spécialistes travaillant indépendamment sur les différentes parties du système.

Les résultats de travail présentés dans ce mémoire permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Parvenir à valider les résultats théoriques par des résultats expérimentaux
- Optimisation du système hybride afin de réduire le coût de l'installation
- Tenir compte, lors de la modélisation, de l'influence des perturbations du réseau sur le système
- Utilisation des techniques intelligentes de poursuite des points de puissance maximale: réseaux de neurones, logique floue...

### *Références bibliographiques*

[1] BENLAHRACHE Mohamed, SADOUD Sofiane, Commandes non-linéaires et adaptatives d'une éolienne basée sur une MADA, Projet de fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011

[2] DEKKICHE Abdelillah, Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge, Mémoire pour l'obtention de la Maîtrise en Génie de la Production Automatisée, Ecole Supérieure de Technologie, Montréal, 2008

[3] NASA Surface meteorology and Solar Energy: [www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/](http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/) RETScreen

RETScreen Data (Mars 2013)

[4] [www.mathwork.com](http://www.mathwork.com)

[5] Olivier GERGAUD , Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur-thèse de doctorat-Ecole Normale Supérieure de Cachan-2002

[6] BELAOUDMOU Oussama, BAHLOUL Abdelkrim, Etude et Commande d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau ,mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur et du diplôme de Master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2012

[7] FELLAH Boumediene, Système hybride photovoltaïque -éolien de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, TLEMEN,2012

[8] Bouharchouche Abderrezzaq,Bouabdallah Ahmed Nasrallah, Etude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne, Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2010

[9] Benamira Brahim, Behloul Asma, Commande non-linéaire de la puissance optimale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA couplée au réseau électrique, Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état et de master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2012

[10] J. Bosche , A.Kebairi et A. El Hajjaji ,Commande non-linéaire d'une grande éolienne-Laboratoire : Modélisation, information et systèmes (MIS),Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France , 2009

## *Références bibliographiques*

---

- [11] Pragya Nema, R.K. Nema, Saroj Rangnekar , A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review, Maulana Azad National Institute of Technology, India, 2009
- [12] D. Rekioua, Z. Roumila , T. Rekioua ,Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel , Université A. Mira, Bejaia,Algérie, 2008
- [13] Tahar Mehdi ,DESERTEC : Energies renouvelables : L'Algérie ne veut pas être en reste ,LCE Algérie,2011
- [14] M'hamed Houaoura,Energies nouvelles: Le Sahara pourrait alimenter toute l'Europe, Journal El Watan,2010
- [15] Tahar A.O. l'Algérie exportera de l'électricité vers l'Allemagne, La Voix de L'Oranie ,2011
- [16] Site officiel du Ministère de l'Energie et des Mines : [www.mem-algeria.org](http://www.mem-algeria.org)
- [17] Dr Nachida Kasbadji Merzouk, Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?-Centre de Développement des Energies Renouvelables -2008
- [18]L'observatoire des énergies renouvelables,France: [www.energies-renouvelables.org/](http://www.energies-renouvelables.org/)
- [19] <http://electronique1.blogspot.com>
- [20] C.F. Lu, C.C. Liu, and C.J. Wu, dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability , IEE proceedings, generation, transmission an distribution, volume 142(4) IEE Stevenage, Herts, UK, July 1995
- [21] FERRAI AHMED , Dimensionnement des infrastructures utilisant diverses sources énergétiques renouvelables potentielles pour l'alimentation électrique d'un village, Mémoire de magister,Ecole Nationale Polytechnique,Alger, 2008
- [22] Zakaria ZIADI , Commande Hybride d'une Maison à Energie Positive, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique,Alger,2010
- [23] HELALI Kamelia, modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, mémoire de magistère en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique,Alger, 2012
- [24] DJOUDI Abdelhak, Commandes Non Linéaires d'une Eolienne à base d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pilotée Par un Convertisseur Matriciel, Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique,Alger, 2010
- [25]Calcul des capacité des batteries : [www.bannerbatteries.com](http://www.bannerbatteries.com)

## *Références bibliographiques*

---

- [26] BISKER asma, mériem CHIRI, Commande d'un Système Photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau , Ecole Nationale Polytechnique , Alger, 2012
- [27] Giovanni petrone, Giovanni Spagnuolo, Solar power conversion, Univertà di Salerno, Salerno, Italie 2011
- [28] D. Rovas ,D. Kolokotsa, E. Kosmatopoulos, K. Kalaitzakis, A roadmap towards intelligent net zero- and positive- energy buildings, Technical University of Crete, Grèce ,2010
- [29] S.R. Vosen, J.O. Keller ,Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies, Sandia National Laboratories, California, USA
- [30] O. GERGAUD, G. ROBIN, B. MULTON and H. BEN AHMED. "Energy Modeling of a Lead-Acid Battery within Hybrid Wind /Photovoltaic Systems". EPE, Toulouse, France, 2003.
- [31] L. CASTANER and S. SILVESTRE., Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice .England, Wiley, 2002, pp.41-103.
- [32] Nazila Kahina Hannachi-Belkadi, Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie, Thèse de Doctorat, Université Paris Est, France, 2008.

### Annexe 2

#### - Paramètres de la cellule photovoltaïque utilisée

- Surface de la cellule :  $126.6 \text{ cm}^2$
- Courant de court-circuit :  $I_{sc} = 4.3423 \text{ A}$
- Courant de saturation :  $I_0 = 126.6 \cdot 10^{-11} \text{ A}$
- La résistance série :  $R_s = 0.01 \Omega$
- Coefficient d'idéalité  $n = 1$  [30]

Dans les conditions normales de température et d'ensoleillement :  $T = 25^\circ\text{C}$  et  $G = 1000 \text{ W/m}^2$

#### -Paramètres de la MADA :

Valeurs nominales : 4 kW, 220/380V-50Hz , 15/8.6A , 1440 tours /min , p=2

- Résistance statorique :  $R_s = 1.2 \Omega$
- Résistance rotorique :  $R_r = 1.8 \Omega$
- Inductance mutuelle :  $M = 0.15 \text{ H}$
- Inductance cyclique statorique :  $L_s = 0.1554 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique :  $L_r = 0.1568 \text{ H}$
- Inertie de la MADA :  $J_g = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Coefficient de frottement :  $f = 0.001 \text{ N.m.s/rad}$

#### -Paramètres de la cascade éolienne :

- Les tensions du réseau sont équilibrées d'amplitude 220 V
- La ligne est caractérisée par une résistance  $R = 0.25$  et une inductance  $L = 1 \text{ mH}$
- La tension référence du redresseur :  $U_{red\_ref} = 600 \text{ V}$
- La largeur de la bande d'hystérésis est  $\Delta i = 0.01 \text{ A}$
- La capacité du filtrage est  $C = 1 \text{ mF}$
- Le gain du multiplicateur de la turbine : 8.23

#### -caractéristiques de la turbine

- Nombre de pâles : 03
- Le rayon de la turbine : 2.4 m
- La densité de l'air :  $1.225 \text{ kg/m}^3$
- $\lambda_{opt} = 8.27$
- $Cp_{opt} = 0.4879$

#### -Les gains des régulateurs PI

Régulateur PI de la tension  $U_{red}$  du CCR

$$K_p = 22.5$$

$$K_i = 3.34$$

## Annexe 02

---

Régulateur PI du courant d'axe (d) pour le réglage en cascade de la tension Ured du CCR :

$$K_{p1}=1500$$

$$K_{i1}=5$$

Régulateur PI du courant d'axe (q) pour le réglage en cascade de la tension Ured du CCR :

$$K_{p2}=1500$$

$$K_{i2}=5$$

Régulateur PI de la tension Ucd du CONV :

$$K_p=22.5$$

$$K_I=3.34$$

Régulateur PI du courant d'axe (d) pour le réglage en cascade de la tension Udc du CONV :

$$K_{p1}=150$$

$$K_{i1}=7.5$$

Régulateur PI du courant d'axe (q) pour le réglage en cascade de la tension Udc du CONV

$$K_{p2}=300$$

$$K_{i2}=15$$

Régulateur Non linéaire de la puissance active de la MADA

- $K_1=1.25$   
 $K_{s1}=0.5$   
 $K_{i1}=0.01$
- $\lambda_1 = 26$

Régulateur Non linéaire de la puissance réactive de la MADA

- $K_2=1.25$   
 $K_{s2}=0.5$   
 $K_{i2}=0.01$
- $\lambda_2 = 26$