

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



Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# *Mémoire de fin de cycle* *en vue de l'obtention du diplôme de Master*

Spécialité : Electrotechnique  
Option : Energies Renouvelables

## *Thème*

*Optimisation et gestion d'énergie d'un  
système hybride  
(photovoltaïque-éolien)*

*Réalisé par :*

*MAMMERI Kahina*

*LAHCENE Hanane*

*Promoteur :*

*M<sup>r</sup> K. IDJDARENE*

Année universitaire 2012-2013

## **Remerciements**

Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guidés vers le droit chemin, et de nous avoir aidées tout au long de nos années d'étude.

On tient à remercier sincèrement Monsieur K. IDJDARENE, Maître de Conférences à l'université de Béjaia (Algérie), qui, en tant que directeur de mémoire et encadreur, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour l'inspiration, l'aide, le temps et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos remerciements s'étendent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pendant toute la durée de notre parcours éducatif.

# ***Dédicaces***

*A celui à qui je dois tout ;*

*A la mémoire de ma grand-mère ;*

*A mes grands parents ;*

*A mes très chers parents, qui se sont sacrifié pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leurs soutient depuis toujours, que le bon dieu les garde et les protège.*

*A mon marie ;*

*A tous mes frères et sœur :*

*A toute ma famille;*

*A toute mes amis et amies ;*

*A toutes personnes qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.*

***\*Hanane\****

## Dédicaces

A celui à qui je dois tout ;

A mes grands parents ;

A mon père, ma mère, tous les mots du monde  
ne sauraient exprimer l'immense amour que  
je vous porte, ni la profonde gratitude que  
je vous témoigne, vous résumez si bien le  
mot parents qu'il serait superflu d'y

ajouter quelque chose ;

A mes frères et sœurs

A toute ma grande famille

A tout mes amies et amis

**K. MAMMERI**

# **Sommaire**

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Etat de l'art sur les d'énergies renouvelables</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Généralités sur les systèmes éoliens.....	3
I.2.1. Les différents types d'éoliennes.....	3
I.2.1.1. Eoliennes à axe vertical.....	4
I.2.1.2. Eoliennes à axe horizontal.....	6
I.2.2. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal .....	7
I.2.3. Principe de fonctionnement.....	8
I.2.4. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	8
I.2.5. Technologie d'éoliennes.....	10
I.2.5.1. Les éolienne à vitesse fixe.....	10
I.2.5.2. Les éolienne à vitesse variable.....	10
I.2.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
I.3. Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....	11
I.3.1. La cellule photovoltaïque.....	12
I.3.1.1. La conversion de l'énergie solaire.....	12
I.3.1.2. La diode photovoltaïque.....	12
I.3.2. Association de cellules photovoltaïques .....	13
I.3.3. Utilisation optimale d'une cellule.....	16
I.3.4. Les différente filière PV.....	16
I.3.5. Les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques.....	17
I.4. Les méthodes de recherche du point de puissance maximal.....	18
I.4.1. Les MPPT qui s'appliquent pour les systèmes éoliens.....	18
I.4.1.1. Commande MPPT avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure .....	18
I.4.1.2. Méthode de gradient.....	19
I.4.2. Les MPPT qui s'appliquent pour les systèmes photovoltaïques.....	21
I.4.2.1. Méthode de tension de circuit ouvert du générateur PV.....	21
I.4.2.2. Méthode de conductance incrémentielle.....	21
I.4.2.3. Méthode de perturbation et d'observation ( <i>P&amp;O</i> ).....	22
I.5. Energie hydraulique –Hydroélectricité.....	23

I.5.1. La petite centrale hydroélectrique .....	24
I.6. L'énergie de la biomasse .....	24
I.7. L'énergie de la géothermie.....	24
I.8. Systèmes de stockage .....	26
I.8.1. Stockage à long terme.....	26
I.8.1.1. Batteries .....	26
I.8.1.2. Le stockage par pile à combustible à hydrogène.....	27
I.8.2. Stockage à court terme.....	27
I.8.2.1. Volants d'inertie.....	27
I.9. Généralité sur le système hybride.....	28
I.9.1. Définition.....	28
I.9.2. Les différentes structures des systèmes hybrides.....	28
I.9.2.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle.....	28
I.9.2.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	30
I.9.3. La complémentarité des ressources éoliennes et solaires .....	31
I.9.4. Avantage et inconvénient d'un système hybride.....	32
I.10. Conclusion.....	32

## **Chapitre II : Modélisation des composants du système hybride**

II.1. Introduction.....	33
II.2. Outils de modélisation.....	33
II.3. La chaîne de production d'énergie éolienne.....	33
II.3.1. Modèle du vent .....	33
II.3.2. Modèle de la turbine éolienne.....	34
II.3.3. Modèle du multiplicateur.....	35
II.3.4. Modèle de l'arbre de transmission mécanique de la machine asynchrone.....	36
II.3.5. Modèle mathématique de la génératrice asynchrone.....	36
II.3.5.1. Hypothèses simplificatrices.....	36
II.3.5.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone dans le repère (a.b.c)....	37
II.3.5.3. Transformation de Park et équations de la machine asynchrone selon les axes d-q.....	39
II.3.6. Modélisation de redresseur MLI.....	41
II.4. La chaîne de production photovoltaïque.....	42
II.4.1. Modèle d'un panneau photovoltaïque.....	42

II.4.2. Modèle d'un hacheur survolteur (boost).....	44
II.5. Modèle du bus continu.....	45
II.6. Modèle de la batterie.....	46
II.7. Modèle du hacheur dévolteur(Buck).....	47
II.7.1. Asservissement de la tension.....	48
II.8. Conclusion.....	48

### **Chapitre III : Simulation des systèmes éolien et PV avec stockage**

III.1. Introduction.....	49
III.2. Présentation des systèmes hybrides et validation du changement d'échelle.....	49
III.2.1. Changement d'échelle de temps.....	49
III.2.2. Présentation du modèle du système éolien avec stockage.....	52
III.2.2.1. La commande vectorielle utilisée.....	52
III.2.2.2. La commande MPPT classique appliquée à l'éolienne.....	54
III.2.2.3. Résultats de simulation.....	54
III.2.3. Présentation du modèle du système photovoltaïque avec stockage.....	60
III.2.3.1. La commande P&O utilisée pour piloter le convertisseur DC/DC boost ...	61
III.2.3.2. Résultats de simulation du système photovoltaïque sans MPPT.....	61
III.2.3.3. Résultats de simulation du système photovoltaïque avec stockage.....	64
III.3. Conclusion.....	68

### **Chapitre IV : Gestion de l'énergie du système hybride (photovoltaïque-éolien) avec stockage**

IV.1. Introduction.....	69
IV.2. Organigramme de gestion d'énergie.....	70
IV.3. Simulation du système globale.....	70
IV.3.1. Interprétation des résultats obtenus par la simulation.....	71
IV.4. Conclusion.....	78
Conclusion générale et perspectives.....	79
Références bibliographiques.....	81
Annexes .....	86



# Liste des figures

**Liste des figures :**

Figure I.1 :  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différentes turbines.

Figure I.2 : Effet du vent sur un corps creux.

Figure I.3 : Le rotor de Savonius.

Figure I.4 : Principe de l'incidence variable.

Figure I.5 : Éolienne de Darrieus.

Figure I.6 : Éoliennes à axe horizontal.

Figure I.7: Types d'éoliennes à axe horizontal.

Figure I.8 : Éléments constituant une éolienne.

Figure I.9 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Figure I.10 : Caractéristique puissance/vitesse d'une éolienne.

Figure I.11: Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.12 : Caractéristique courant/tension.

Figure I.14: Caractéristique de groupement série de cellules photovoltaïques identiques.

Figure I.15 : Caractéristique de groupement parallèle de cellules photovoltaïques identiques.

Figure I.16 : Caractéristique d'un générateur à  $n_p$ ,  $n_s$  cellules en parallèle et en série identiques.

Figure I.17 : Câblage série/ parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protections.

Figure I.18: Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

Figure I.19 : Organigramme de MPPT par la méthode de gradient.

Figure I.20 : Algorithme de la méthode d'incrément de conductance.

Figure I.21 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

Figure I.22 : Principe de la pile à combustible.

Figure I.23: Structure du système de stockage inertiel.

Figure I.24: Transfert de l'énergie dans un SISE.

Figure I.25 : Schémas de principe d'un système hybride solaire-diesel.

Figure I.26: Système hybride Éolien-Photovoltaïque-Diesel.

Figure I.27 : Schéma synoptique du système hybride photovoltaïque/éolien/stockage.

Figure II.1 : Schéma de principe d'un système hybride.

Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne.

Figure II.3 : Les différents systèmes d'axes utilisés.

Figure II.4 : Schéma du redresseur MLI.

Figure II.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Figure II.6: Schéma électrique d'un hacheur boost.

Figure II.7 : Schéma d'un bus continu.

Figure II.8 : Modèle R-C de la batterie.

Figure II.9 : Circuit équivalent de base du hacheur dévolteur.

Figure II.10 : Schéma fonctionnel de la boucle de tension.

Figure III.1 : Mise en œuvre du modèle R-C sous Matlab-Simulink.

Figure III.2 : Tension de la batterie sans changement d'échelle (pas variable).

Figure III.3 : Etat de charge de la batterie sans changement d'échelle (pas variable).

Figure III.4 : Tension de la batterie dans le cas d'un changement d'échelle  
(pas de simulation de  $5 \cdot 10^{-5}$  s).

Figure III.5 : Etat de charge de la batterie dans le cas d'un changement d'échelle  
(pas de simulation de  $5 \cdot 10^{-5}$  s).

Figure III.6 : Schéma Matlab/Simulink du système éolien avec stockage.

Figure III.7 : Profil de la vitesse du vent.

Figure III.8 : Coefficient de puissance  $C_p$

Figure III.9 : Vitesse relative  $\lambda$ .

Figure III.10 : Flux rotorique.

Figure III.11 : Couple électromagnétique.

Figure III.12 : Courants statoriques  $i_{sdq}$ .

Figure III.13 : Vitesse mécanique de la machine.

Figure III.14 : Courants statoriques  $i_{sabc}$  sans zoom.

Figure III.15 : Courants statoriques  $i_{sabc}$  avec zoom.

Figure III.16 : Puissance débitée par l'éolienne.

Figure III.17 : Courant débité par l'éolienne.

Figure III.18 : Tension aux bornes de la batterie.

Figure III.19 : Etat de charge de la batterie.

Figure III. 20 : Courant débitant sur la capacité du bus continu.

Figure III.21 : Profil de la charge.

Figure III.22 : Courant débité sur la charge.

Figure III.23 : Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque avec stockage.

Figure III.24 : Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements.

Figure III.25 : Caractéristique puissance-tension pour différents éclairagements.

Figure III.26 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures.

Figure III.27 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures

Figure III.28 : Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

Figure III.29 : Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constant ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).

Figure III.30 : Profil de l'éclairement.

Figure III.31 : Courant débité par le générateur PV.

Figure III.32 : Puissance photovoltaïque récupérée.

Figure III.33 : Tension aux bornes de la batterie.

Figure III.34 : Etat de charge de la batterie.

Figure III.35 : Profil de la puissance demandée par la charge.

Figure III.36 : Courant débité sur la charge.

Figure III.36 : Tension de sortie du hacheur buck.

Figure IV.1 : Schéma Matlab/Simulink du système complet.

Figure IV.2: Organigramme de gestion d'énergie dans le système global.

Figure IV.3 : Puissance fournie par le système éolien.

Figure IV.4 : Courant fournie par le système éolien.

Figure IV.5 : Flux rotorique.

Figure IV.6 : Couple électromagnétique.

Figure IV.7 : Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ .

Figure IV.8: Puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

Figure IV.9 : Courant fourni par le générateur photovoltaïque.

Figure IV.10 : Puissance demandée par la charge.

Figure IV.11 : Courant demandé par la charge.

Figure IV.12 : Courant de la batterie.

Figure IV.13 : Tension de la batterie.

Figure IV.14 : Etat de charge de la batterie (SOC).

Figure IV.15 : Courant à dissiper dans une charge dérivative.

Figure IV.16 : Tension aux bornes de la charge.

Figure IV.17 : Rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur buck.

Figure IV.18 : Allure des courants  $i_{hyb}$ ,  $i_{ch}$  et  $i_{bat}$ .

# **Nomenclature**

## Symboles

$C_p$	Coefficient de puissance ;
$f$	Coefficient de frottement visqueux [N.m.s/rd] ;
$i_{bat}$	Courant de la batterie [A];
$i_{ds}$	Courant statorique d'axe direct [A] ;
$i_{qs}$	Courant statorique d'axe quadratique [A] ;
$i_{dr}$	Courant rotorique d'axe direct [A] ;
$i_{qr}$	Courant rotorique d'axe quadratique [A] ;
$i_{sabc}$	Courant des phases statoriques [A] ;
$i_{rabc}$	Courant des phases rotoriques [A] ;
$i_s$	Courant de délestage [A] ;
$i_c$	Courant traversant le condensateur [A] ;
$I_{cc}$	Courant de court-circuit [A] ;
$I_d$	Courant de diode [A] ;
$i_{dc}$	Courant à la sortie du redresseur [A] ;
$I_{opt}$	Courant optimal [A] ;
$I_{pcc}$	Courant de court-circuit d'un groupement parallèle de $n_p$ cellules [A] ;
$I_{pv}$	Le photocourant [A] ;
$I_{rsh}$	Le courant shunt [A] ;
$J$	L'inertie totale (éolienne et génératrice) [Kg.m <sup>2</sup> ] ;
$l_r$	L'inductance de fuite rotorique [H] ;
$l_s$	L'inductance de fuite statorique [H] ;
$M_s$	L'inductance mutuelle entre les phases statoriques [H] ;
$M_r$	L'inductance mutuelle entre les phases rotoriques [H] ;
$M_{sr}$	L'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique [H] ;
$M_0$	Maximum de la mutuelle inductance stator rotor quand leur axes coïncident [H] ;
$\Phi_{ds}$	Flux statorique d'axe direct [Wb] ;
$\Phi_{qs}$	Flux statorique d'axe quadratique [Wb] ;
$\Phi_{dr}$	Flux rotorique d'axe direct [Wb] ;
$\Phi_{qr}$	Flux rotorique d'axe quadratique [Wb] ;
$\Phi_{sabc}$	Flux des phases statoriques [Wb] ;
$\Phi_{rabc}$	Flux des phases rotoriques [Wb] ;
$n_p$	Nombre total de cellules en parallèle ;

$n_s$	Nombre total de cellules en série ;
$p$	Nombre de paires de pôles ;
$P_v$	Puissance du vent [W] ;
$P_{aer}$	Puissance de la turbine éolienne [W] ;
$P_n$	Puissance nominal [W] ;
$P_{opt}$	Puissance optimal [W] ;
$R$	Le rayon de la turbine [m] ;
$R_r$	Résistance rotorique de la génératrice [ $\Omega$ ] ;
$R_s$	Résistance statorique de la génératrice [ $\Omega$ ] ;
$S$	Est la surface circulaire balayée par la turbine [ $m^2$ ] ;
$T_{em}$	Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m] ;
$T_t$	Couple de la turbine [N.m] ;
$T_r$	Constante de temps rotorique ;
$V_{bat}$	Tension aux bornes de la batterie [V] ;
$V_e$	Tension d'entrée du hacheur [V] ;
$V_{co}$	Tension en circuit ouvert [V] ;
$V_d$	Tension direct de conduction de la diode [V] ;
$V_{dc}$	Tension de bus continu (tension de sortie du redresseur) [V] ;
$V_v$	Vitesse de vent [m/s] ;
$V_{ref}$	Tension continue de référence [V] ;
$V_{ds}$	Tension statorique d'axe direct [V] ;
$V_{qs}$	Tension statorique d'axe quadratique [V] ;
$V_{dr}$	Tension rotorique d'axe direct [V] ;
$V_{qr}$	Tension rotorique d'axe quadratique [V] ;
$V_{sco}$	Tension en circuit ouvert d'un groupement série de $n_s$ cellules [V] ;
$V_v$	Vitesse du vent [m/s] ;
$W_c$	Watt crête [W] ;
$\alpha$	Rapport cyclique du hacheur ;
$\lambda$	Vitesse relative de l'éolienne [m/s] ;
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative optimale [m/s] ;
$\beta$	Angle d'orientation des pâles ;
$\Omega$	La vitesse mécanique de la génératrice [rd/s] ;
$\Omega_t$	La vitesse de rotation de la turbine [rd/s] ;
$\omega$	La pulsation mécanique [rd/s] ;

- $\rho$  Densité d'air [Kg/m<sup>3</sup>] ;
- $\theta_s$  L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase a du stator ;
- $\theta_r$  L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase a du rotor ;
- $\theta$  L'angle électrique entre l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique ;
- $\Theta$  La position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique ;

### **Abréviations**

- CS Convertisseur statique ;
- DC Direct courant ;
- D<sub>p</sub> Diode connectée en parallèle « diode bypass » ;
- D<sub>r</sub> Diode anti-retour ;
- G<sub>m</sub> Gain du multiplicateur de vitesse ;
- GE Génératrice électrique ;
- GPV Générateur photovoltaïque ;
- MAS Machine asynchrone ;
- MPPT Maximum Power Point Tracking ;
- P&O Méthode de perturbation et observation ;
- PPM Point de puissance maximale ;
- PV Panneau photovoltaïque ;
- SEH Système électrique hybride
- SHSER Système hybride à sources d'énergies renouvelables ;
- SISE Système inertiel de stockage d'énergie ;
- SOC ou EDC Etat de charge de la batterie ;

Les autres symboles et abréviations sont explicités dans le texte.



# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'électricité devient de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation ...etc.) et un facteur essentiel pour le développement économique.

L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique [Ghe 11]. Aujourd'hui, plus de 2.2 milliards d'êtres humains ne sont pas raccordés aux grands réseaux d'électricité (ce qui représente environ 44% de la population mondiale), pour la plus part situés dans les pays du tiers monde comme l'Algérie, où plus de 50% vivent encore sans électricité dont 95% d'entre eux vivent dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, de la présence des régions rudes et d'une faible densité de population. La consommation d'énergie dans le monde et dans notre pays ne cesse d'augmenter et provient principalement de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire. Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certains pays, se sont tournés vers la nouvelle forme d'énergie dite « renouvelable » faisant appel de façon directe ou indirecte à l'énergie solaire. Parmi celle-ci l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Ces énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout de façon durable, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. A cet effet ; Le générateur d'électricité d'origine renouvelable sélectionné pour notre étude est le système hybride (éolien – photovoltaïque) avec stockage.

La disponibilité intermittente des sources d'énergies renouvelables induit le concept de stockage d'électricité qui est très diversifiée.

Le rôle d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) avec stockage de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter une

puissance énergétique, mais de réaliser un développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent réanimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté **[Has 10]**.

Notre mémoire est structuré en quatre principaux chapitres en plus de l'introduction et de la conclusion générale.

Le premier chapitre expose les différentes sources d'énergies renouvelables existantes et quelque méthodes de recherche du point de puissance maximal; on a également présentée les différentes structures des systèmes hybrides en se focalisant pour notre travail sur le système hybride combinant les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque-éolien) avec des batteries de stockage.

Le deuxième chapitre concerne une présentation de la configuration choisie, ainsi que les modèles des composants du SEH dans le but d'analyser le comportement dynamique du système globale face aux variations climatique et celles de la charge.

Dans le troisième chapitre, Nous avons développé un modèle et une stratégie de commande pour chaque source d'énergie du système. Ces modèles permettront dans le chapitre qui suit de valider la stratégie de gestion de l'énergie tout en utilisant au mieux les éléments selon leurs performances.

Dans le dernier chapitre nous allons concevoir un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation, qui va nous permettre de superviser les flux d'énergie et de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes, et également protéger la charge dans le cas où la demande n'est pas satisfaite.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art sur les énergies renouvelables**

## **I.1. Introduction**

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement. Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité [Lop 06], [Ole 05]. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, le solaire PV, etc... Le solaire et l'éolien, font partie des énergies dont le taux de croissance est le plus élevé. Leur développement au niveau résidentiel et industriel est considérable [Lop 06].

En vue d'une meilleure maîtrise de ces énergies, les systèmes électriques hybrides présentent un atout intéressant. Ces systèmes permettent de diversifier les sources afin de bénéficier de chacune d'entre elles. Bien entendu, une stratégie de contrôle appropriée doit être mise en œuvre afin de gérer efficacement l'énergie [Pai 10].

## **I.2. Généralités sur les systèmes éoliens**

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provenant du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne [Has 10]. Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité [Poi 03].

Depuis une dizaine d'années, l'énergie éolienne maintient une croissance mondiale de 30% par an. En 2011 la puissance mondiale installée est de 200 GW [Ene 13]. Les perspectives sont tout aussi spectaculaires. L'EWEA estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040 [Cam 03].

### **I.2.1. Les différents types d'éoliennes**

Il existe deux familles de voilures selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice : les aérogénérateurs à axe vertical et à axe horizontal [Mek 04], [Bri 12]. Dans les deux cas, les aérogénérateurs (éoliennes) ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor qui entraîne un générateur, produisant ainsi de l'électricité [Ene 13].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pâles (entre 20 et 40), leurs coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pâles fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Elles sont caractérisées par un coefficient de puissance qui atteint des valeurs élevées et qui décroît lentement lorsque la vitesse augmente [Mek 04].

Le graphique de la figure (I.1) donne une vue sur le coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour différents types d'éoliennes [Bri 12] :

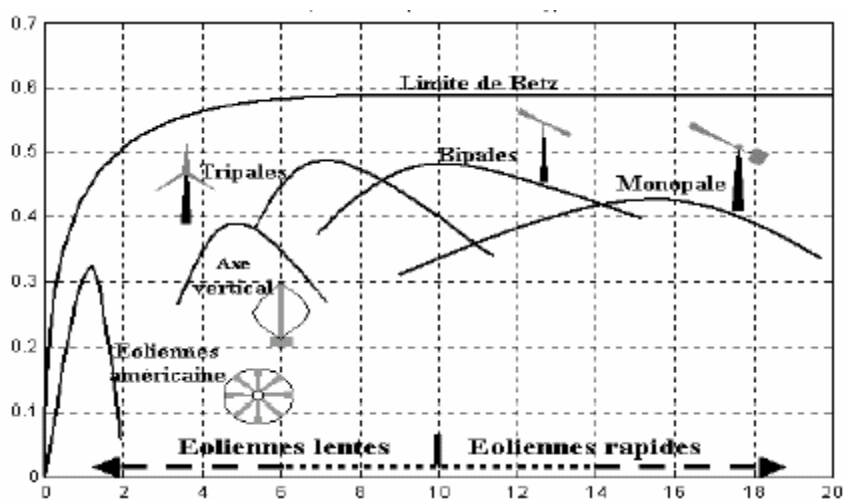


Figure I.1 :  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différentes turbines

### I.2.1.1. Eoliennes à axe vertical

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue [Mir 03]. Car elles sont moins performantes que celle à axe horizontal [Boy 06]. Deux principes différents sont utilisés pour ce type d'éoliennes, à savoir la traînée différentielle (Aérogénérateurs à rotor de Savonius) ou la variation cyclique d'incidence (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus).

#### ➤ La traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est le suivant: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure I.2). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique. L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius (Figure I.3). Le rotor de Savonius, étant très simple, présente un intérêt pour les pays très peu

industrialisés car il est facile à fabriquer. De plus, il démarre à de faibles vitesses de vent, de l'ordre de 2m/s [Mek 04].

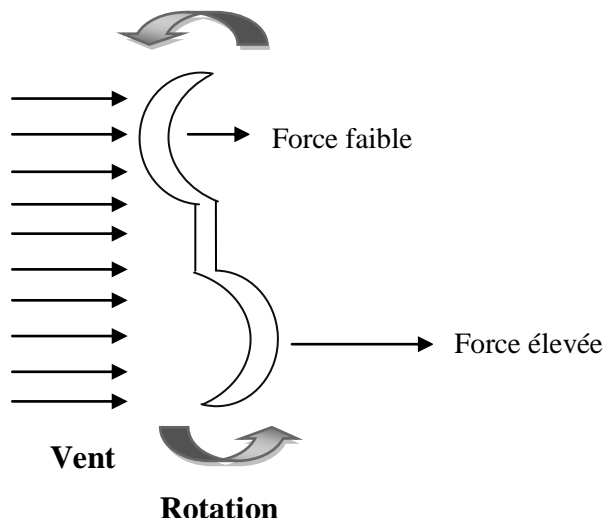


Figure I.2 : Effet du vent sur un corps creux

Figure I.3 : Le rotor de Savonius [Boy 06]

➤ Variation cyclique d'incidence (effet de portance)

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus, ont un fonctionnement basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées [Poi 03].

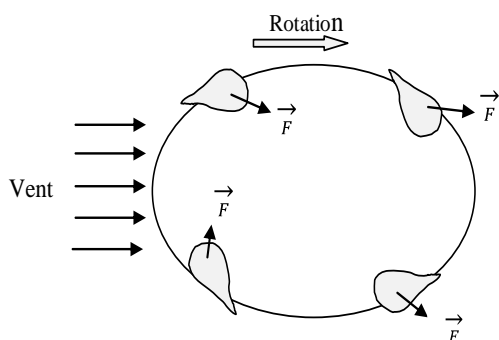


Figure I.4 : Principe de l'incidence variable



Figure I.5 : Eolienne de Darrieus [Boy 06]

### I.2.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent [Poi 03]. Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement [Mir 03]. Elles sont constituées de plusieurs pâles profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'un avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation des pâles, dont le nombre varie classiquement entre 1 et 3. Actuellement le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations et le bruit par rapport à un système bipâle ou monopâle et permet également d'améliorer le coefficient de puissance, cependant il existe un compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Avec un rendement aérodynamique supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, et un coût moins important, elles sont de loin les plus utilisées [Has 10], [Fer 09].



Figure I.6 : Eoliennes à axe horizontal

Il existe deux types de configuration d'éolienne à axe horizontal (Figure I.7) :

- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible et auto orientable. L'effet de masque est plus important dans ce type de configuration.
- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spécifique. La disposition turbine en amont est la plus utilisée pour les grandes puissances du fait que la stabilité est meilleure, et les efforts de manœuvre sont moins importants [Fer 09].



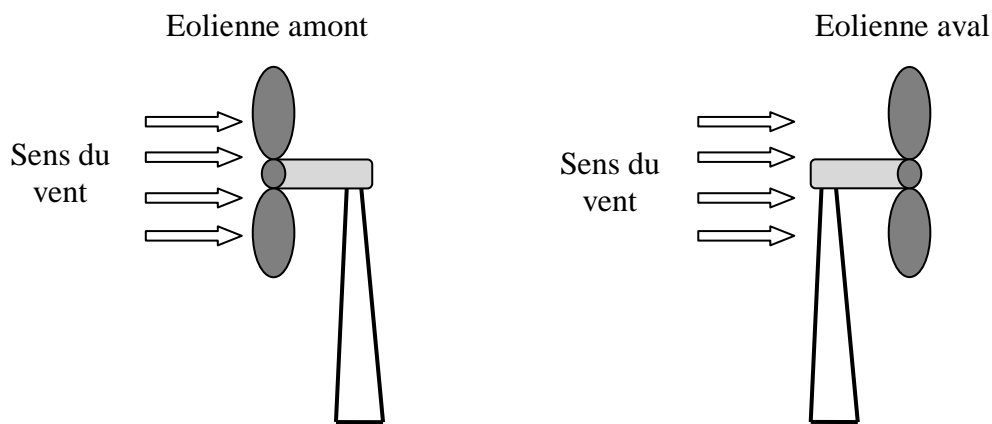


Figure I.7: Types d'éoliennes à axe horizontal

### I.2.2. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure (I.8) [Ghe 11]:

1. **Les pâles :** Permettent de capter l'énergie du vent et de la transmettre ensuite au rotor.
2. **La nacelle :** Regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.
3. **Le mât ou la tour :** C'est un tube en acier qui supporte le rotor. Il renferme également la liaison électrique. Il doit être le plus haut possible pour bénéficier au maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol, mais cela s'accompagne aussi de l'accroissement du coût de la structure.

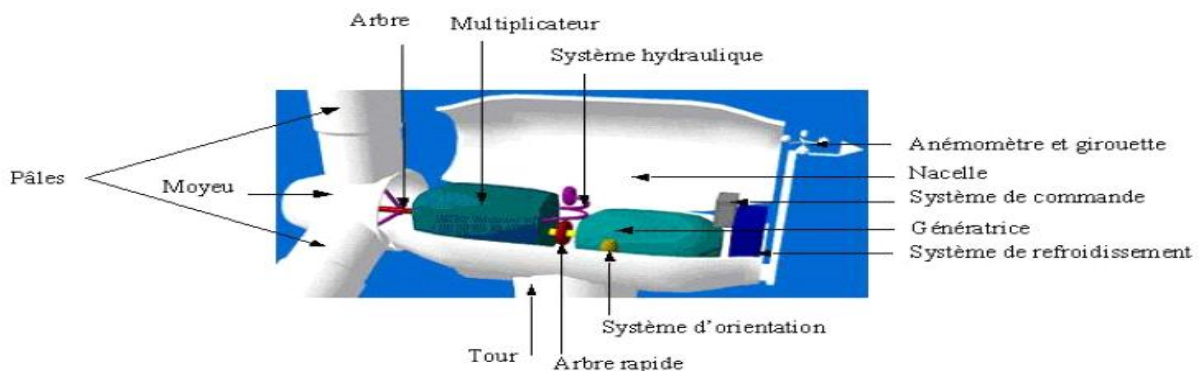
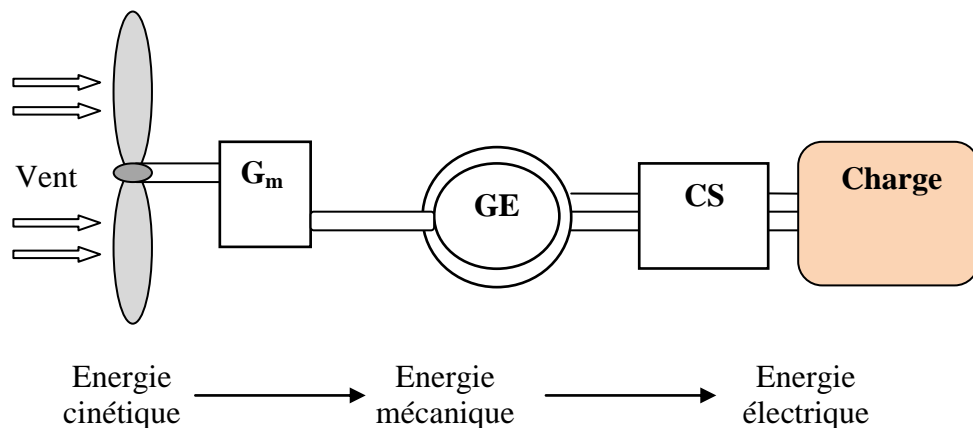


Figure I.8 : Eléments constituant une éolienne

### I.2.3. Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes:

- Au niveau des pâles (capteur d'énergie), qui extraient une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice électrique, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au convertisseur statique [Mir 05].
- Au niveau du convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge. Cette dernière peut être une résistance (chauffage électrique), un moteur, une pompe ou un réseau de distribution d'énergie électrique.

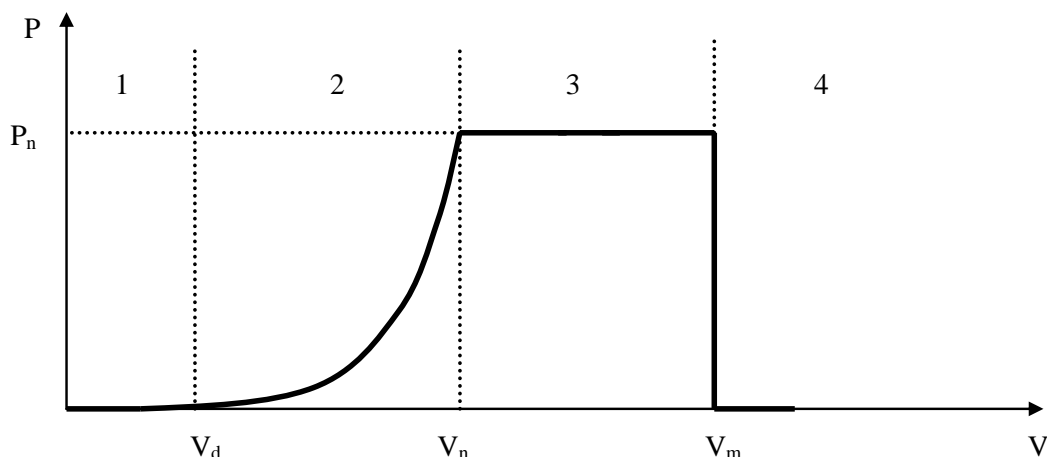


**G<sub>m</sub>** : Multiplicateur de vitesse ; **GE** : Génératrice électrique; **CS** : Convertisseur statique.

**Figure I.9** : Conversion de l'énergie cinétique du vent

#### I.2.4. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$  (Figure I.10) [Poi 03]. Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques, de sorte que la puissance récupérée ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle elle a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnant:  $V_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $V_m$  la vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.



**Figure I.10** : Caractéristique puissance/vitesse d'une éolienne [Ger 02]

Les vitesses  $V_d$ ,  $V_n$  et  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone 1, où  $P = 0$  (l'éolienne est à l'arrêt) ;
- La zone 2, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre est proportionnelle à la vitesse du vent  $V$  ;
- La zone 3, la puissance est maintenue constante ( $P = P_n$ ) quelque soit la vitesse du vent ;
- La zone 4, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie [Ger 02], [Bel 10], [Has 10], [Mir 05] ;

La plupart des turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique afin de limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

#### a- Système « pitch » ou « calage variable »

Ce système de régulation fait pivoter les pâles de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour qu'elles soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Autrement dit il faut varier l'angle de calage des pâles pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale (zone 3) [Arb 06], [Fer 09].

#### b- Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique »

Pour éviter l'emballement du rotor par fort vent (la vitesse du vent dépasse sa vitesse nominale), les pâles sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique. Ainsi le rotor ne monte plus en vitesse lorsque le vent augmente à cause des turbulences qui se créent autour de la pôle et font diminuer sa portance, réduisant ainsi le couple produit [Boy 06]. Ce type de régulation est le plus utilisé car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles, ni de système de régulation dans le rotor. Les pâles de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne [Fer 09].

## **I.2.5. Technologie d'éoliennes**

### **I.2.5.1. Les éoliennes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe sont souvent munies d'un système d'orientation de la pôle (pitch control) permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au delà du synchronisme (glissement < 2%) et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce concept est moins coûteux et robuste coté construction. Son principal inconvénient est la consommation de la puissance réactive [Arb 06], [Poi 03].

### **I.2.5.2. Les éoliennes à vitesse variable**

Les éoliennes à vitesse variable se sont récemment développées grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, elles permettent à la fois de maximiser la puissance extraite du vent, de réduire les efforts subits par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques, de réduire le bruit et d'améliorer la qualité de l'énergie produite [Arb 06], [Poi 03]. Dans ces systèmes, une connexion directe au réseau n'est plus possible. Un découplage s'impose entre la génératrice et le réseau, pour obtenir ce découplage on utilise une interface d'électronique de puissance (un redresseur et un onduleur).

## **I.2.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

La croissance de l'énergie éolienne est liée aux avantages de son utilisation. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### **a- Les avantages**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en termes de puissance installée dans le monde. Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor :

- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet.
- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable, Il constitue donc une véritable ressource renouvelable [Has 10].

- Elle ne nécessite aucun carburant.

#### **b- Les inconvénients**

- Le bruit : il a nettement diminué, grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines

#### **[Bel 10].**

- La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante donc la qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau reste limité.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés **[Cam 03].**

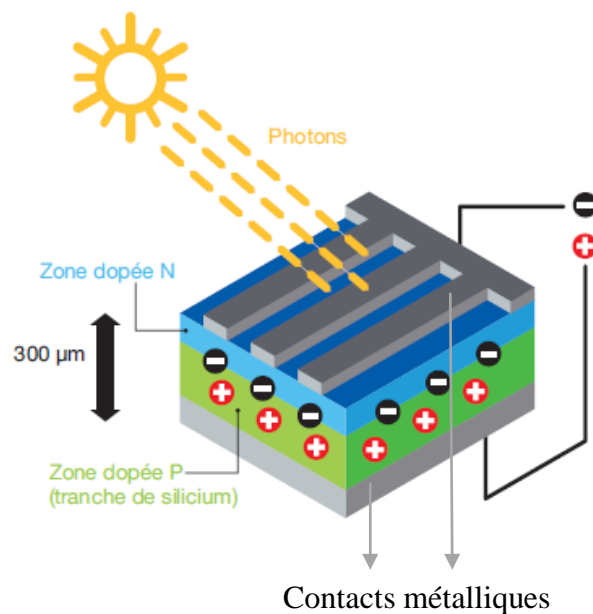
### **I.3. Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau sensible aux longueurs d'ondes du visible nommés cellules PV **[Fic 10]**. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ . La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. Il est plus ou moins éloigné du PPM, caractérisé par le courant et la tension optimaux notés  $(I_{opt}, V_{opt})$  **[Pas 06]**.

### I.3.1. La cellule photovoltaïque

#### I.3.1.1. La conversion de l'énergie solaire

En frappant les cellules semi-conductrices à base de silicium (ou d'autres matériaux) qui constituent le panneau solaire, les photons du rayonnement solaire provoquent l'apparition d'un courant électrique continu de l'ordre de quelques ampères sous une tension de l'ordre de quelques centaines de millivolts. La figure (I.11) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée [Som 10].



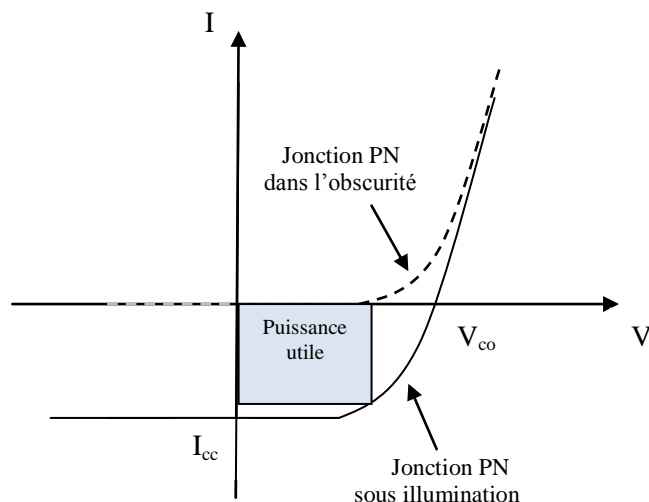
**Figure I.11:** Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir d'une couche de silicium, dopée P (dopée au bore) recouverte d'une autre couche très mince dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons et des trous. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement [Pas 06].

#### I.3.1.2. La diode photovoltaïque

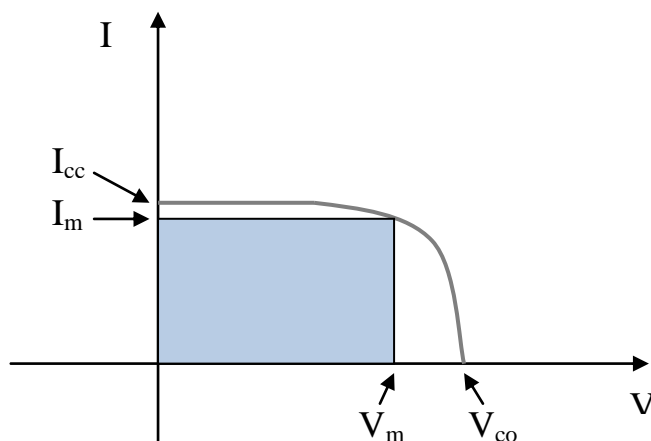
Une cellule photovoltaïque est une diode à jonction PN particulière. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une photodiode dont le fonctionnement nécessite une alimentation, et sa

caractéristique est identique à celle d'une diode. Une fois exposée à la lumière elle joue le rôle d'un générateur de courant DC, dont la caractéristique a l'allure présentée sur la figure (I.12) [Lab 06].



**Figure I.12 :** Caractéristique courant/tension

De façon générale, le quadrant où se trouve la zone de puissance utile est utilisé de façon inversée pour y faciliter la lecture du comportement des générateurs photovoltaïques en fonctionnement normal (Figure I.13) [Som 10].



**Figure I.13 :** Caractéristique courant –tension d'une cellule photovoltaïque

### I.3.2. Association de cellules photovoltaïques

Dans un groupement de  $n_s$  cellules en série, toutes sont traversées par un même courant. La figure (I.14) montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sc}$ ) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour  $n_s$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant :  $V_{sc} = n_s \cdot V_{co}$ .

Pour un groupement de  $n_p$  cellules identiques en parallèle (Figure I.15):  $I_{pcc} = n_p \cdot I_{cc}$  [Cou 06].

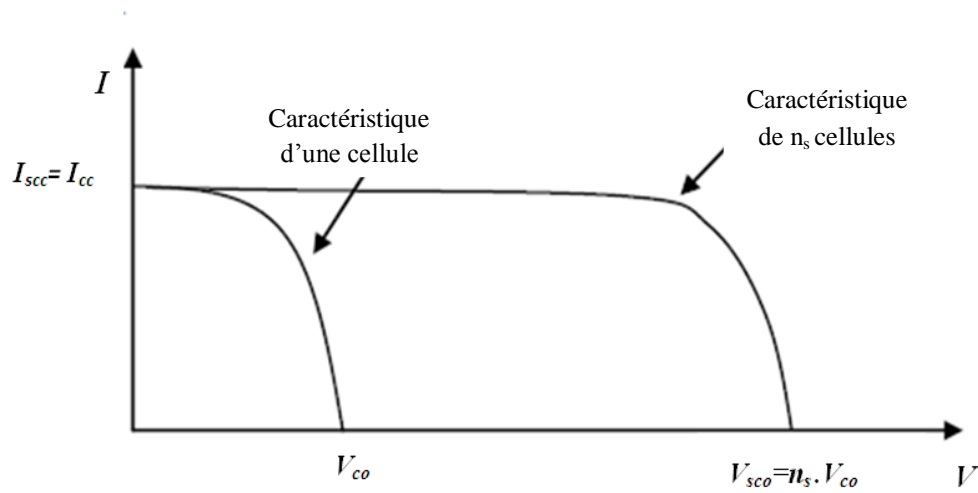


Figure I.14: Caractéristique de groupement série de cellules photovoltaïques identiques

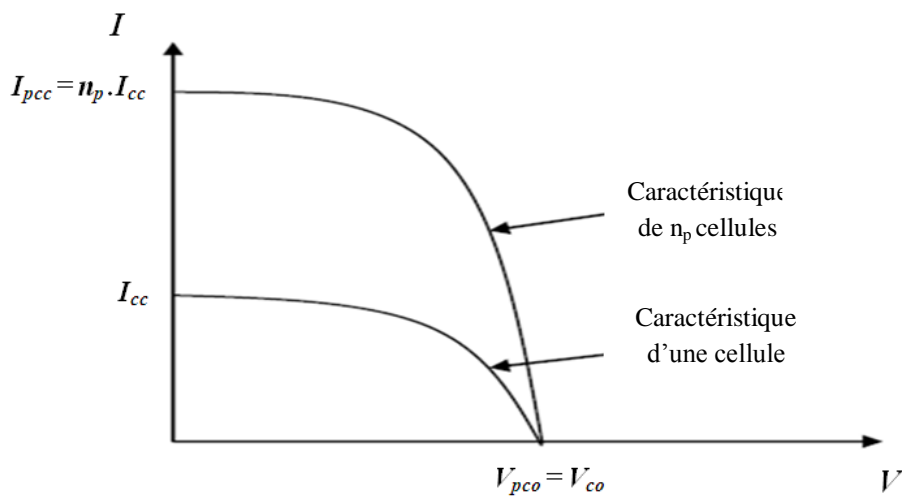
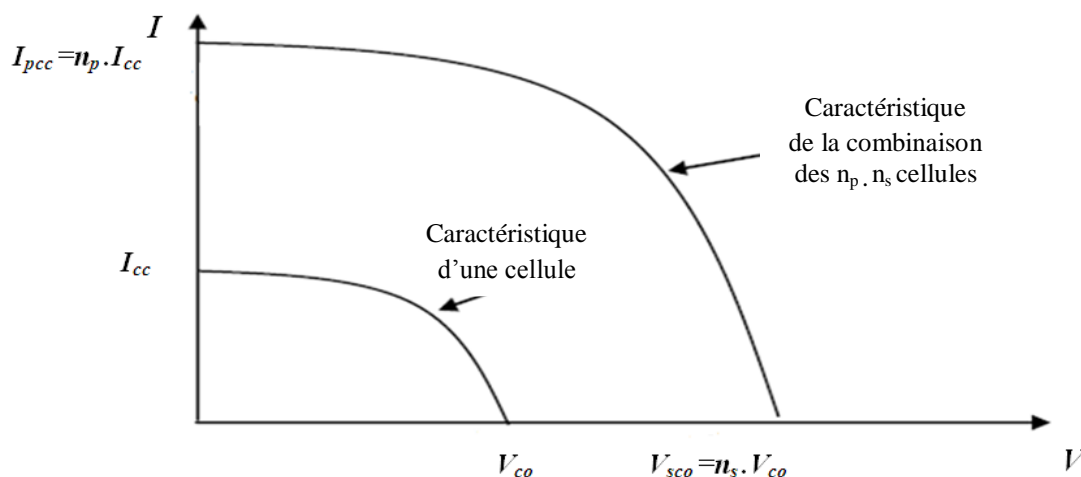


Figure I.15 : Caractéristique de groupement parallèle de cellules photovoltaïques identiques

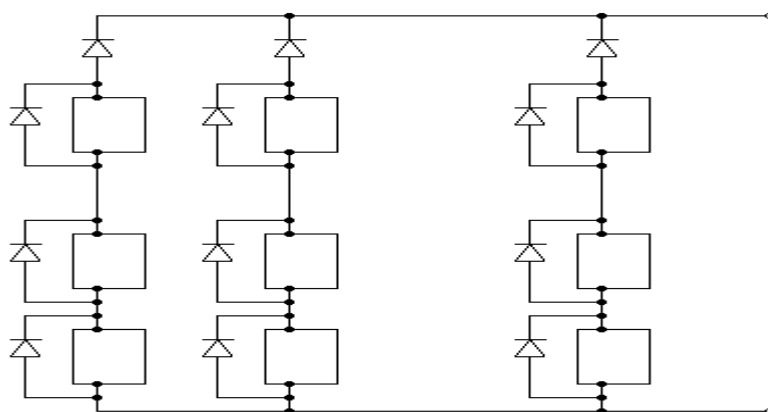
La caractéristique électrique globale courant/ tension d'un générateur photovoltaïque se déduit donc théoriquement de la combinaison des  $n_s \cdot n_p$  cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par le rapport  $n_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $n_p$  parallèlement à l'axe des courants. Ainsi que l'illustre la figure (I.16),  $n_s$  et  $n_p$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle [Cou 06].





**Figure I.16 :** Caractéristique d'un générateur à  $n_p$ ,  $n_s$  cellules en parallèle et en série identiques

Dans certaines conditions d'éclairement non uniforme et de fonctionnement proche du court-circuit, une cellule du groupement série peut même être soumise à la tension des  $(n_s - 1)$  autres cellules appliquée en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante qui peut la détruire si la contrainte thermique est trop forte. Pour éviter cela, il faut disposer une diode  $D_p$  connectée en parallèle, appelée « diode bypass », aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum. L'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès l'apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement limite cette dernière à la valeur  $V_d$  de la tension directe de conduction de la diode et la puissance dissipée à  $V_d \cdot I_s$ . De façon duale, une diode anti-retour  $D_r$  doit protéger des voies en parallèle des courants inverses (négatifs). Finalement la figure (I.17) montre le câblage d'un réseau de cellules ou de modules photovoltaïques munis des diodes de protections [Cou 06].



**Figure I.17 :** Câblage série/ parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protections.

### I.3.3. Utilisation optimale d'une cellule

De la caractéristique courant-tension on peut déduire la caractéristique de la puissance électrique générée par la cellule en fonction de la tension à ses bornes. Il existe une valeur de photo courant correspondant à une tension aux bornes de laquelle cette puissance électrique générée est optimum. Ce point s'appelle le MPP (Maximum Power Point) [Ger 02].

### I.3.4. Les différentes filières PV

#### a- La filière à base de Silicium Cristallin

Elle repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin, qui sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999% de Silicium. Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure.

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), et c'est modules les plus commercialisés avec plus de 90% [Fic 10].

#### b- Les cellules couches minces (Thin-film)

L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques [Ste 09].

#### ➤ Matériaux à base de Tellure de Cadmium (CdTe)

Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire).

Le développement des panneaux CdTe est néanmoins largement freiné par l'utilisation du cadmium, qui est un alliage de métal lourd, très toxique qui pose problème au niveau environnemental (interdiction des piles utilisant ce métal, exception faite pour les cellules PV [Ene12]).

#### ➤ Matériaux CIS, CIGS

Le Diselenure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau qui possède également des performances extrêmement intéressantes, et bon marché [Ene 12].

#### c- Les cellules multijonction :

Il s'agit de l'empilement de divers composants III-V, chacun optimisés pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules

en série. Ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée [Ene 12].

#### **d- Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules « de Graätzel »**

Ces cellules utilisent un oxyde semi-conducteur inorganique, un électrolyte et un colorant, reproduisant le phénomène de la photosynthèse, elles peuvent atteindre des rendements de plus de 10% [Ene 12].

#### **e- Les cellules photovoltaïques organiques**

L'intérêt de la technologie organique a pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu qui pourrait réduire le prix de revient des panneaux solaires. Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4 et 5% en laboratoire. Avant une possible commercialisation, des avancées concernant l'efficacité doivent encore être réalisés [Fic 10].

### **I.3.5. Les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques**

#### **a- Avantages**

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable de toutes.
- L'énergie photovoltaïque est considérée comme une énergie propre et durable [Cum 10].
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes, ils n'ont que très peu d'usure [Cum 10].
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.

#### **b- Inconvénients**

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- Habitude des sources d'énergies traditionnelles.

#### I.4. Les méthodes de recherche du point de puissance maximal

Il existe plusieurs techniques MPPT qui s'appliquent dans le domaine d'énergie éolienne et PV. Dans ce qui suit, on donne quelques techniques d'optimisation des systèmes éoliens et PV. Ces techniques peuvent être appliquées pour l'une ou pour l'autre ou bien pour les deux. On se contente d'attribuer chaque technique pour un seul système.

##### I.4.1. Les MPPT qui s'appliquent pour les systèmes éoliens

###### I.4.1.1. Commande MPPT avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

La commande MPPT classique nous facilite la recherche du point de puissance maximum, en connaissant la caractéristique de la voilure éolienne, cette méthode permet de suivre rapidement le PPM à l'aide de mesures simples, internes au convertisseur mécano-électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent.

La courbe spécifique d'une turbine possède une forme en cloche, et nécessite d'autant plus de dispositif d'extraction maximale de puissance (MPPT). Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale donc au point optimal ; Il est caractérisé par la vitesse relative optimale ( $\lambda_{opt}$ ) et le coefficient de puissance maximal ( $C_{pmax}$ ).

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v}$$

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot S \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3$$

$$T_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} \Rightarrow T_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^2 \tag{I.2}$$

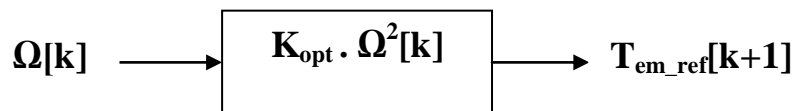
On suppose que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (I.2) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$T_{t\_ref} = K_{opt1} \cdot \Omega_t^2 \Rightarrow T_{em\_ref} = \frac{T_{t\_ref}}{G_m} = \frac{K_{opt1} \cdot \Omega_t^2}{G_m} \cdot \frac{G_m^2}{G_m^2} = \frac{K_{opt1}}{G_m^3} \cdot \Omega^2$$

$$T_{em\_ref} = K_{opt} \cdot \Omega^2 \tag{I.3}$$

$$\text{Avec : } K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{pmax} \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3 \cdot G_m^3}$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape k, détermine le couple de référence dans l'étape k+1 de la façon montrée sur la figure (I.18)



**Figure I.18:** Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

A chaque pas de calcul cette opération permet de converger vers le point optimal.

La mesure de la vitesse de rotation  $\Omega_1$  engendre le calcul du couple  $T_{em\_ref1}$ . Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromécanique de la génératrice ;

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = T_{em} - T_t \quad (I.4)$$

Par l'action de ce couple la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique (I.4) pour atteindre au pas de calcul suivant la vitesse  $\Omega_1$  où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée. Après quelques itérations  $T_{em\_ref}[k + 1] = T_{opt}$  et  $\Omega_{opt}$  est alors atteint et correspond à la puissance optimale  $P_{opt}$  [Mir 05].

#### I.4.1.2. Méthode de gradient

La recherche du point optimal par la méthode de gradient est plus simple sans connaître les paramètres  $\lambda_{opt}$  et  $C_{pmax}$  pour chaque vitesse du vent, la référence de vitesse de la turbine est ramenée à son optimum qui donne le maximum de puissance. Pour agir sur la vitesse de rotation de la génératrice, on surveille le sens de variation du rapport  $\frac{dP_{aer}}{d\Omega_t}$ . Lorsqu'on atteint le point désiré (maximum de puissance), ce rapport sera nul [Ram 10].

Mathématiquement, on peut écrire :

$$\frac{dP_{aer}}{d\Omega_t} = \frac{dP_{aer}}{dt} \left( \frac{d\Omega_t}{dt} \right)^{-1}$$

On distingue quatre cas possibles résumés dans le tableau ci-dessous :

$\frac{d\Omega_t}{dt} \backslash \frac{dP_{aer}}{dt}$	$<0$	$>0$
	$<0$	Augmenter $\Omega_t$
$>0$	Diminuer $\Omega_t$	Augmenter $\Omega_t$

L'algorithme nécessite la connaissance de la puissance et de la vitesse de rotation à chaque instant. Selon les quatre cas possibles décrits dans le tableau, à l'itération K on augmente ou on diminue la référence de vitesse  $\Omega_{k+1}$  d'un pas fixe  $\Delta\Omega$  l'algorithme d'optimisation est illustré par l'organigramme de la figure (I.19).

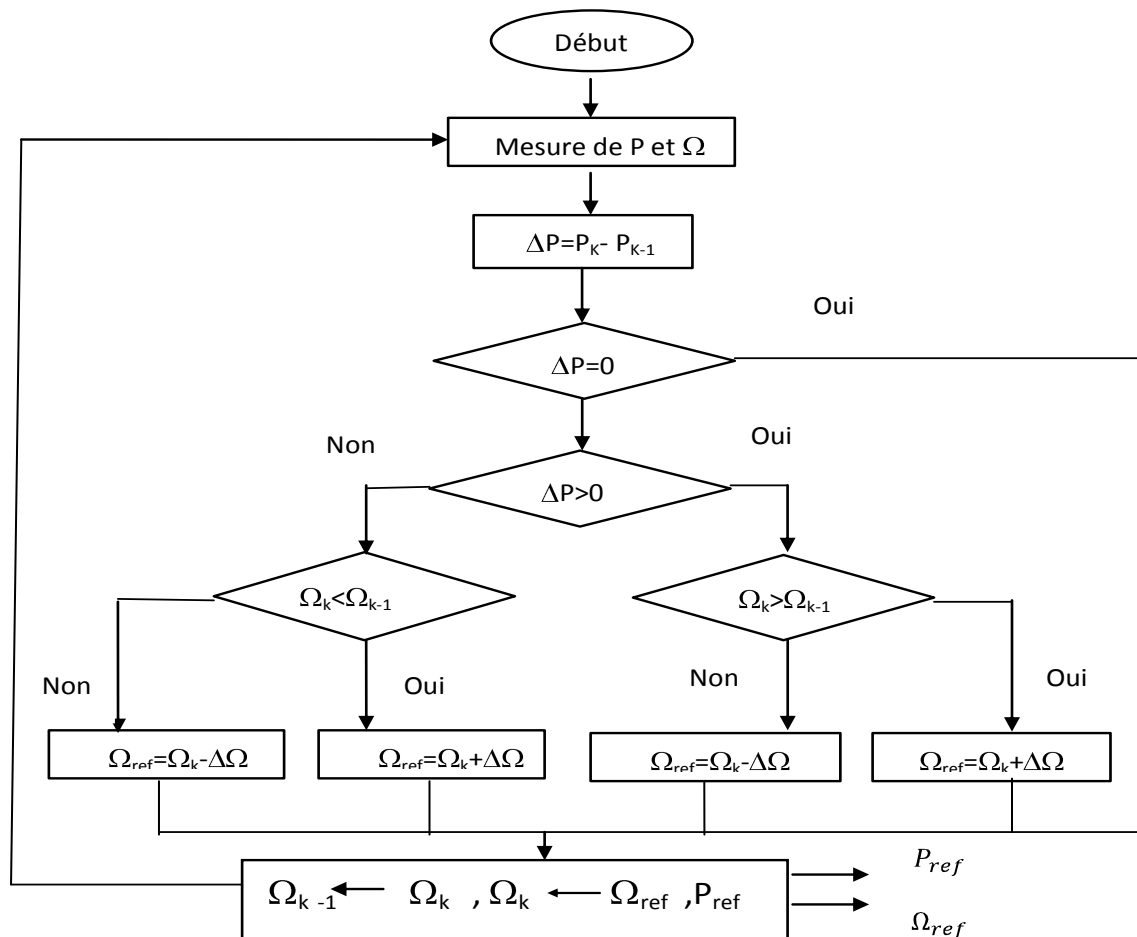


Figure I.19 : Organigramme de MPPT par la méthode de gradient

## I.4.2. Les MPPT qui s'appliquent pour les systèmes photovoltaïques

### I.4.2.1. Méthode de tension de circuit ouvert du générateur PV

Cet algorithme est basé sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension en circuit ouvert. La constante proportionnelle  $k_1$ , dépend de la technologie des cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques. La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est mesurée par interruption du fonctionnement normale du système, avec une certaine fréquence de mesure, les données sont stockées, après le PPM est calculé selon l'équation (I.5) et la tension de fonctionnement est ajustée pour avoir la tension optimale. Ce processus est répété périodiquement.

$$k_1 = \frac{V_{ppm}}{V_{co}} = \text{Constante} < 1 \quad (\text{I.5})$$

Bien que cette méthode soit simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de  $k_1$  [Lal 09], [Sin 10].

L'avantage de cette méthode, c'est qu'on ne tient pas compte de l'influence de l'ensoleillement et de la température et encore moins du vieillissement des panneaux. Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et pas chère [Sin 10].

### I.4.2.2. Méthode de conductance incrémentielle

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimée par:

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension  $V_{pv}$  :

$$\frac{1}{V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

Cette relation est égale à zéro au point de puissance maximale.

Ceci mène à l'ensemble d'équations suivantes :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM.}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM.}$$

Son principe consiste à comparer entre la conductance ( $G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ ) et sa dérivée ( $\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$ ) et décider ensuite quant augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le

point de puissance maximale (PPM) où ( $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ ). La méthode de conductance incrémentielle est souvent jugée efficace de point de vu efficacité de recherche du point de puissance maximale. Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une grande capacité de calcul, ce qui réduit la période de contrôle du système [Lal 09], [Bel 10], [Laid 10].

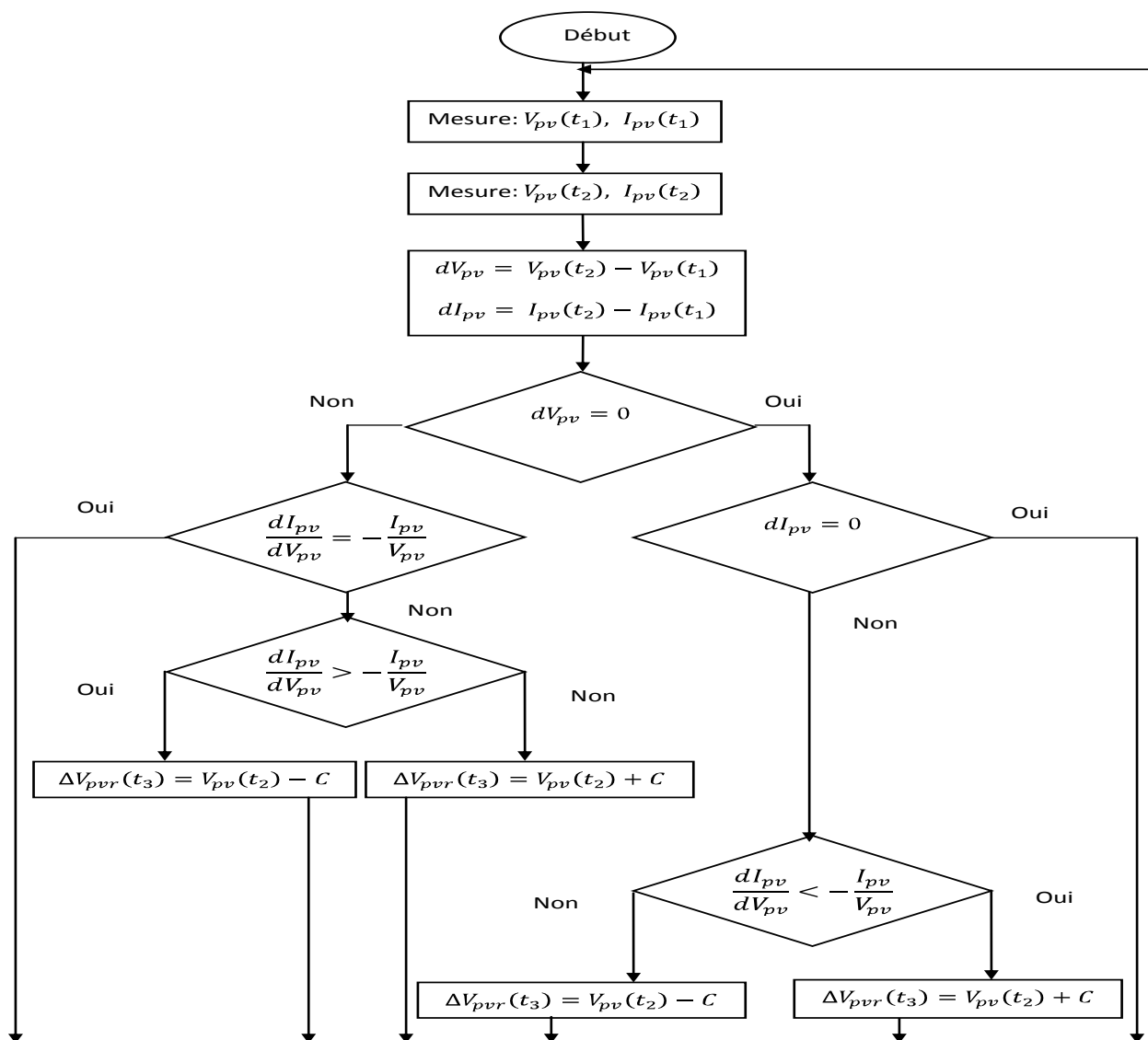


Figure I.20 : Algorithme de la méthode d'incrémention de conductance

### I.4.2.3. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension  $V_{pv}$  volontairement (augmenter ou diminuer) avec une constante  $C$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. Si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction, réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée



dans le sens opposé [Laid 10], [Lal 09]. Quand le point de puissance maximale est atteint,  $V_{pv}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{pv-ppM}$  ceci cause alors une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentacion est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement [Laid 10].

La figure (I.21) représente l'algorithme de la méthode P&O.

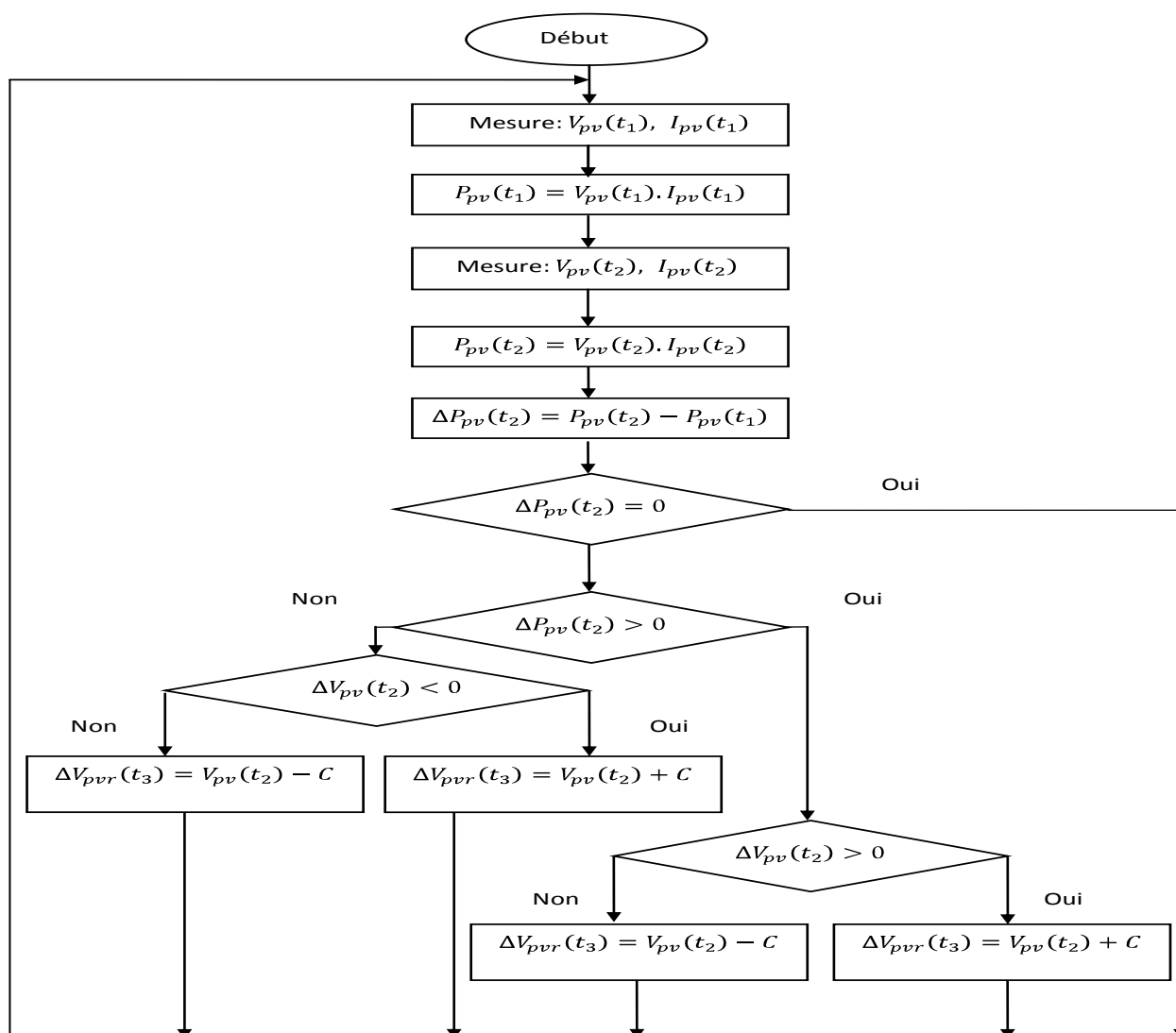


Figure I.21 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)

**Remarque :** Cette dernière méthode peut également être appliquée pour le système éolien.

### I.5. Energie hydraulique – Hydroélectricité

L'hydraulique est une des premières énergies domestiquée par l'homme (moulins au fil de l'eau, bateaux à aubes,...). L'hydroélectricité (production d'électricité à partir de la force de l'eau) [Ene 13]. On distingue la petite hydraulique (Inférieure à 10 MW) et la grande

hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée généralement c'est la petite hydraulique qui est utilisée [Bel 10].

### **I.5.1. La petite centrale hydroélectrique**

Une petite centrale hydroélectrique exploite la force de l'eau pour générer de l'électricité. Le principe est de capter l'eau et la forcer à entraîner une turbine reliée à une génératrice. Le choix de la turbine se fait selon le débit et la vitesse de la veine d'eau. Pour les faibles hauteurs d'eau avec des débits importants, on fera appel à des turbines à axe vertical de type Kaplan ou Francis. Pour les chutes de grande hauteur et de faible débit, des turbines à axe horizontal de type Pelton ou Francis donnent les meilleurs résultats [Ene 13].

### **I.6. L'énergie de la biomasse**

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou les déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois énergie (biomasse solide), le biogaz et les biocarburants [Ene 13], [Fer 09].

#### **a- Le bois énergie**

La biomasse solide représente les matériaux d'origine biologique qui peuvent être employés comme combustible pour la production de chaleur ou d'électricité. Ce sont principalement des ressources d'origine forestière, agricole ou urbaine, ainsi que des matières organiques telles que la paille, les résidus de récoltes et les matières animales [Ene 13].

#### **b- Le biogaz**

Le biogaz est un gaz combustible, mélange de méthane et de gaz carbonique, additionné à quelques autres composants. Il se libère lors de la décomposition des matières organiques, selon un processus de fermentation. On l'appelle aussi gaz naturel "renouvelable", par opposition au gaz naturel d'origine fossile.

#### **c- Le biocarburant**

Les biocarburants, parfois appelés agro carburants, sont issus de la biomasse. Il existe principalement deux filières industrielles : l'éthanol et le biodiesel. Ils peuvent être utilisés purs (éthanol), biodiesel, ou comme additifs aux carburants classiques [Fer 09].

### **I.7. L'énergie de la géothermie**

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

- **La géothermie très basse énergie** ; s'applique aux nappes d'une profondeur inférieure à 100 m et à faible niveau de température (moins de 30°C). La chaleur extraite est utilisée généralement pour assurer le chauffage et le rafraîchissement des locaux après élévation de la température au moyen d'une pompe à chaleur.

- **La géothermie basse énergie** ; appelée aussi basse température ou basse enthalpie, explore des aquifères situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. La température varie entre 30°C et 90°C : trop faible pour produire de l'électricité mais idéal pour produire de la chaleur. Les applications vont du chauffage urbain au thermalisme, en passant par le chauffage des serres et le séchage des produits agricoles.

- **La géothermie moyenne énergie** ; aussi appelée moyenne enthalpie, explore le plus souvent des gisements d'eau chaude ou de vapeur humide compris entre 90 et 150°C. Dans les bassins sédimentaires, il faut atteindre des profondeurs de 2 000 à 4 000 mètres pour obtenir ces températures. Dans des zones plus propices, la géothermie moyenne énergie pourra être exploitée à moins de 1 000 mètres. Cette voie est utilisée pour produire de la chaleur, et éventuellement de l'électricité.

- **La géothermie haute température** ; ou haute enthalpie, exploite des fluides atteignant des températures supérieures à 150°C, pour produire de l'électricité. Les réservoirs sont localisés entre 1 500 à 3 000 mètres de profondeur, généralement dans les zones de volcanisme ou de tectonique active.

- **La géothermie profonde assistée** ; est une voie de recherche qui consiste à extraire la chaleur des roches chaudes fissurées situées entre 3 et 5 kilomètres de profondeur. Contrairement à la géothermie haute température classique qui exploite des réservoirs capables de fournir des débits de fluides élevés, la géothermie profonde assistée nécessite de stimuler les roches peu perméables en injectant de l'eau sous forte pression dans le sol.

**a- La production de l'électricité avec la géothermie**

La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

**b- Exploitation de la géothermie dans le chauffage**

Il existe deux façons de produire du chauffage par la géothermie. La première est d'utiliser les nappes d'eau chaude des forages profonds de 1 à 2 km, l'eau chaude (30°C à 150°C) remonte à la surface. Un échangeur de chaleur transfère ensuite les calories au réseau de chauffage urbain. L'autre voie de chauffage exploite les sources géothermiques très basse température (inférieures à 30°C). La température est élevée à l'aide de pompes à chaleur (PAC). Cette géothermie est à la portée de tous ou presque, quelle que soit la situation géographique [Ene 13].

**I.8. Systèmes de stockage****I.8.1. Stockage à long terme****I.8.1.1. Batteries**

Dans les batteries, l'énergie est stockée sous forme électrochimique. Elles sont composées de deux électrodes séparées par un électrolyte et des interfaces dans lesquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Les systèmes de batteries sont constitués d'un ensemble de modules de batteries à basse tension/puissance qui se connecte en parallèle ou en série pour obtenir les caractéristiques électriques désirées. Elles représentent les systèmes de stockage qui ont la plus grande capacité de stockage d'énergie électrique. Les batteries se chargent quand elles subissent une réaction chimique interne sous un potentiel appliqué à leurs bornes. Elles se déchargent, pour la réaction chimique inverse [Ara 06]. La batterie au plomb acide est la plus utilisée, en raison de son coût qui est relativement faible et de sa disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont beaucoup plus utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [Bel 07].

### I.8.1.2. Le stockage par pile à combustible à hydrogène

La pile à combustible, fonctionnant avec l'hydrogène comme carburant, repose sur le principe de production de l'électricité par conversion directe de l'énergie chimique du combustible. Celle-ci ayant la particularité d'utiliser deux gaz : l'hydrogène  $H_2$  et l'oxygène  $O_2$  comme couple électrochimique. La réaction se produit au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte [Arb 06].

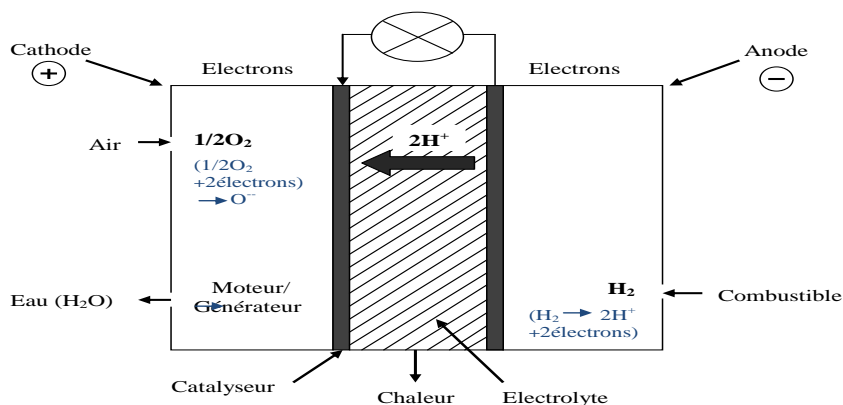


Figure I.22 : Principe de la pile à combustible [Arb 06]

## I.8.2. Stockage à court terme

### I.8.2.1. Volants d'inertie

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISE) ont été redécouverts depuis quelques années du à leurs avantages par rapport aux autres systèmes de stockage d'énergie. Un SISE comporte un volant d'inertie couplé à une machine électrique pouvant fonctionner dans deux régimes; moteur ou générateur [Cra 03], avec des paliers magnétiques, afin de réduire les frottements, le tout est installé dans une enceinte sous vide (volant rapide) ou remplie d'hélium (volant lent). Les paliers doivent permettre la rotation de l'ensemble avec un minimum de pertes [Gue 09], couplé à un convertisseur d'électronique de puissance [Oct 05].

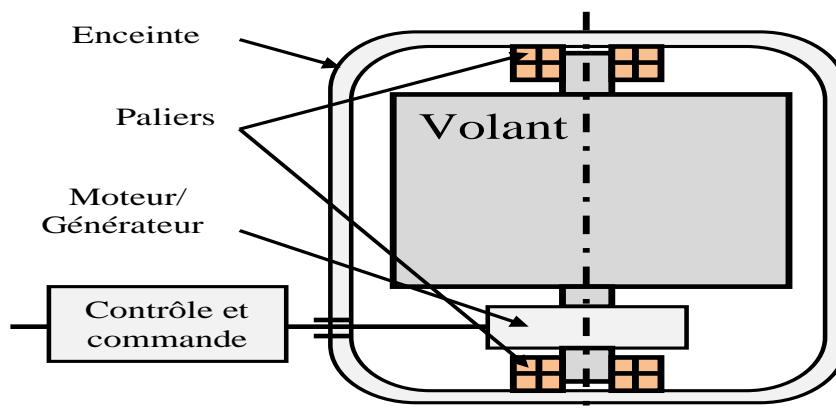
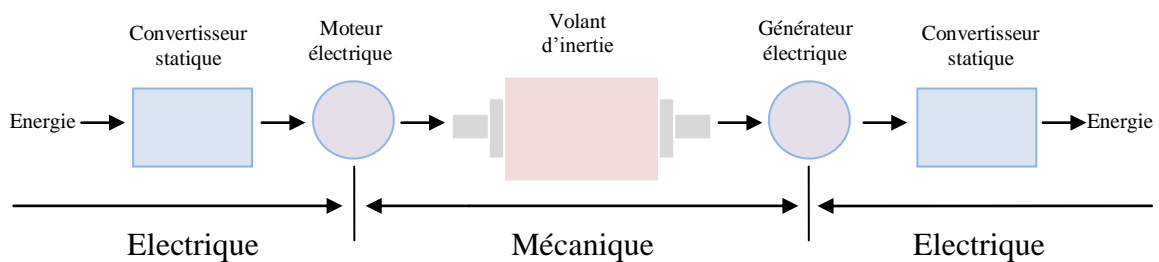


Figure I.23: Structure du système de stockage inertiel [Arb 06]

### ❖ Principe de fonctionnement

Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire de moteur électrique. L'énergie mécanique est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique d'une masse tournante. Lors de la décharge du SISE, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique.

D'habitude, il ya une seule machine électrique qui peut fonctionner en moteur ou en générateur, en fonction du régime de fonctionnement du SISE. Le régime de fonctionnement est imposé par le convertisseur électronique de puissance, qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers la machine électrique comme le montre la figure (I.24) [Oct 05].



**Figure I.24:** Transfert de l'énergie dans un SISE [Oct 05]

## I.9. Généralité sur le système hybride

### I.9.1. Définition

Un système hybride à sources d'énergies renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage [Sto 11].

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vu technique qu'économique [Bel 02].

### I.9.2. Les différentes structures des systèmes hybrides

#### I.9.2.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir :

➤ **Système hybride éolien/source conventionnelle (diesel)**

C'est un système qui combine entre la turbine éolienne et une source conventionnelle (diesel) [Sad 09]. Ces systèmes sont conçus afin de réduire la consommation de carburant, tout en gardant une qualité de l'énergie acceptable [Lal 09].

➤ **Système hybride photovoltaïque/source conventionnelle (diesel)**

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud [Sto 11]. La combinaison de ces deux sources d'énergies permet la production continue d'énergie à la demande. Cependant, la production d'énergie n'est pas entièrement renouvelable et pour les applications dans les sites isolés, les frais de transport du combustible pour ces régions et les coûts environnementaux sont élevés [Lal 09].

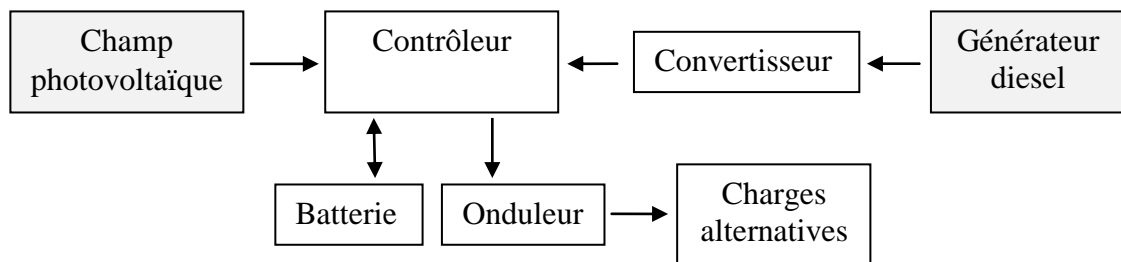


Figure I.25 : Schémas de principe d'un système hybride solaire-diesel.

➤ **Système hybride photovoltaïque/éolien/source conventionnelle (diesel)**

L'utilisation du photovoltaïque dans les zones isolées est un grand avantage, de par sa facilité de mise en œuvre et le peu d'entretien qu'il nécessite. Cependant, le Watt photovoltaïque délivré est assez coûteux pour les moyennes et grandes puissances par rapport aux autres sources d'énergie. Ainsi, les spécialistes ont été amenés à coupler plusieurs systèmes énergétiques (vent, solaire, diesel) (Figure I.26), afin d'augmenter la fiabilité du système alimentant la charge et d'autre part diminuer de manière importante le coût de l'électricité produite par une diminution importante de la taille du système de stockage [Bel 02], [Lal 09].

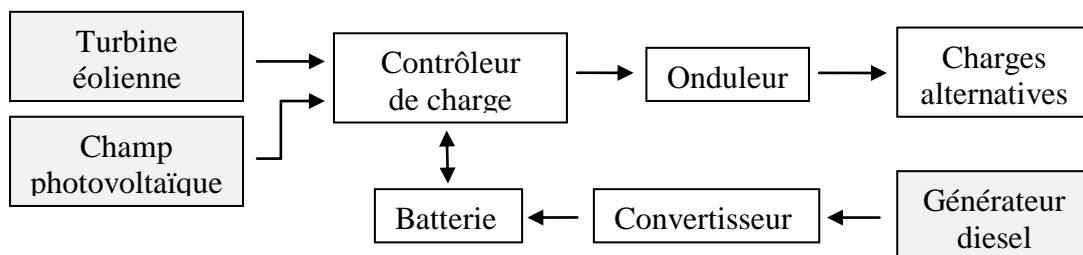


Figure I.26: Système hybride Eolien-Photovoltaïque-Diesel

### **I.9.2.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle**

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voir même impossible. Dans la suite de ce paragraphe sont présentées quatre configurations de système hybride sans ou avec stockage [Sto 11].

#### ➤ **Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage**

Ce type de système hybride s'utilisent très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares [Sto 11].

#### ➤ **Système hybride photovoltaïque/stockage**

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances [Bel 02].

#### ➤ **Système hybride éolien/stockage**

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent [Sto 11].

#### ➤ **Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage**

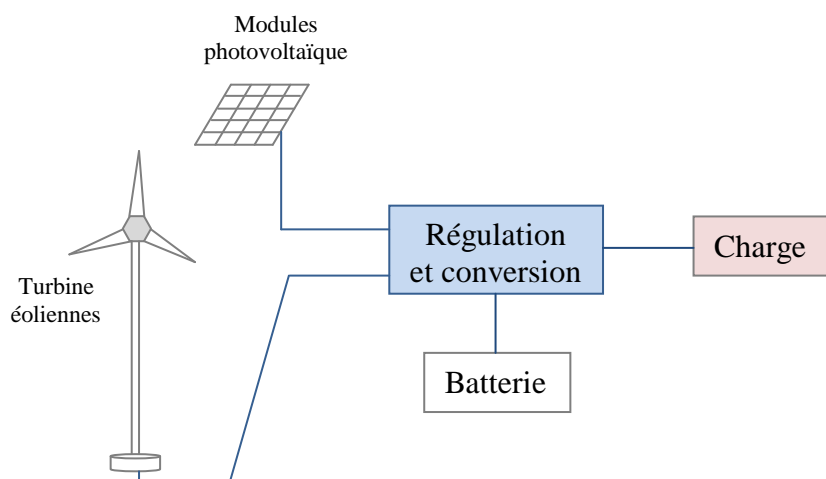
L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs désavantages comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé et une augmentation du prix du kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie [Sto 11].

Dans notre travail nous nous sommes particulièrement intéressés au système hybride qui combine les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque-éolien) avec des batteries de stockage. Son schéma synoptique est donné par la figure (I.27). L'intérêt porté à ce système est



dû au fait que l'Algérie dispose d'une position géographique stratégique d'où la disponibilité et la complémentarité des gisements solaire et éolien [Lal 09].

Ce système hybride a fait objet de plusieurs travaux de recherches [Ger 02], [Kaa 06], [Lal 09], [Has 10], [Sto 11], [Bri 12]. Pour faire face à l'inconstance du vent et du rayonnement solaire, une stratégie de contrôle appropriée s'avère être nécessaire, afin de satisfaire les besoin de la charge et de maximiser le rendement énergétique global. Avec notre travail, on souhaite donc étudier la problématique de l'optimisation et la gestion d'énergie dans ce type de système hybride.



**Figure I.27** : Schéma synoptique du système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

### I.9.3. La complémentarité des ressources éoliennes et solaires

L'intérêt d'un système hybride réside dans le fait que l'utilisation simultanée de plusieurs sources d'énergie permet de mieux répondre à une demande continue d'énergie de la part de l'utilisateur ou du réseau électrique. En effet, la grande variabilité des sources renouvelables oblige d'une part à surdimensionner les générateurs éoliens ou photovoltaïques et surtout à introduire avec le système de production un système de stockage d'énergie ou tout au moins un tampon énergétique qui permettra de combler les déphasages temporels et d'amplitude entre la production et la consommation.

Utiliser un système hybride réduira la taille de ces composants, diminuera l'énergie perdue, augmentera sa fiabilité et rendra l'utilisation des sources renouvelables d'énergie plus intéressante économiquement. Tous ces avantages seront d'autant plus importants que les sources solaires et éoliennes seront complémentaires entre elles et en phase avec la courbe de consommation. Et nous on va s'intéresser uniquement à la complémentarité des sources et ceux à deux niveaux :

- au niveau mensuel, autrement dit les mois ventés sont les moins ensoleillés.
- au niveau journalier c'est-à-dire la courbe d'énergie éolienne sur 24h est en opposition de phase avec celle de l'ensoleillement [Sto 11].

#### **I.9.4. Avantage et inconvénient d'un système hybride**

##### **a- Avantages**

- Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie.

##### **b- Inconvénients**

- Coût de capital élevé.
- Plus complexe que les systèmes électrique isolés; nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité [Lal 09].

#### **I.10. Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un aperçu des possibilités des énergies renouvelables, en nous focalisant davantage sur les filières éolienne et photovoltaïque et les technologies associées. Nous avons ainsi présenté différentes structures de systèmes hybrides. Le système qui nous intéresse regroupe les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque-éolien) avec batteries de stockage. Ce dernier est fiable, économique et plus écologique que le système hybride comportant des générateurs diesels à carburant fossile pour ainsi respecter l'environnement et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

# **Chapitre II**

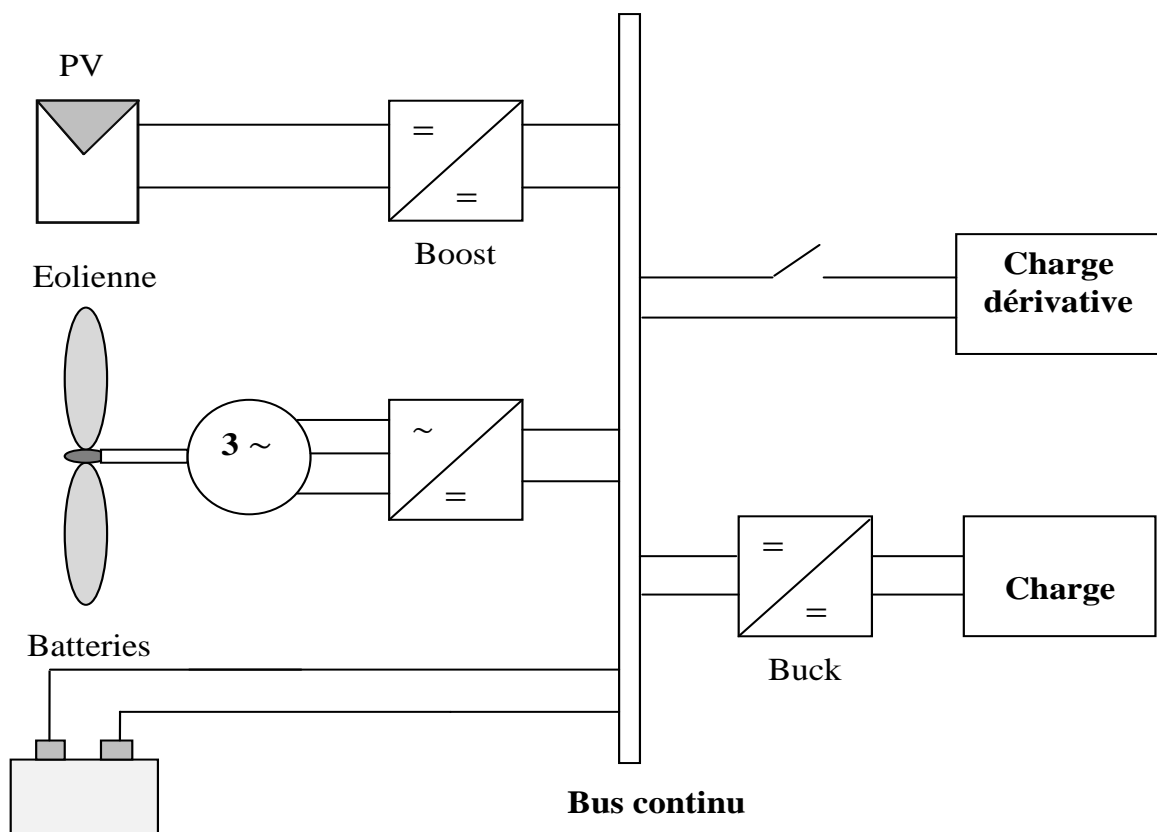
## **Modélisation des composants du système hybride**

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles des composants du système étudié dans le cadre de notre travail, à savoir une éolienne, des panneaux PV, un système de stockage (batteries) et des convertisseurs pour interconnecter les sources. L'architecture complète de ce système est illustrée dans la figure (II.1).

## II.2. Outils de modélisation

La présente étude utilise l'outil mathématique *Matlab/Simulink* afin de modéliser et de simuler les différents composants du système (sources, convertisseurs et batteries), dont les paramètres sont donnés dans les annexes (1) et (2). Les stratégies de contrôle et d'optimisation sont également programmées à l'aide de *Matlab/Simulink*.



**Figure II.1** : Schéma de principe d'un système hybride

## II.3. La chaîne de production d'énergie éolienne

### II.3.1. Modèle du vent

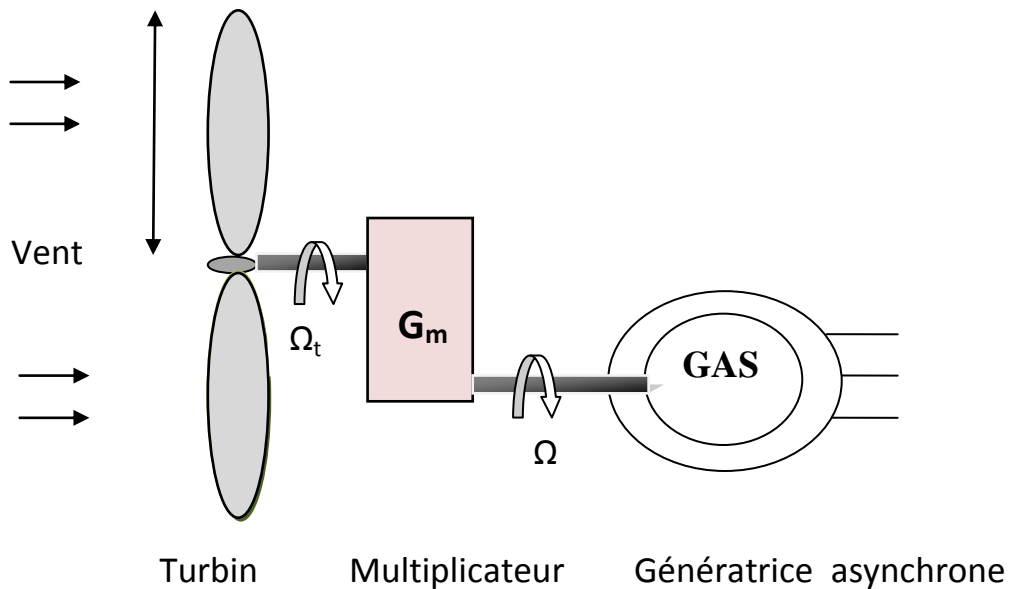
La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. C'est donc une variable importante à modéliser, la précision des simulations dépendra de la

qualité de son modèle [Laid 10]. Elle est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [Bel 10].

$$V_V = f(t)$$

### II.3.2. Modèle de la turbine éolienne

Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne à axe horizontal à vitesse variable, utilisant une génératrice asynchrone à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G_m$  (figure II.2).



**Figure II.2 :** Schéma de l'aérogénérateur

L'énergie cinétique d'une masse d'air  $m$  qui se déplace avec la vitesse  $V_v$  (m/s), est:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (\text{II.1})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface ( $S = \pi \cdot R^2$ ), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donné par:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.2})$$

$\rho$  : Est la densité d'air [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$S$  : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle [ $\text{m}^2$ ];

$V_v$  : Est la vitesse du vent [m/s], [Has 10], [Aim 04];

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est fournie par la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad (\text{II.3})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini comme suit [Mir 05], [Bel 10] :

$$C_{p \text{ opt}} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0.59 \quad (\text{II.4})$$

Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine à la vitesse du vent par [Bel 10] :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{aer}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (\text{II.5})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (\text{II.6})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse spécifique  $\lambda$ , qui est le rapport de la vitesse de l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$\Omega_t$  : La vitesse de rotation de la turbine [rad/s] ;

$R$  : Le rayon de la turbine [m] ;

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$T_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.8})$$

### II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [Bel 10], [Aim 04] :

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G_m} \quad (\text{II.9})$$

Les couples sur l'arbre lent  $T_t$  et sur l'arbre rapide  $T_{em}$  sont exprimés par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G_m} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$G_m$  : Le gain du multiplicateur ;

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m];

$\Omega$  : La vitesse mécanique de la génératrice [rd/s];

### II.3.4 Modèle de l'arbre de transmission mécanique de la machine asynchrone

Le modèle mécanique utilisé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [Aim 04], telle que :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + T_{vis} = T_{em} - T_t \quad (\text{II.11})$$

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

$$T_{vis} = f \cdot \Omega \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$J$ : L'inertie totale de l'arbre de transmission ;

$f$ : Le coefficient de frottement visqueux ;

### II.3.5. Modèle mathématique de la génératrice asynchrone

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur, mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais (collecteurs) ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [Poi 03].

#### II.3.5.1. Hypothèses simplificatrices

Un certain nombre d'hypothèses ont été nécessaires pour établir les différentes équations du modèle. Les plus importantes sont :

- La machine n'est pas saturée (fonctionnement linéaire) ;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées ;

- L'entrefer est constant (pas d'effet d'encoches) ;
- La symétrie de construction est parfaite (les phases de la machine ont les mêmes caractéristiques) ;
- La distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- Les pertes mécanique sont négligées ;
- La cage d'écureuil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent ;

### II.3.5.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone dans le repère (a.b.c)

La loi de Faraday permet d'obtenir les six équations des bobinages statoriques et rotoriques :

**Pour le stator :**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{array} \right.$$

**Pour le rotor (à cage) en court-circuit, donc tensions nulles :**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ra} = 0 = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = 0 = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = 0 = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{array} \right.$$

Ce qui peut s'écrire sous forme matricielle condensée :

$$[\mathbf{V}_s]_{a,b,c} = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{i}_s]_{a,b,c} + \frac{d}{dt} [\Phi_s]_{a,b,c} \quad (\text{II.13})$$

$$[\mathbf{V}_r]_{a,b,c} = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{i}_r]_{a,b,c} + \frac{d}{dt} [\Phi_r]_{a,b,c} = [\mathbf{0}] \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : } [\mathbf{V}_s]_{a,b,c} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{V}_r]_{a,b,c} = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{i}_s]_{a,b,c} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{i}_r]_{a,b,c} = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$



$$[\Phi_s]_{a,b,c} = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_r]_{a,b,c} = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où

$[\mathbf{V}_s]_{a,b,c}$  : Le vecteur des tensions statoriques [V] ;

$[\mathbf{V}_r]_{a,b,c}$  : Le vecteur des tensions rotoriques [V] ;

$[\mathbf{i}_s]_{a,b,c}$  : Le vecteur des Courants statoriques [A] ;

$[\mathbf{i}_r]_{a,b,c}$  : Le vecteur des Courants rotoriques [A] ;

$[\Phi_s]_{a,b,c}$  : Le vecteur des flux à travers les phases statoriques [Wb] ;

$[\Phi_r]_{a,b,c}$  : Le vecteur des flux à travers les phases rotoriques [Wb] ;

$[R_s]$  et  $[R_r]$ : Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques [ $\Omega$ ] ;

Les flux traversant les phases statoriques et rotoriques sont donnés par les équations suivantes :

$$[\Phi_s]_{a,b,c} = [L_s] \cdot [i_s]_{a,b,c} + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_r]_{a,b,c} \quad (\text{II. 15})$$

$$[\Phi_r]_{a,b,c} = [L_r] \cdot [i_r]_{a,b,c} + [M_{rs}(\theta)] \cdot [i_s]_{a,b,c} \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Si on désigne par  $\theta$  l'écart angulaire entre les phases du stator et du rotor, on aura :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Telle que :

$L_s, L_r$ : Inductance propre d'une phase statorique et rotorique [H] ;

$M_s$ : Inductance mutuelle entre les phases statoriques [H] ;

$M_r$  : Inductance mutuelle entre les phases rotoriques [H] ;

$M_{sr}, M_{rs}$ : Inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique [H] ;

$M_0$  : Maximum de la mutuelle inductance stator rotor quand leur axes coïncident [H] ;

Nous constatons la complexité des équations de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

### II.3.5.3. Transformation de Park et équations de la machine asynchrone selon les axes d-q

La transformation de Park nous permet de passer d'un repère triphasé (a,b,c) à un repère déphasé (d,q,o) suivie d'une rotation. L'application de la transformation de Park, assure l'invariance de la puissance instantanée lors de changement du repère.

La transformation de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation :

$$\theta = p \cdot \Theta = \theta_s - \theta_r$$

$\theta_s$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase a du stator ;

$\theta_r$ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase a du rotor ;

$\theta$  : L'angle électrique entre l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique ;

$p$  : Nombre de paires de pôles ;

$\Theta$ : La position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique ;

Lors d'une alimentation sinusoïdale, il est possible d'écrire, en régime permanent :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} : \text{Pulsation des grandeurs statoriques ;}$$

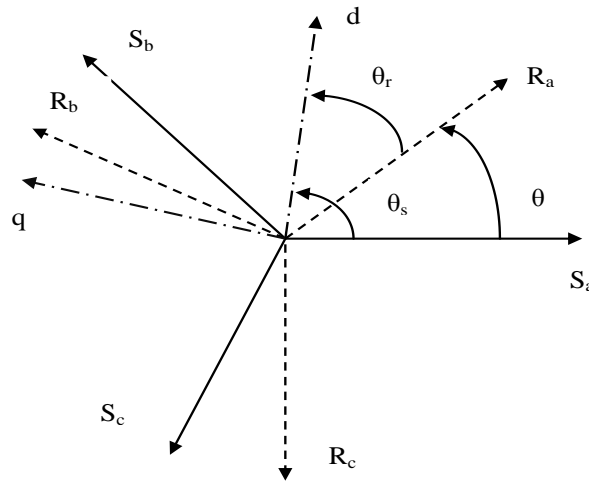
$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques ;}$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \omega = \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega$$

Avec :

$\Omega$  : La vitesse mécanique [rd/s] ;

$\omega$  : La pulsation mécanique [rd/s] ;



**Figure II.3 :** Les différents systèmes d'axes utilisés

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé, en supposant le système parfaitement équilibré donc la composante homopolaire (o) est nulle :

$$[V_s]_{d,q} = [P(\theta_s)] \cdot [V_s]_{a,b,c}$$

$$[V_r]_{d,q} = [P(\theta_r)] \cdot [V_r]_{a,b,c}$$

$$[i_s]_{d,q} = [P(\theta_s)] \cdot [i_s]_{a,b,c}$$

$$[i_r]_{d,q} = [P(\theta_r)] \cdot [i_r]_{a,b,c}$$

$$[\Phi_s]_{d,q} = [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_s]_{a,b,c}$$

$$[\Phi_r]_{d,q} = [P(\theta_r)] \cdot [\Phi_r]_{a,b,c}$$

Ainsi, en multipliant par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}$  Sont les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques :

En considérant que  $M_{sr} = M_{rs} = M$

On obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$  : Inductance cyclique statorique [H] ;

$L_r = l_r + M$  : Inductance cyclique rotorique [H] ;

$l_s$  : Inductance de fuite statorique [H] ;

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique [H] ;

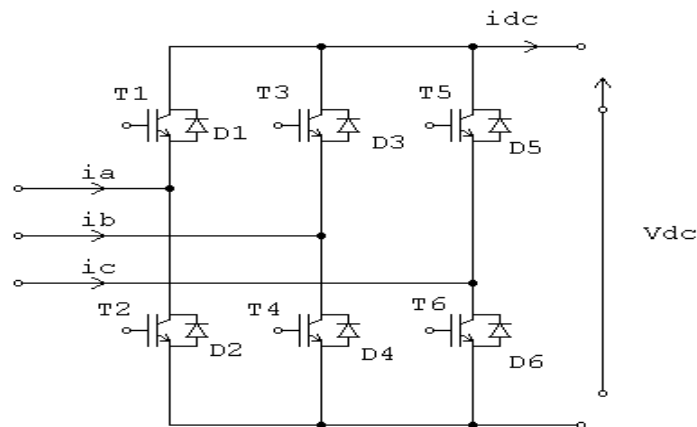
$M$  : Mutuelle inductance [H] ;

L'expression du couple en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques est donnée par:

$$T_{em} = \frac{P \cdot M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.21})$$

### II.3.6 Modélisation du redresseur MLI

Le redresseur est un convertisseur statique qui assure la transformation d'énergie d'une source alternative en énergie continu, comme le montre le schéma ci-dessous :



**Figure II.4** : Schéma du redresseur MLI

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

$$i_{dc} = S_a \cdot i_{sa} + S_b \cdot i_{sb} + S_c \cdot i_{sc} \quad (\text{II.22})$$

Avec

$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$  : Tensions de références [V] ;

$V_{dc}$  : Tension de bus continu [V] ;

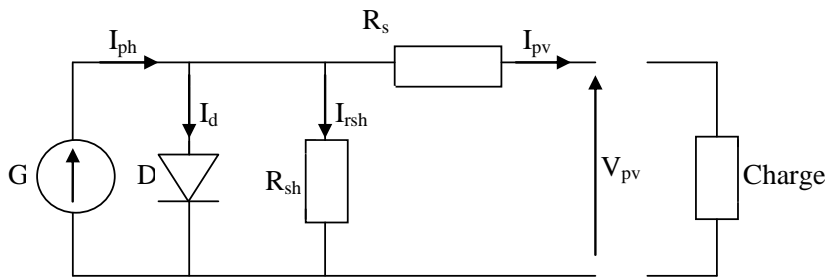
$i_{dc}$  : Courant modulé par le redresseur [A] ;

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'amorçage ;

## II.4. La chaîne de production photovoltaïque

### II.4.1. Modèle d'un panneau photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour simuler la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire (ou d'un panneau) [Rek 07]. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de cette caractéristique. Dans notre travail, nous avons retenu le modèle à une diode qui donne de très bonnes précisions [Lal 09]. Ce modèle est caractérisé par son schéma équivalent (figure II.5) :



**Figure II.5** : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

$G$  : Source de courant qui modélise la conversion de flux lumineux en énergie électrique ;

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule ;

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours ;

$D$  : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens ;

Nous obtenons alors l'équation du courant pour un module photovoltaïque déduite du schéma électrique équivalent de la figure (II.5):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{II.23})$$

$I_{pv}$  : Le courant délivré par le module ;

$I_d$ : Courant de diode ;

$I_{rsh}$  : Le courant shunt ;

$I_{ph}$  : Le photocourant ;

Le modèle utilisé est le modèle à une diode [Lal 09], le courant photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{sc} \left( 1 - K_1 (\exp K_2 V_{pv}^m - 1) \right) \quad (\text{II.24})$$

Dans cette équation, le courant  $I$  dépend des paramètres  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$  et de la tension aux bornes du générateur PV.

Les coefficients  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$  sont donnés par les équations suivantes :

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (\text{II.25})$$

$$K_3 = \ln \left[ \frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{ppm}}{K_1 I_{cc}} \right] \quad (\text{II.26})$$

$$K_4 = \ln \left[ \frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (\text{II.27})$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{ppm}}{V_{co}} \right]} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$K_1 = 0.01175$  ;

$I_{ppm}$  : Courant au point de puissance maximal [A];

$V_{ppm}$  : Tension au point de puissance maximal [V];

$I_{cc}$  : Courant de court circuit [A];

$V_{co}$  : Tension en circuit ouvert [V] ;

Il est à noter que l'équation (II.24) est applicable seulement dans les conditions standard de fonctionnement ( $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ). Quand la température et l'ensoleillement changent, le courant et la tension photovoltaïque changent selon les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.29})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left( \frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left( \frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc,stc} \quad (\text{II.30})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{II.31})$$

$$V_{nouv,pv} = V_{pv,stc} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.32})$$

$$I_{nouv,pv} = I_{pv,stc} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.33})$$

$G_{stc}, T_{stc}$ : Représentent respectivement le niveau d'éclairement et la température dans les conditions standards de fonctionnement ;

$G, T_c$ : Représentent respectivement le niveau de l'éclairement et la température dans les conditions quelconques ;

$\Delta T_c$ : Représentent la variation de la température ;

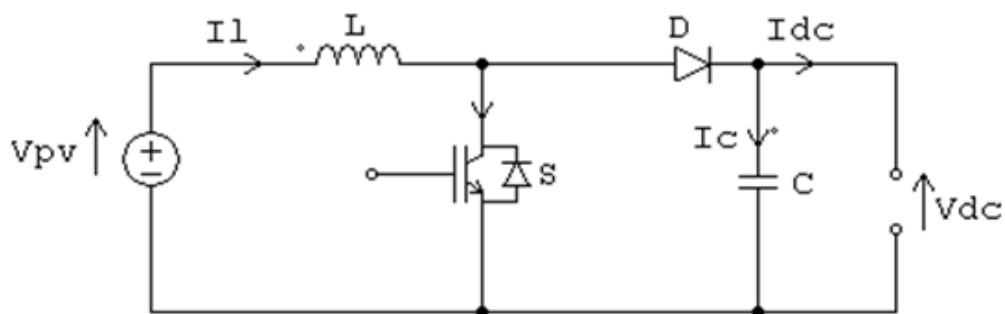
$\Delta V_{pv}, \Delta I_{pv}$  : Représentent respectivement la variation de la tension et du courant par rapport à l'ensoleillement et a la température ;

$\alpha_{sc}$  : Représente le coefficient d'incrémentement du courant  $I_{cc}$  [mA/°C] ;

$\beta_{oc}$  : Représente le coefficient d'incrémentement de la tension  $V_{co}$  [mV/°C] ;

#### II.4.2. Modèle d'un hacheur survolteur (boost)

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure (II.6) [Mel 10]. Ce dispositif de l'électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau PV à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale [Vec 05].



**Figure II.6:** Schéma électrique d'un hacheur boost.

En posant  $u = 1$  lorsque l'interrupteur  $S$  est fermé et  $u = 0$  pour  $S$  ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique.

Nous considérons ici les interrupteurs parfaits [Lal 09].

Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - u)V_{dc} \quad (\text{II.34})$$

$$(1 - u)I_L = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.35})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen  $\alpha$ . Son expression est donnée par l'équation (II.36). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique  $\alpha$  [Sin 10].

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.36})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \quad (\text{II.37})$$

Où  $\alpha$  est le rapport cyclique.

## II.5. Modèle du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et de produire de l'énergie réactive.

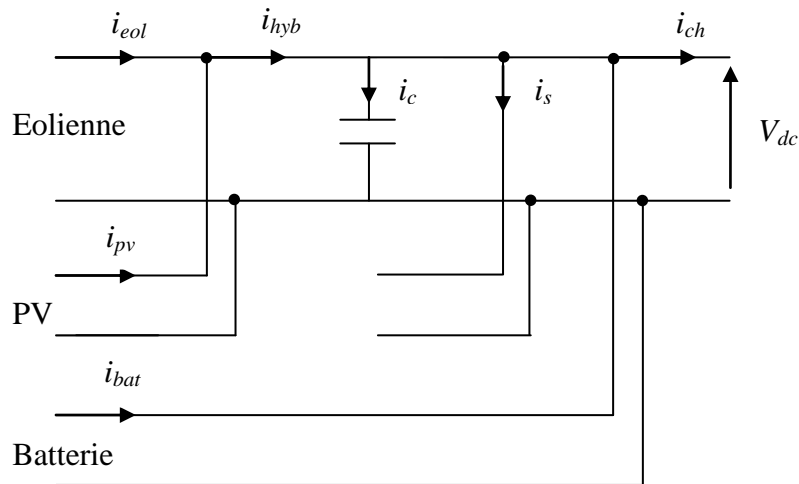


Figure II.7 : Schéma d'un bus continu.

D'après la figure (II.7), on a :

$$i_{hyb} = i_{eol} + i_{pv} \quad (\text{II.38})$$

$$i_{ch} = i_{hyb} - i_c - i_s \pm i_{bat} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt}$$

$i_{pv}$  : Courant fournie par le générateur photovoltaïque [A] ;

$i_{eol}$  : Courant fournie par le système éolien [A] ;

$i_c$  : Courant qui traverse la capacité [A] ;

$i_{hyb}$  : Courant produit par le système hybride éolien-PV [A] ;



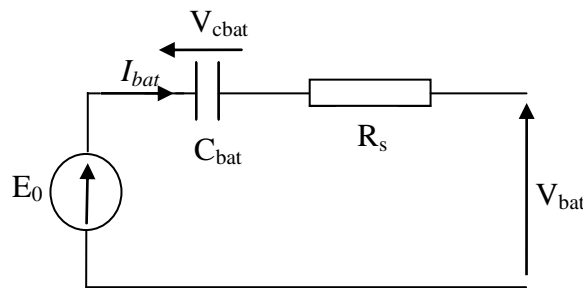
$i_s$  : Courant de délestage [A] ;

$i_{bat}$  : Courant de la batterie [A] ;

## II.6. Modèle de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, nous utiliserons pour notre étude, le modèle R-C dit aussi model simple, qui nécessite pas d'identifications expérimentales de paramètres empiriques nécessaires à l'emploi des autres modèles couramment utilisés, et qui permet également le choix d'un simulateur à pas fixe dont le pas de calcul est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le model R-C comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie  $C_{bat}$  et une résistance interne  $R_s$ .



**Figure II.8** : Modèle R-C de la batterie.

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.40})$$

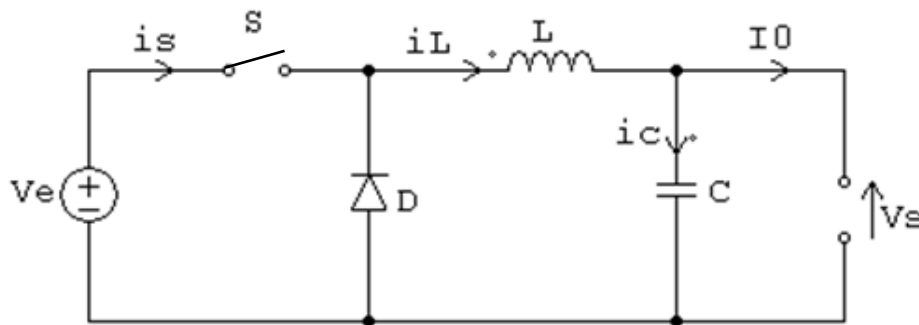
On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II.41})$$

Avec  $C_{bat}$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$  [Sin 10].

## II.7. Modèle du hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur buck sous sa forme de base est présenté par la figure (II.9). Ses principaux composants sont le commutateur (S), l'inductance (L), la diode (D) et le condensateur (C). Une fois le commutateur (S) fermé, le condensateur se charge et la tension est maintenue à ses bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui lui permet de se décharger à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement [Abb 11].



**Figure II.9 :** Circuit équivalent de base du hacheur dévolteur.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement.

La tension d'entrée ( $V_e$ ) doit être plus grande que la tension de sortie ( $V_s$ ). L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (\text{II.42})$$

$i_L$  : Le courant dans l'inductance ;

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Dans le premier laps de temps ( $\alpha.T$ ) le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance (L) se charge d'énergie avec augmentation du courant  $I_L$ . Dans le deuxième laps de temps  $(1-\alpha)T$ , l'inductance (L) libère cette énergie à la charge.

En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par :

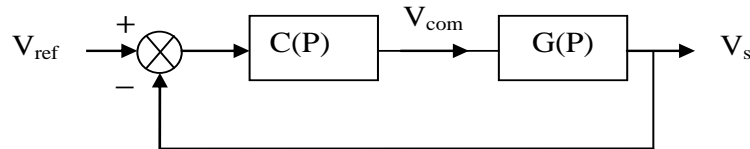
$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_s}{L} \quad (\text{II.43})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (\text{II.44})$$

### II.7.1. Asservissement de la tension

Le schéma fonctionnel du système asservi en tension est représenté par la figure suivante :



**Figure II.10** : Schéma fonctionnel de la boucle de tension.

$V_{ref}$  : La tension continue de référence ;

$V_e$  : La tension d'entrée du hacheur ;

$C(P)$  : La fonction de transfert du correcteur (P ou PI) ;

$G(P)$  : La fonction de transfert du hacheur équivalent en petit signaux ;

#### - La fonction de transfert du convertisseur Buck

$$G(P) = \frac{V_s}{\alpha} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{R}P + \sqrt{LC}P^2} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$$C = 500 \text{ e}^{-6} \text{ F};$$

$$L = 100 \text{ e}^{-3} \text{ H};$$

$$R = 0.1 \text{ } \Omega \text{ ;}$$

### II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question de définir les différents modèles utilisés pour la modélisation du système hybride, soit le modèle de l'éolienne, celui des panneaux PV, des batteries et des convertisseurs. Les différentes sources de ce système sont connectées sur un bus à courant continu. La conception de ces modèles sous l'environnement MATLAB/Simulink nous permettra par la suite de simuler le comportement du système globale.

# **Chapitre III**

## **Simulation des systèmes éolien et PV avec stockage**

### III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les bases qui ont permis de développer sous l'environnement MATLAB/Simulink, les modèles de simulation de tous les composants du système hybride.

Dans ce chapitre, nous évaluerons les performances du système de stockage, ainsi que l'efficacité des stratégies de commandes permettant aux sources d'énergie renouvelable d'optimiser le rendement énergétique, raison pour laquelle on a étudié les deux structures hybride séparément (système éolien avec stockage et photovoltaïque avec stockage).

Pour étudier n'importe quel système, le niveau de modélisation et l'outil de simulation sont très important. Entre la dynamique rapide de commutation du transistor qui est de l'ordre de  $1\mu s$  et une constante de temps électrique d'une batterie électrochimique, il existe un rapport supérieur à  $10^6$ . Un simulateur à pas variable semble donc bien adapté à cette exigence en termes de rapidité au dépit de la précision. Cependant, il est très difficile de relever une telle exigence sur plusieurs dizaines de secondes. La solution à cela c'est l'utilisation du modèle de batterie R-C qui nous permet de simuler à pas fixe avec un pas de calcul adapté à la période de découpage des convertisseurs. Grâce à l'utilisation de ce modèle et en considérant les pertes dans les convertisseurs négligeables, on obtient un gain de temps par un changement d'échelle du temps. Ainsi, une simulation sur une seconde correspond à une simulation sur une heure [Sin 10].

### III.2. Présentation des systèmes hybrides et validation du changement d'échelle

#### III.2.1. Changement d'échelle de temps

En imposant un pas de calcul de l'ordre du temps de commutation des interrupteurs, le temps de calcul d'une simulation de quelques heures serait de plusieurs jours. Cette contrainte nous oblige à procéder à un changement d'échelle du temps en faisant correspondre la seconde à l'heure, en supposant les pertes dans les convertisseurs négligeables. Cependant nous sommes obligés d'adapter la constante de temps des batteries au changement d'échelle du temps.

D'après le modèle R-C de la batterie présenté dans § II.6, la capacité (Ah) est modélisée par  $C_{bat}$  dont la valeur est donnée par l'expression suivante [Sin 10] :

$$Q_{bat} = i_{bat} \cdot t \quad (III.1)$$

$$C = \frac{Q_{bat}}{V} \quad (III.2)$$

Avec :

$Q_{bat}$  : La quantité de charge électrique en Coulomb [C];

$i_{bat}$  : Le courant à travers la capacité [A];

$t$  : Le temps de fonctionnement [s];

$C$  : La valeur de la capacité en Farad ;

$V$  : La différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie allant de 0% à 100%. On considère  $\Delta V=2V$  pour une batterie au plomb de 12V.

Dans notre application, on a utilisé 40 batteries en série ce qui donne pour l'ensemble des batteries  $\Delta V=80V$ , la fem  $E=440V$  et  $R=0.08\Omega$  [Sin 10].

Sachant que la valeur de la capacité en farad d'une batterie de 480V (40 batteries de 12V mises en série) est de 11700F ( $3.25 \times 3600 = 11700$ ) sans changement d'échelle, elle est de 3.25F avec changement d'échelle.

Afin de valider la stratégie de changement d'échelle, nous procéderons aux simulations suivantes, avec et sans changement d'échelle. Le but est d'effectuer une charge puis une décharge de la batterie à courant constant ( $I=26A$ ). Sachant que ce changement d'échelle permet d'équivaloir une heure de simulation à une seconde de simulation [Sin 10].

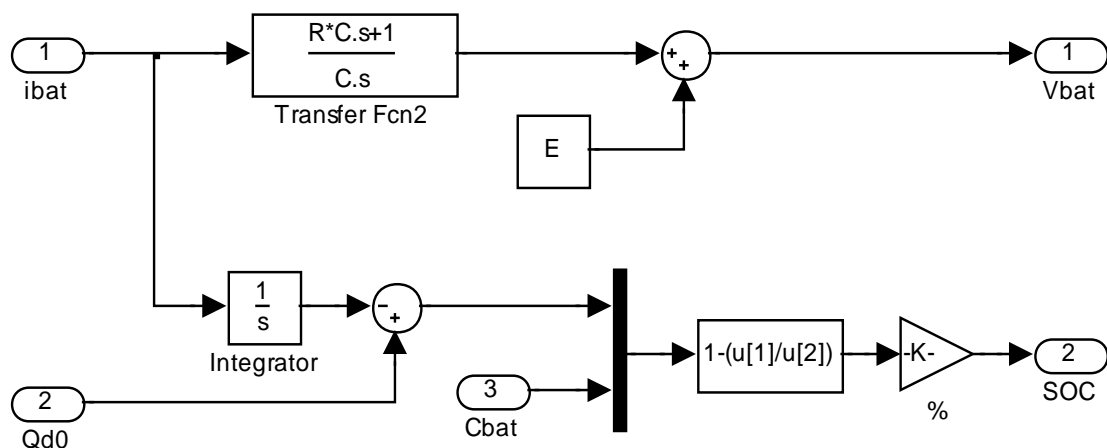


Figure III.1 : Mise en œuvre du modèle R-C sous Matlab-Simulink

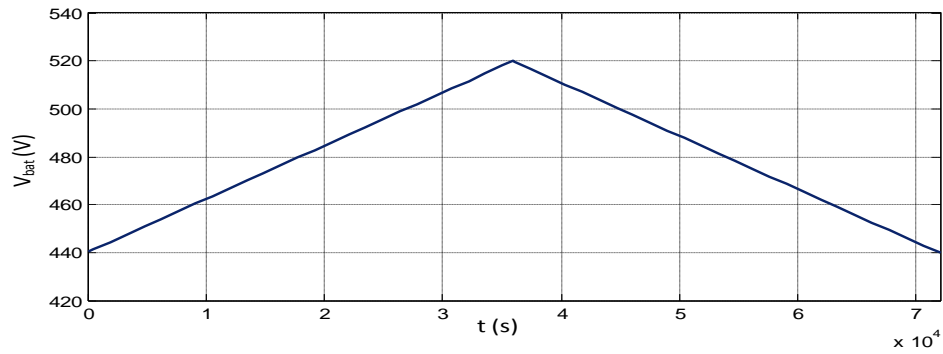


Figure III.2 : Tension de la batterie sans changement d'échelle (pas variable)

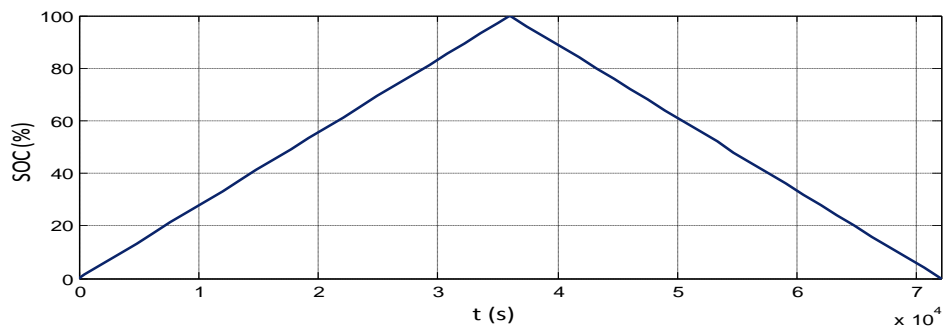


Figure III.3 : Etat de charge de la batterie sans changement d'échelle (pas variable)

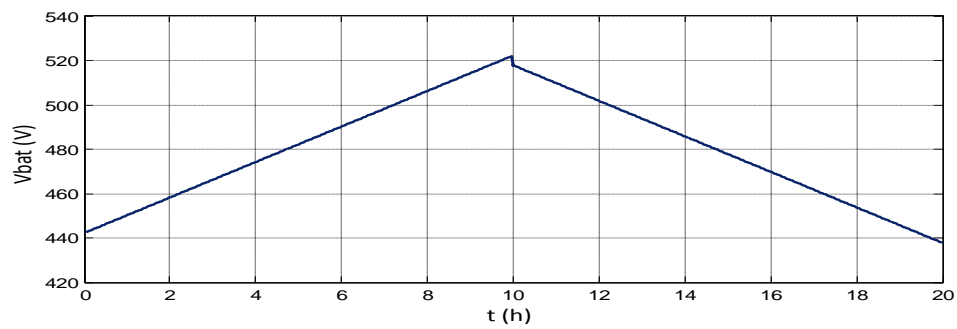


Figure III.4 : Tension de la batterie dans le cas d'un changement d'échelle (pas de simulation de  $5.10^{-5}$  s)

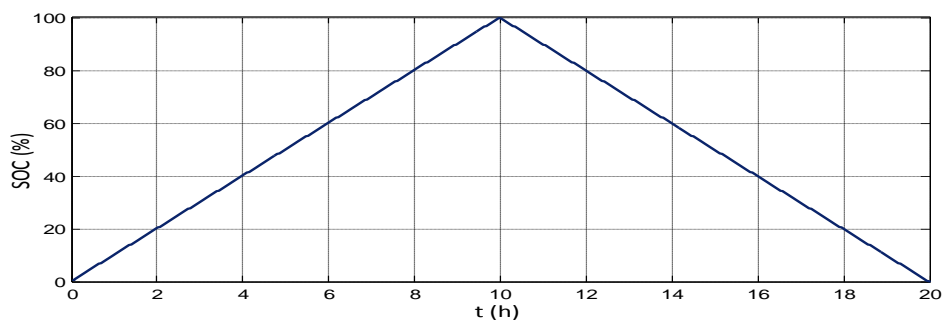


Figure III.5 : Etat de charge de la batterie dans le cas d'un changement d'échelle (pas de simulation de  $5.10^{-5}$  s)

D’après les figures obtenues, nous remarquons que l’évolution des courbes est la même, à la différence du temps de simulation. Ce qui valide le principe du changement d’échelle.

### III.2.2. Présentation du modèle du système éolien avec stockage

Nous faisons une simulation du système éolien associé au système de stockage électrochimique. Le couple électromagnétique appliqué permet un fonctionnement à puissance maximale. Le schéma bloc réalisé sous Matlab /Simulink est donné par la figure (III.6) :

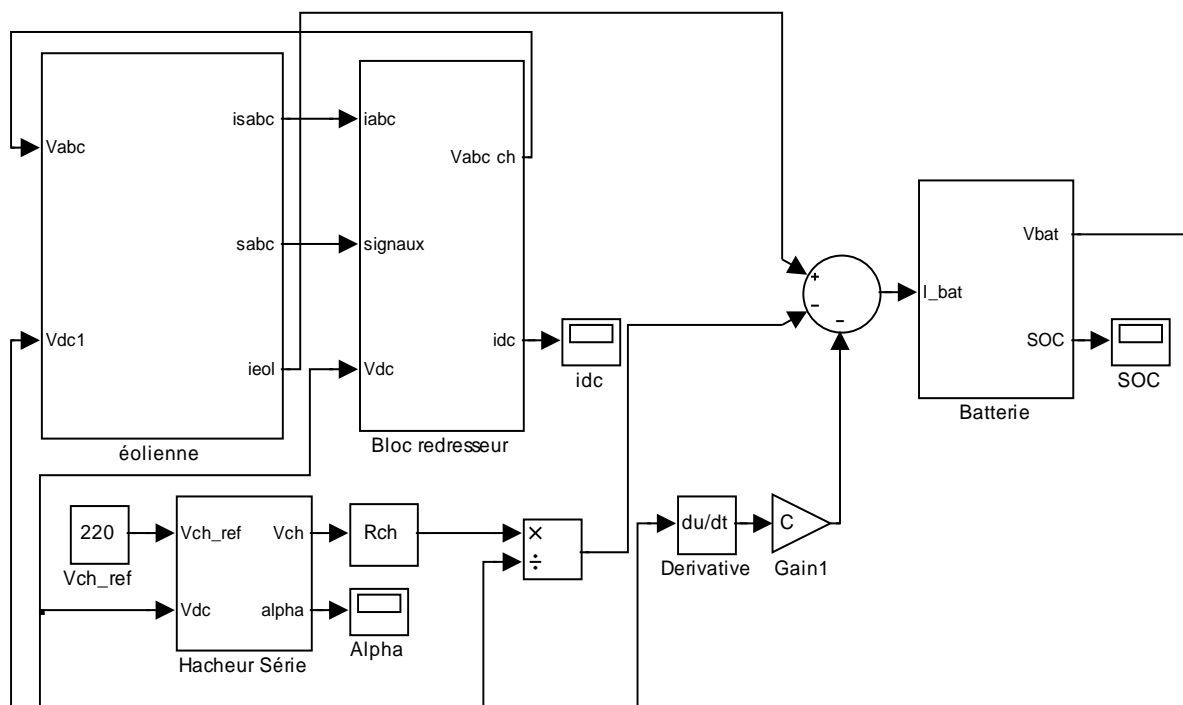


Figure III.6 : Schéma Matlab/Simulink du système éolien avec stockage

#### III.2.2.1. La commande vectorielle utilisée

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus fréquent est celui des courants et donc du couple, puisque le couple peut s’écrire directement en fonction des courants :

$$T_{em} = p \cdot M \cdot (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \tag{III.4}$$

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d’une machine à courant continu à excitation séparée où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée.



La commande vectorielle vient donc régler ce problème de découplage des réglages du flux et du couple à l'intérieur de la machine.

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [Idj 10].

Nous avons déjà vu dans l'équation (II.21) que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère d-q comme suit :

$$T_{em} = \frac{P \cdot M}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds})$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit  $\Phi_{qr} \cdot i_{ds}$ , alors le couple ressemblerait fort à celui d'une MCC à excitation séparée. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire de bien choisir l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir  $\Phi_{qr} = 0$ . Ainsi  $\Phi_r = \Phi_{dr}$ .

Lorsque le champ rotorique est orienté, le comportement de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

$$T_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot i_{qs} \tag{III.5}$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \tag{III.6}$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \cdot \Phi_r \tag{III.7}$$

A partir de la relation (III.6), on obtient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \tag{III.8}$$

A partir de la relation (III.7), on obtient :

$$\Phi_r = -\frac{R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \tag{III.9}$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer  $\Phi_r$  mesurer le couple électromagnétique et calculer la pulsation statorique  $\omega_s$ .

On a :

$$\Phi_{rd} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{rd} = \Phi_r \Rightarrow i_{rd} = \frac{\Phi_r - M \cdot i_{ds}}{L_r} \tag{III.10}$$

$$\Phi_{rq} = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{rq} = 0 \Rightarrow i_{rq} = \frac{-M \cdot i_{qs}}{L_r} \tag{III.11}$$

On remplace (II.10) dans (III.8) on obtient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \left( \frac{\Phi_r - M \cdot i_{ds}}{L_r} \right) \Rightarrow \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M \cdot i_{ds}$$

Donc :

$$\Phi_r = \frac{M \cdot i_{ds}}{1 + T_r \cdot S} \quad (III.12)$$

On remarque que le flux  $\Phi_r$  peut être estimé à partir du courant  $i_{ds}$ , grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.13)$$

Avec :

$T_r$  : Constante de temps rotorique ;

S : opérateur de dérivation ;

Dans l'équation (III.9), on remplace  $i_{rq}$  par sa valeur en (III.11). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{sq}}{\Phi_r \cdot T_r} \quad (III.14)$$

Sachant que :  $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$

$$\omega_s = \frac{M \cdot i_{sq}}{\Phi_r \cdot T_r} + p \cdot \Omega$$

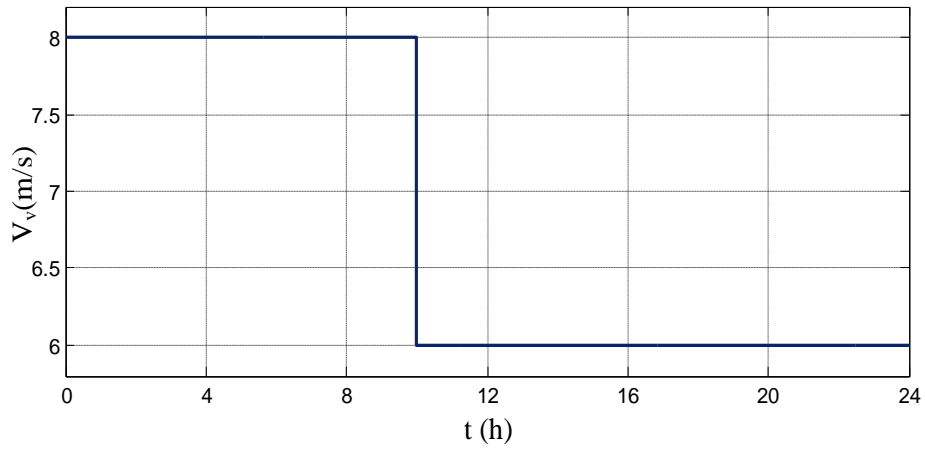
(III.15)

### III.2.2.2. La commande MPPT classique appliquée à l'éolienne

Afin de maximiser la puissance électrique générée, on a fait le choix d'utiliser une commande classique très répondeue, avec connaissance de la caractéristique de la voilure éolienne  $C_p = f(\lambda)$  et sans asservissement de la vitesse de la turbine qui nous permet de nous rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide de mesures simples, qui ne nécessite pas l'utilisation d'un capteur de vitesse du vent. Le couple électromagnétique de référence appliqué est donné par la relation (I.3).

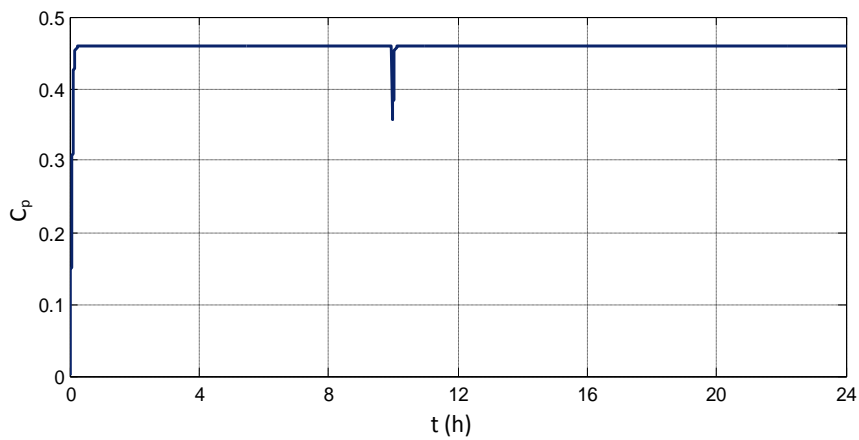
### III.2.2.3. Résultats de simulation

Cette simulation est réalisée pour tester l'efficacité de la commande vectorielle sur le modèle de l'éolienne au niveau de la boucle du flux et celle du couple. Le profil de vent utilisé pour cette simulation est présenté dans la figure (III.7).

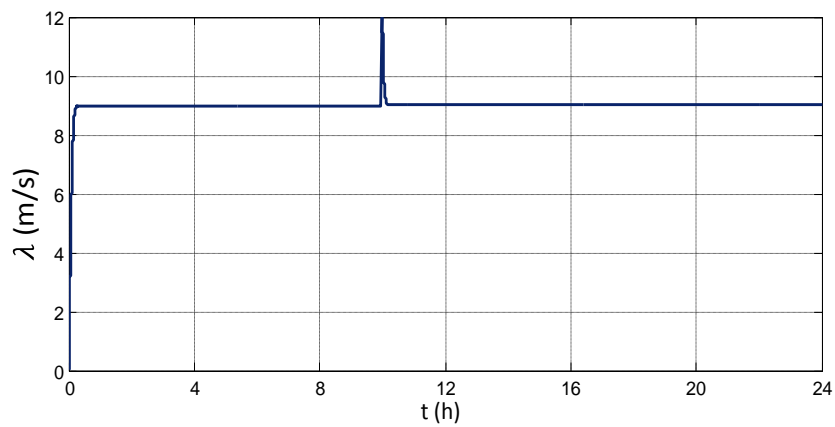


**Figure III.7 :** Profil de la vitesse du vent

Les figures (III.8), (III.9) montrent respectivement les allures temporelles du coefficient de puissance  $C_p$  et de la vitesse relative  $\lambda$ .

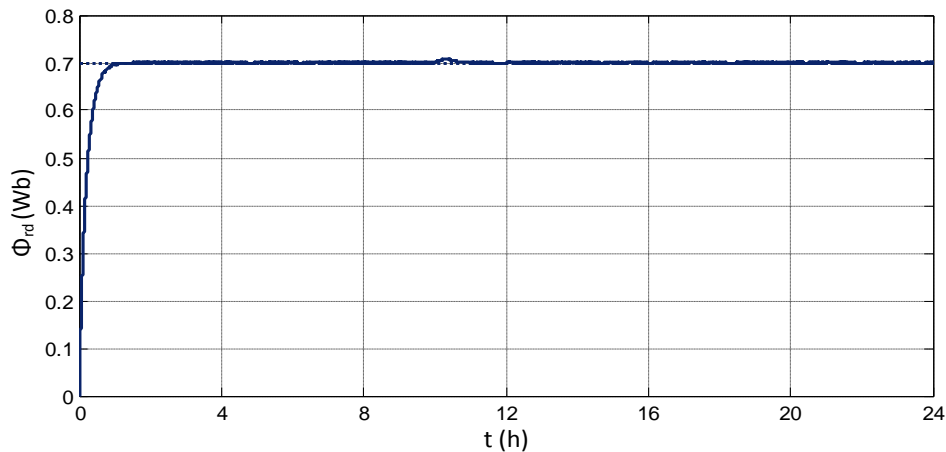


**Figure III.8 :** Coefficient de puissance  $C_p$



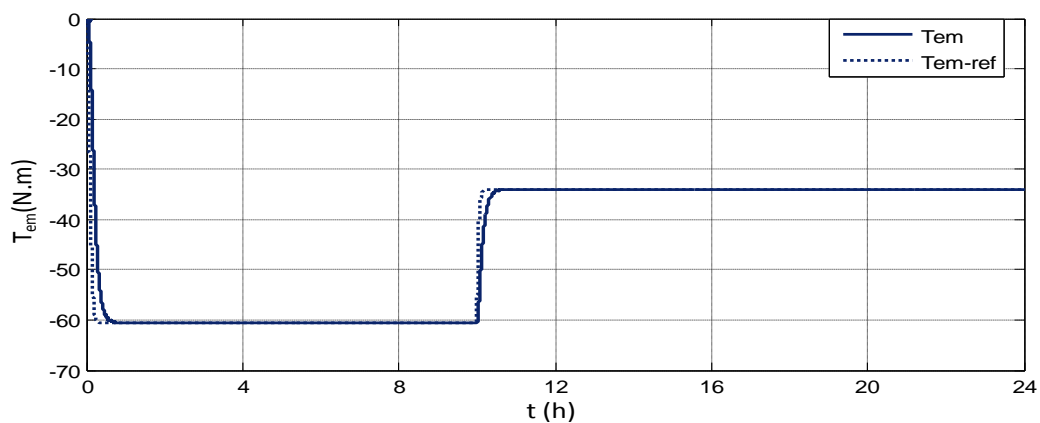
**Figure III.9 :** Vitesse relative  $\lambda$

La figure (III.10) montre l'allure temporelle de la réponse du flux rotorique  $\Phi_{rd}$  estimé à une consigne du flux rotorique de 0.7Wb. On voit que la dynamique désirée est respectée ; que l'erreur en régime permanent est nulle et que la réponse en boucle fermée présente un court délai.



**Figure III.10** : Flux rotorique

La figure (III.11) montre l'allure temporelle de la réponse du couple électromagnétique désiré à une consigne de couple imposée par une MPPT appliquée à l'éolienne. On voit que le couple électromagnétique est bien régulé et s'adapte à chaque variation de la consigne.



**Figure III.11** : Couple électromagnétique

Sur les figures (III.12), (III.13) sont représentées respectivement les allures des courants statoriques  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ , et de la vitesse mécanique de la machine. On constate que la vitesse de la machine électrique suit les variations de la composante  $i_{sq}$  du courant statorique, associée au couple optimal, pendant que la composante  $i_{sd}$  reste pratiquement constante étant donné que la référence du flux est fixe.

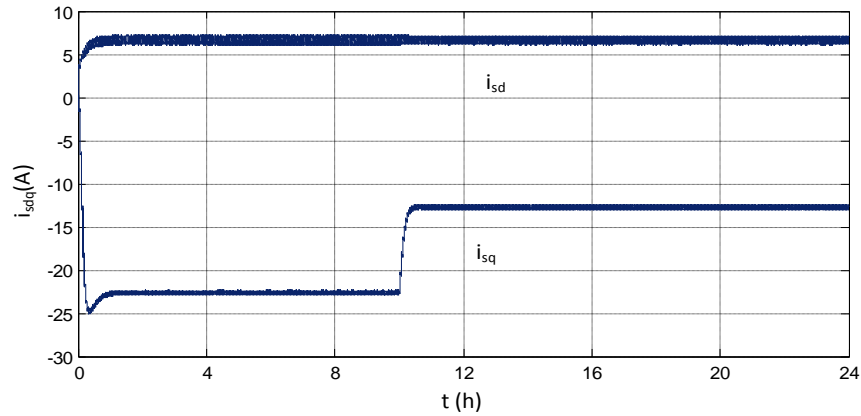


Figure III.12 : Courants statoriques  $i_{sdq}$

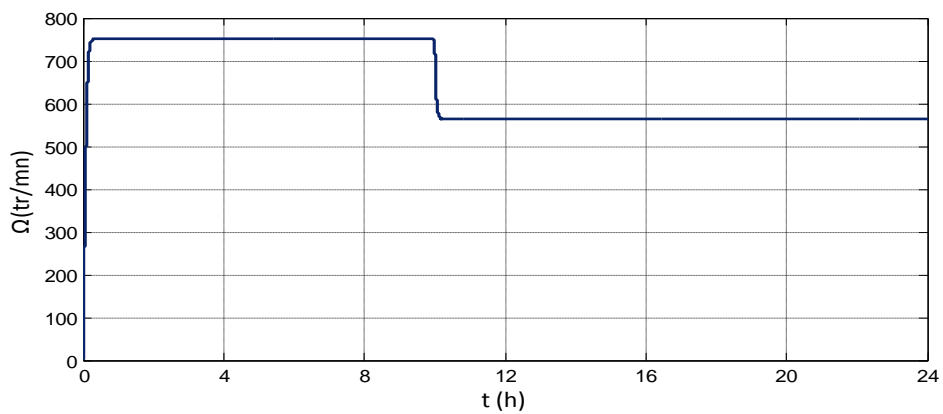


Figure III.13 : Vitesse mécanique de la machine

Les figures (III.14), (III.15) montrent les allures temporelles des courants statoriques. Sans le zoom on remarque une variation brusque du courant statorique suite à la variation de  $i_{sq}$ . Avec le zoom on voit clairement l'aspect sinusoïdal de ces courants.

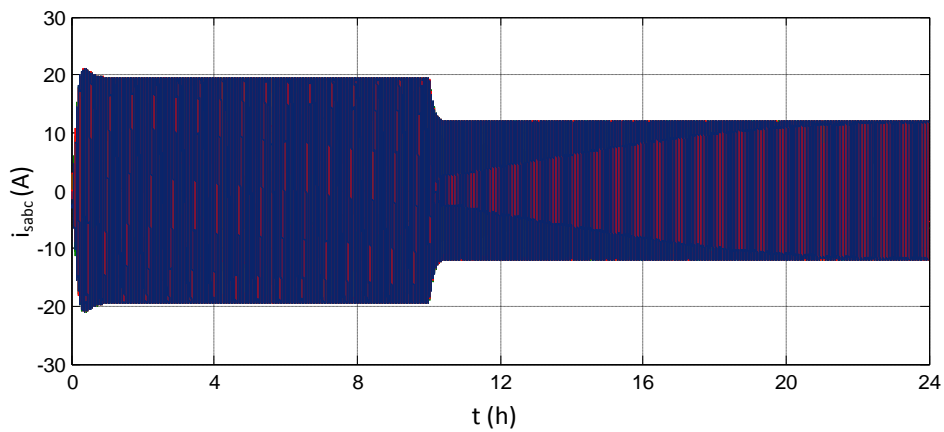


Figure III.14 : Courants statoriques  $i_{sabc}$  sans zoom

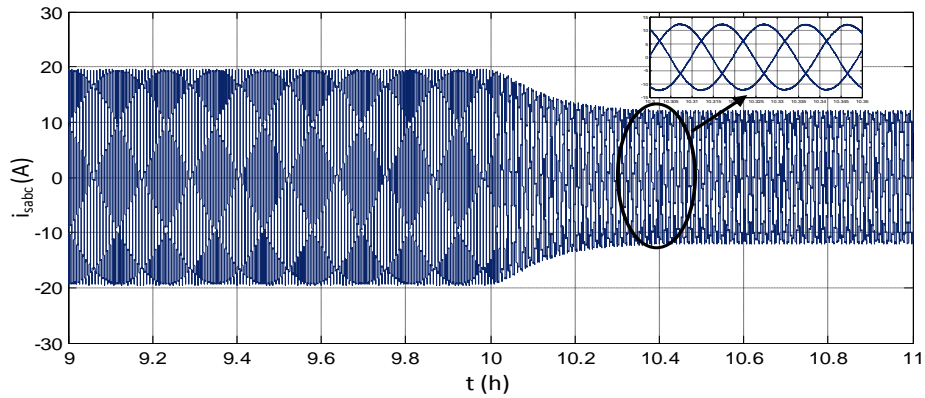


Figure III.15 : Courants statoriques  $i_{sabc}$  avec zoom.

Les figures (III.16), (III.17) montrent les allures temporelles de la puissance et du courant débité par l'éolienne. L'évolution de l'allure de la puissance fournie par l'éolienne est la même que celle du couple électromagnétique du fait que  $P_{eol} = T_{em} \cdot \Omega$

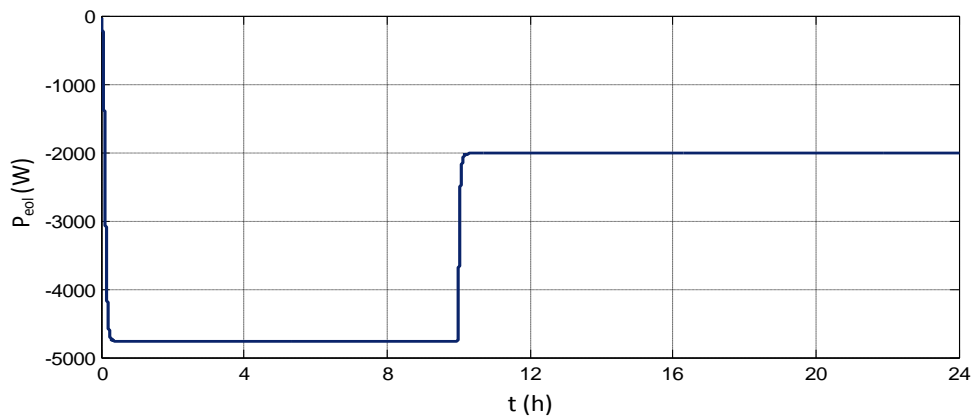


Figure III.16 : Puissance débitée par l'éolienne

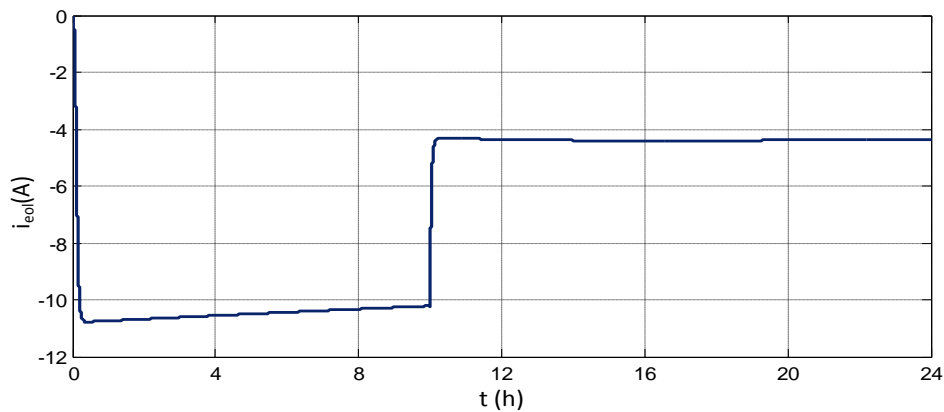


Figure III.17 : Courant débité par l'éolienne

Les figures(III.18), (III.19) montrent les allures temporelles de la tension aux bornes de la batterie, ainsi que son état de charge. La batterie est initialement chargée à 55%. On remarque que ces deux allures évoluent de la même façon.

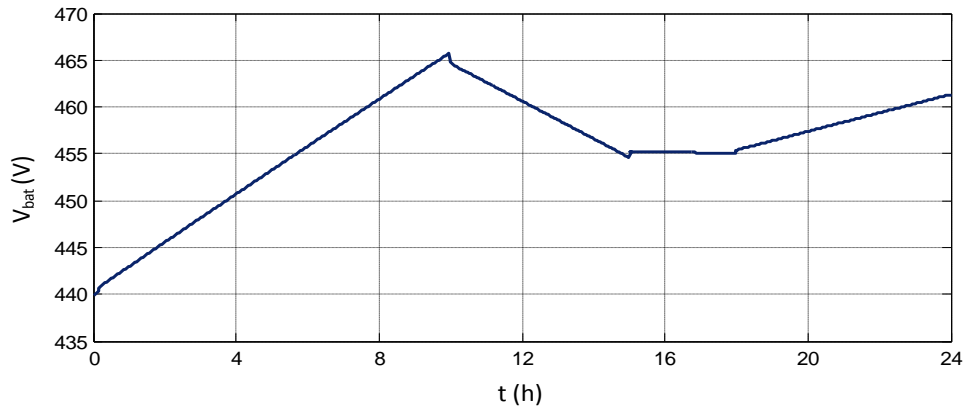


Figure III.18 : Tension aux bornes de la batterie

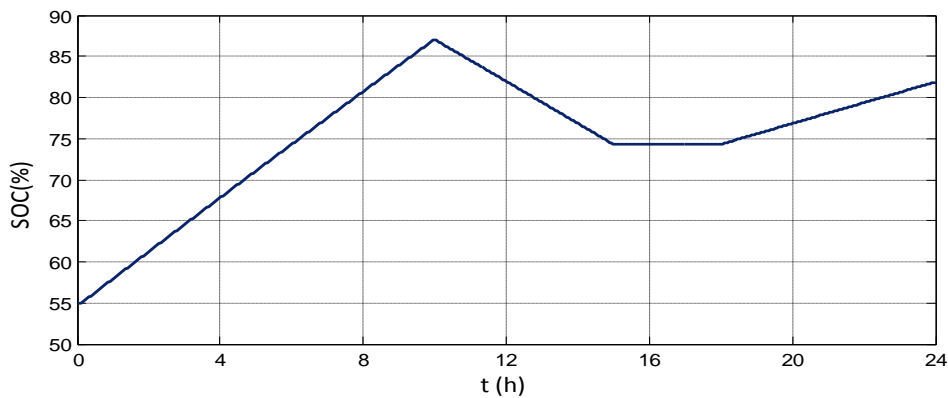


Figure III.19 : Etat de charge de la batterie

La figure (III.20) montre l'allure temporelle du courant qui débite sur la capacité du bus continu. On remarque l'apparition de très légers piques de courant durant la variation de la tension du bus continu imposée par la batterie. Sinon ce courant est nul ailleurs.

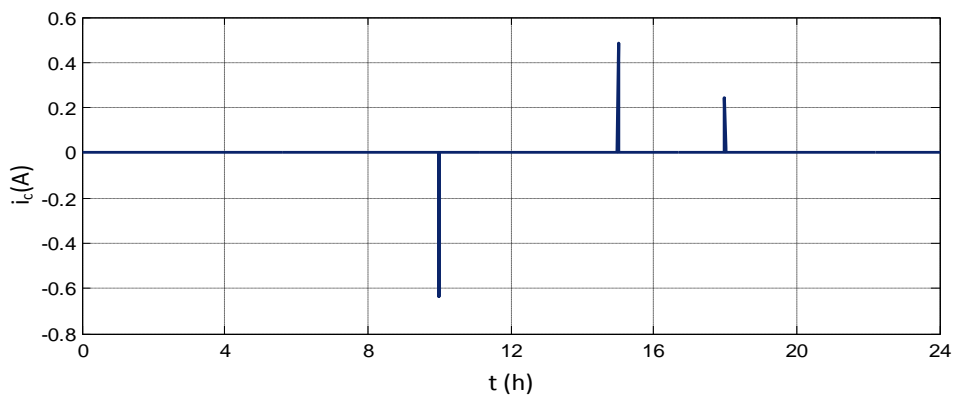


Figure III.20 : Courant débitant sur la capacité du bus continu

Les figures (III.21), (III.22) montrent les allures du profil de la puissance demandée par la charge ainsi que le courant à l'entrée du convertisseur buck ( $i_{ch}$ ). On remarque que l'allure du courant est presque identique à celle de la puissance, mis à part une légère différence due à la variation de la tension de bus continu.

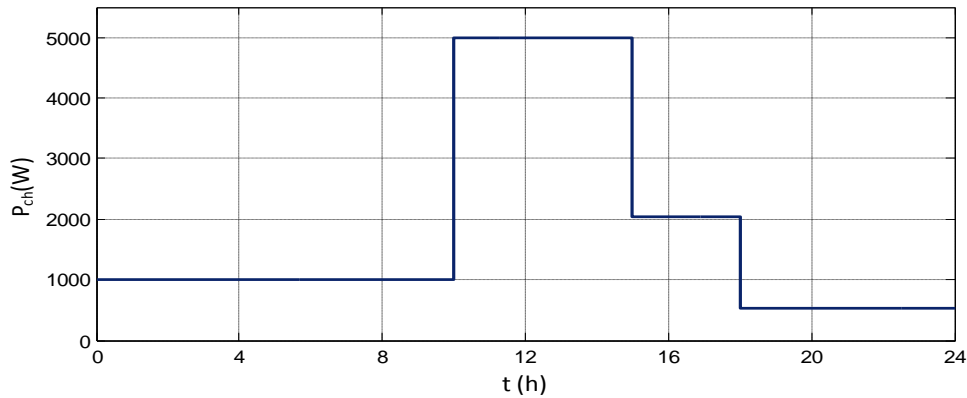


Figure III.21 : Profil de la charge

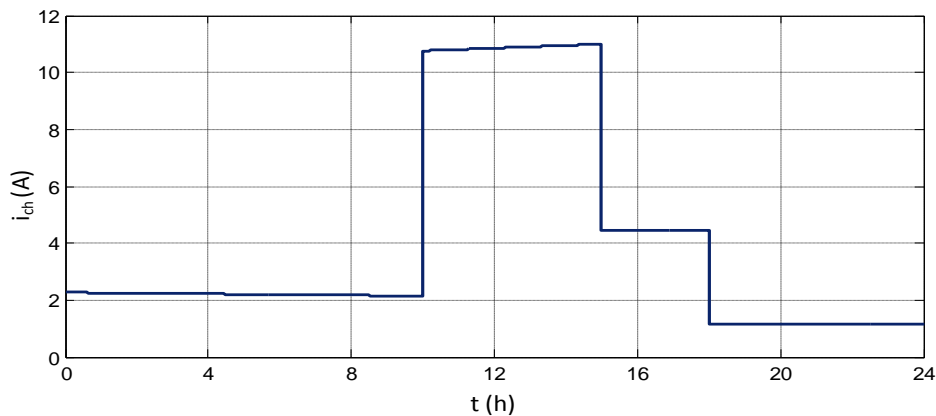


Figure III.22 : Courant débité sur la charge

### III.2.3. Présentation du modèle du système photovoltaïque avec stockage

Le modèle des panneaux photovoltaïque et leur convertisseur à pilotage MPPT (P&O), ainsi que le modèle de la batterie sont tous interconnectés et présentés sur le schéma de la figure (III.23).



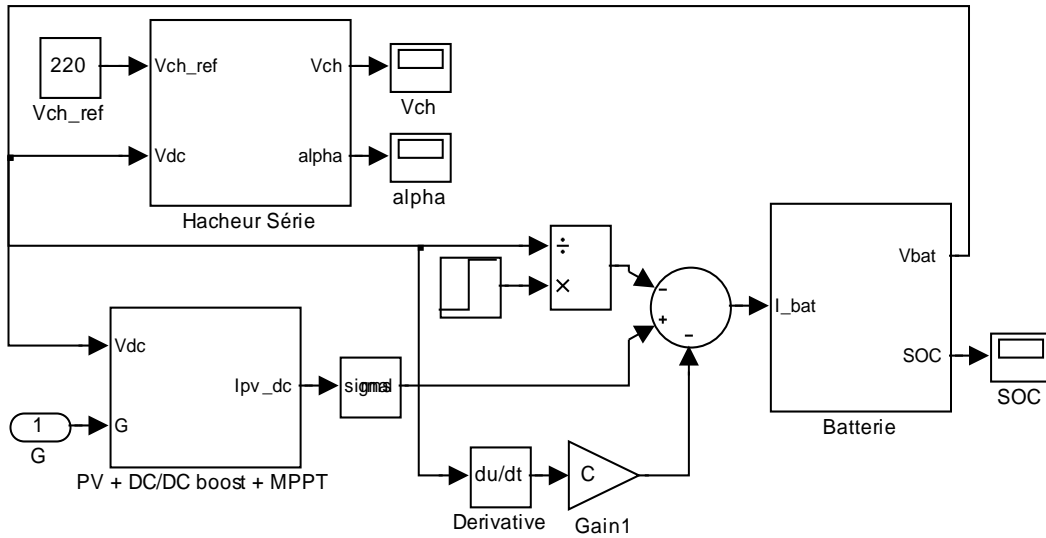


Figure III.23 : Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque avec stockage

### III.2.3.1. La commande P&O utilisée pour piloter le convertisseur DC/DC boost

Afin d’optimiser le convertisseur DC/DC et ainsi extraire un maximum de puissance du générateur PV on a eu recours à la commande P&O largement utilisée de par sa facilité d’implémentation, et son rendement élevé qui est de l’ordre de 96.5% [Hoh 03], elle permet de suivre le point de puissance maximale en s’affranchissant de la connaissance de la caractéristique du générateur photovoltaïque [Abb 11].

### III.2.3.2. Résultats de simulation du système photovoltaïque sans MPPT

Notre générateur photovoltaïque (GPV) est composé de quatre branches en parallèles dont chacune contient sept panneaux en séries. Les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  du GPV sont obtenues par :

$$I_{pv} = N_p \cdot I$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V$$

$$P_{pv} = N_s \cdot N_p \cdot P$$

Avec:

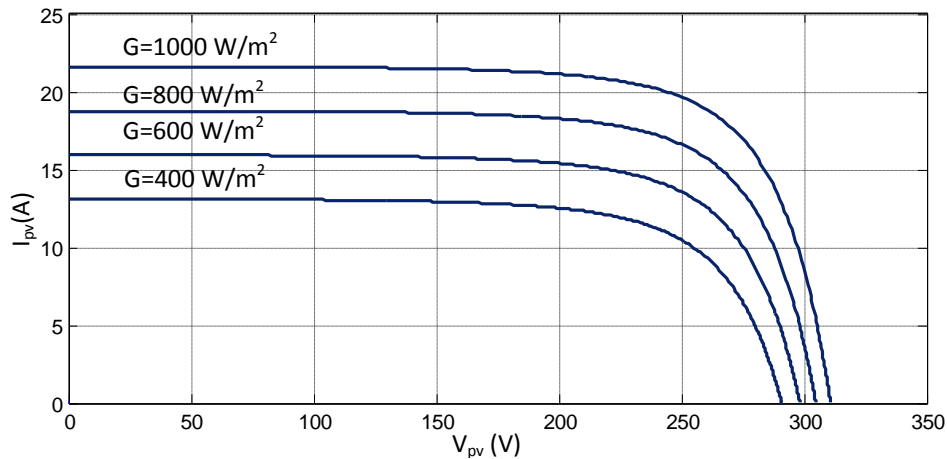
$N_p$ : Le nombre de modules en parallèles ;

$N_s$ : Le nombre de modules en séries ;

Pour constater l’influence des conditions externes, à savoir l’éclairement (G) et la température (T) sur les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$ , nous avons procédé à différents tests.

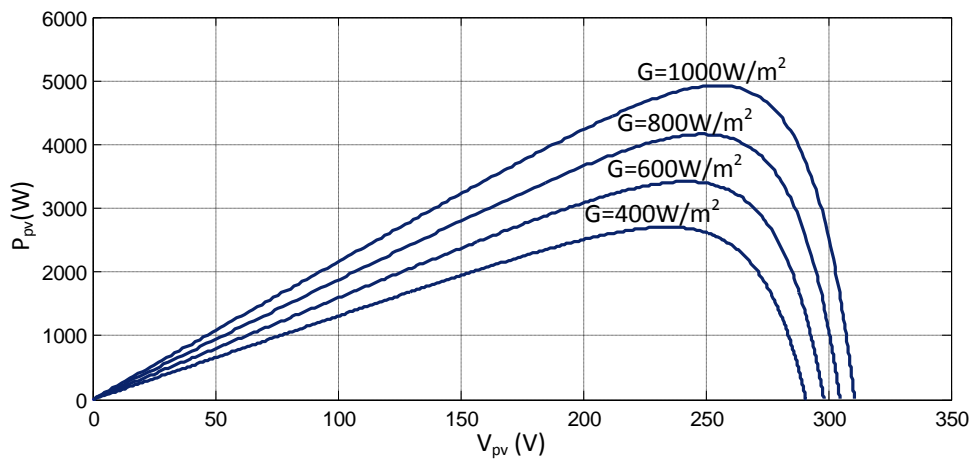
- Influence de l'éclairement

Afin de visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante à  $T=25^{\circ}\text{C}$ , et on fait varier l'éclairement de 400 à  $1000\text{W}/\text{m}^2$  avec un pas de 200, les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  sont représentées sur les figures qui suivent :



**Figure III.24 :** Caractéristique courant-tension pour différents éclairements

On remarque d'après la figure (III.24) une forte diminution du courant de court-circuit et une faible diminution de la tension du circuit ouvert lorsque l'éclairement diminue .



**Figure III.25 :** Caractéristique puissance-tension pour différents éclairements

D'après la figure (III.25) on déduit que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque.

• Influence de la température

Pour un éclairement constant de  $1000\text{W/m}^2$ , on fait varier la température de  $0^\circ\text{C}$  à  $75^\circ\text{C}$  avec un pas de 25, les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  sont représentées dans les figures qui suivent :

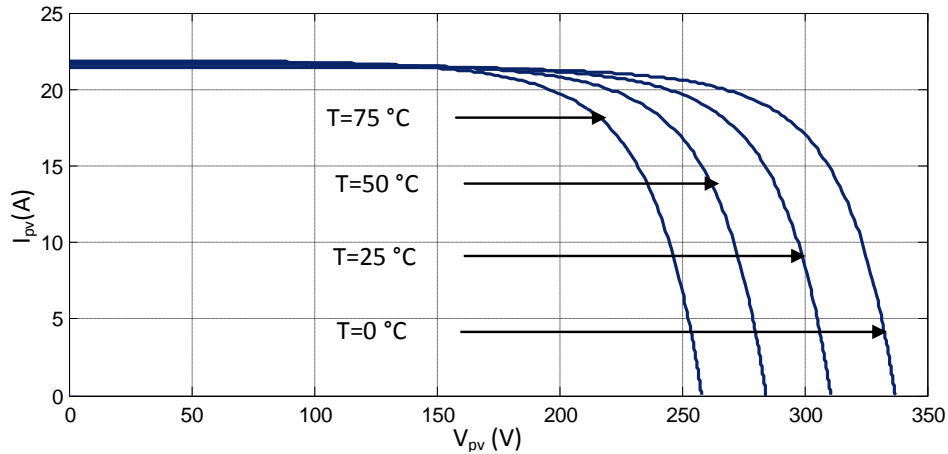


Figure III.26 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures

On constate d’après la figure (III.26) que l’augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert, contrairement au courant de court-circuit qui reste inchangé.

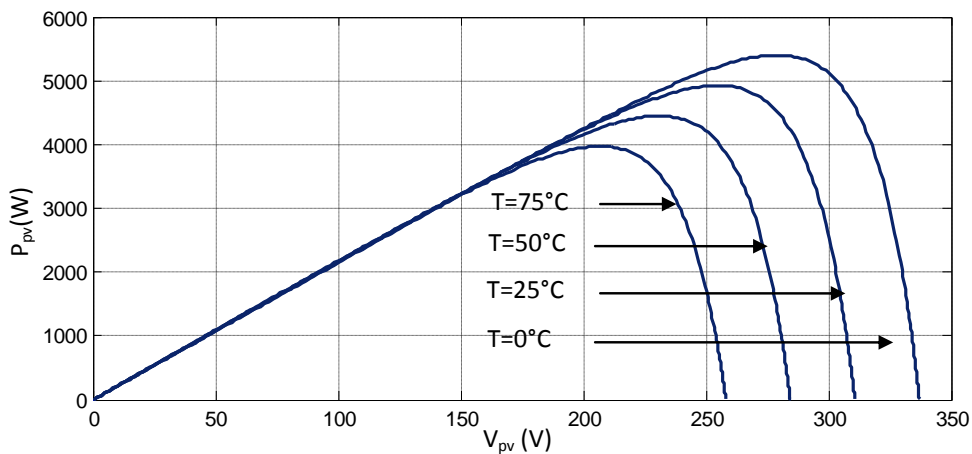
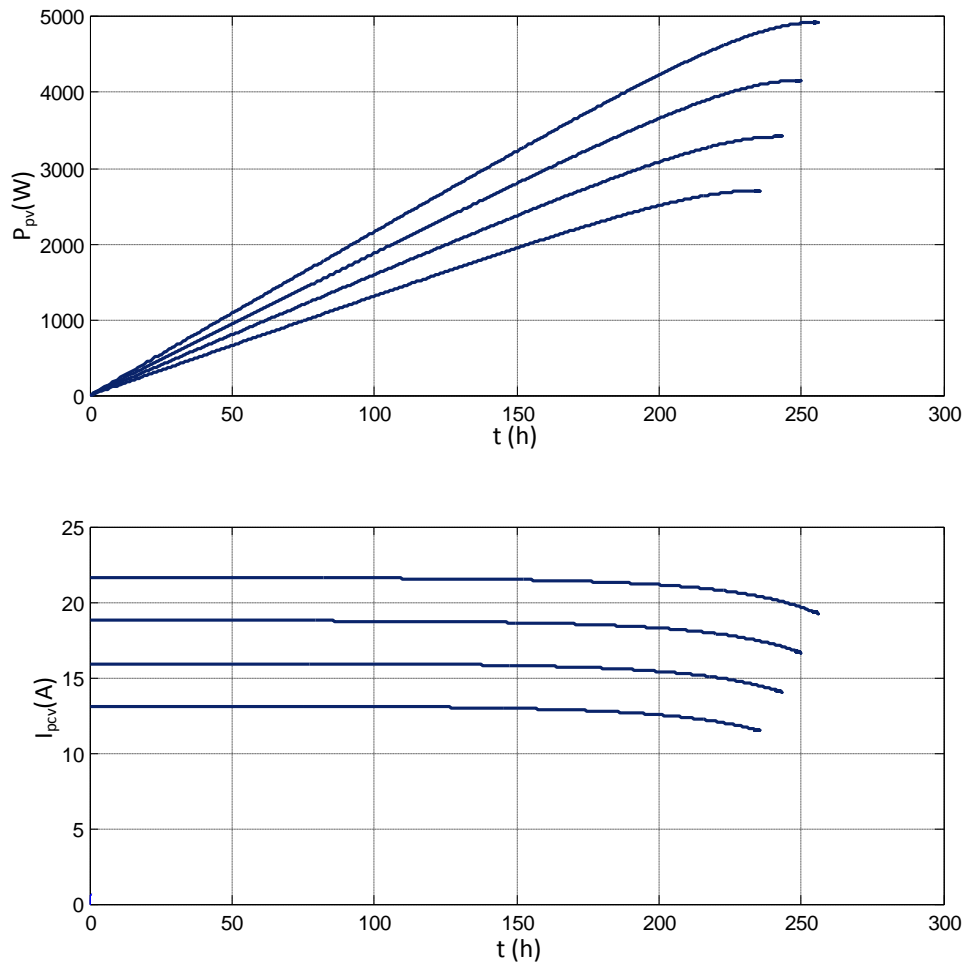


Figure III.27 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures

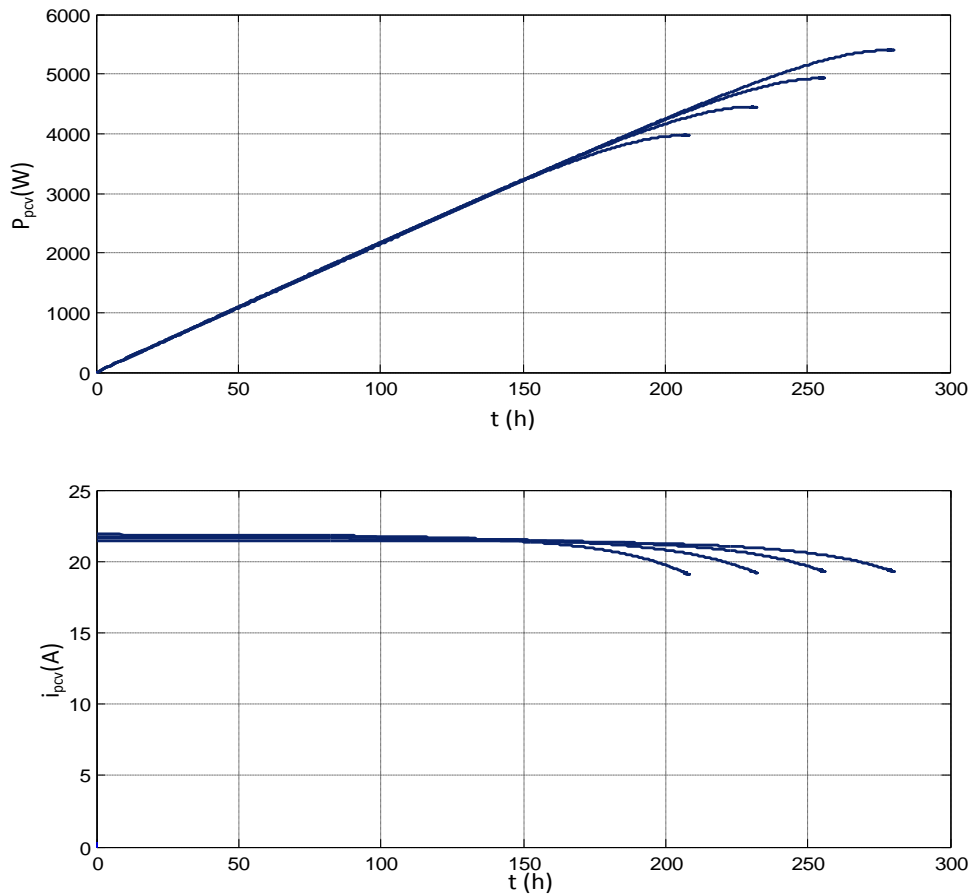
D’après la figure (III.27), on voit que l’augmentation de la température fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du générateur PV.

### III.2.3.3. Résultats de simulation du système photovoltaïque avec stockage

Afin d'évaluer l'efficacité de l'algorithme MPPT utilisé dans le système de conversion photovoltaïque avec stockage, vis-à-vis des perturbations induites par les variations de l'éclairement et de la température nous avons procédé à différents tests.



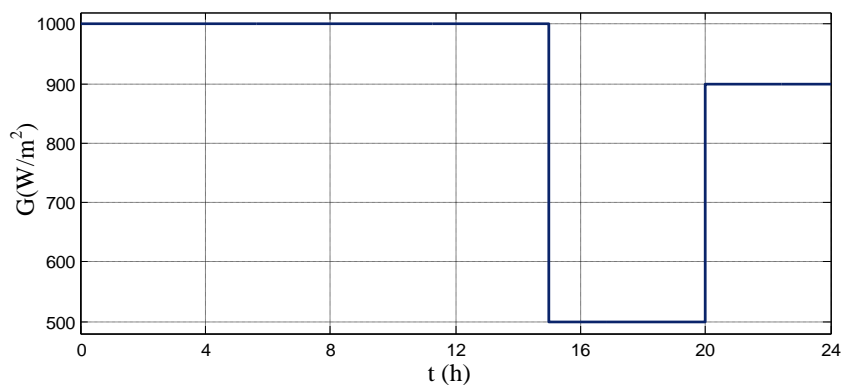
**Figure III.28 :** Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )



**Figure III.29 :** Réponse de l’algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $G=1000W/m^2$ )

Pour les deux tests on remarque toujours une convergence de la puissance vers le point de puissance maximal (PPM), le courant converge également vert un point qui correspond à la valeur de la puissance maximal.

Pour les simulations qui vont suivre nous avons définis un profil d’éclairement dont l’allure est présentée dans la figure (III.30).



**Figure III.30 :** Profil de l’éclairement

Pour cet essai, la température est gardée constante à 25°C, seul l'éclairement varie. Comme on peut le voir dans la figure (III.31), l'évolution de l'allure du courant débité par le générateur PV suit l'allure du profil d'éclairement.

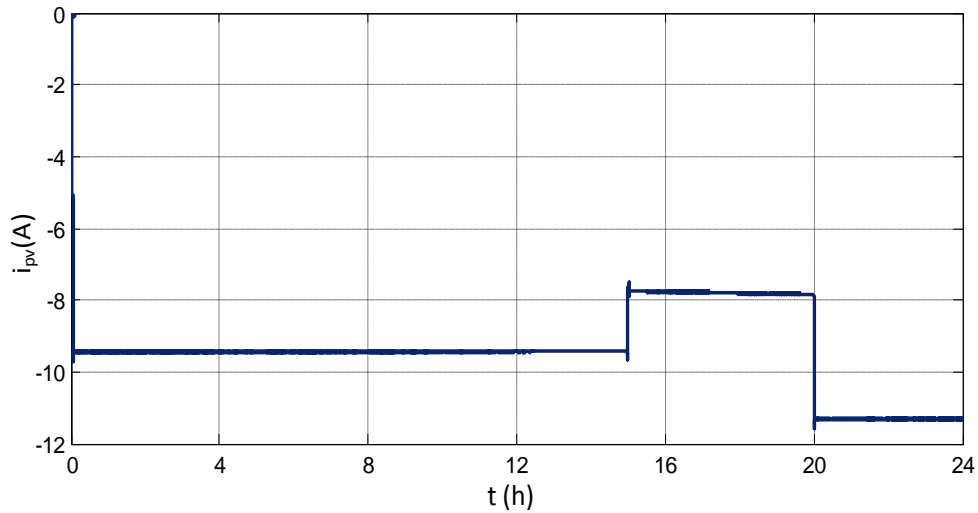


Figure III.31 : Courant débité par le générateur PV

La figure (III.32) montre que l'allure de la puissance fournie par le système photovoltaïque suit l'allure du courant débité par le générateur PV.

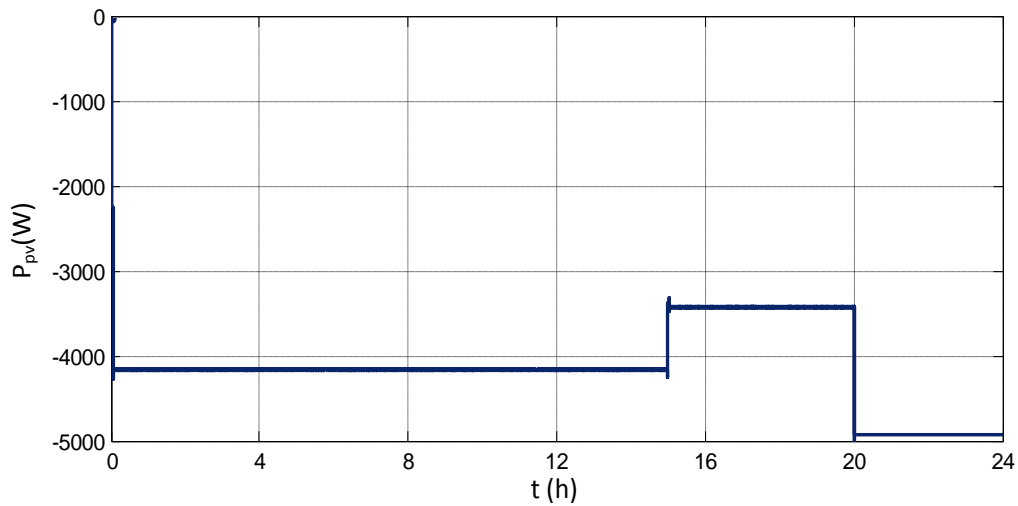


Figure III.32 : Puissance photovoltaïque récupérée

D'après les figures (III.33), (III.34) on remarque que l'allure de la tension aux bornes de la batterie, ainsi que celle de l'état de charge évoluent de la même manière.

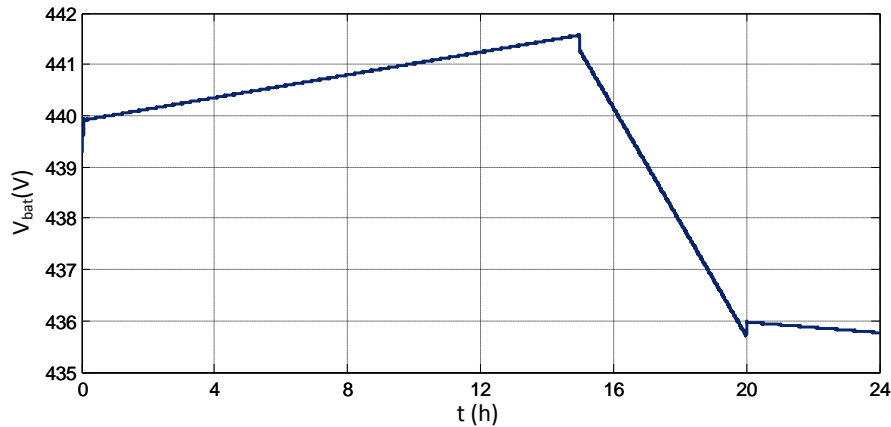


Figure III.33 : Tension aux bornes de la batterie

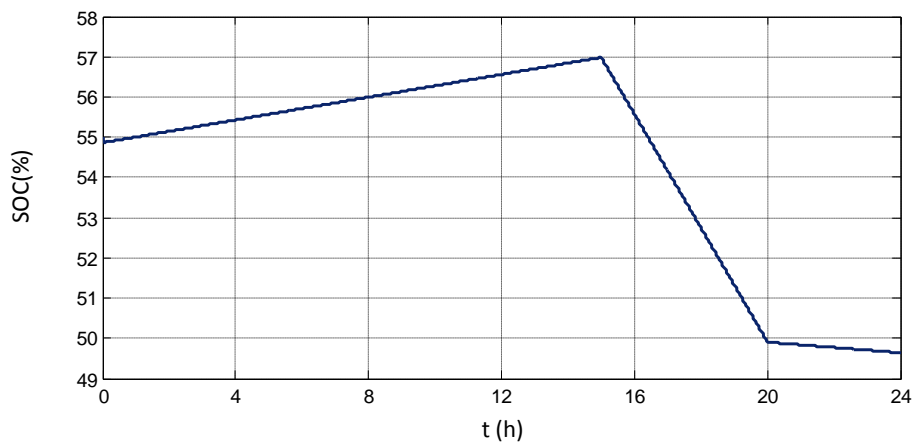


Figure III.34 : Etat de charge de la batterie

D'après les figures (III.35), (III.36) on constate que le courant débité sur la charge suit les variations de sa puissance, mis à part une légère différence due à la variation de la tension de bus continu.

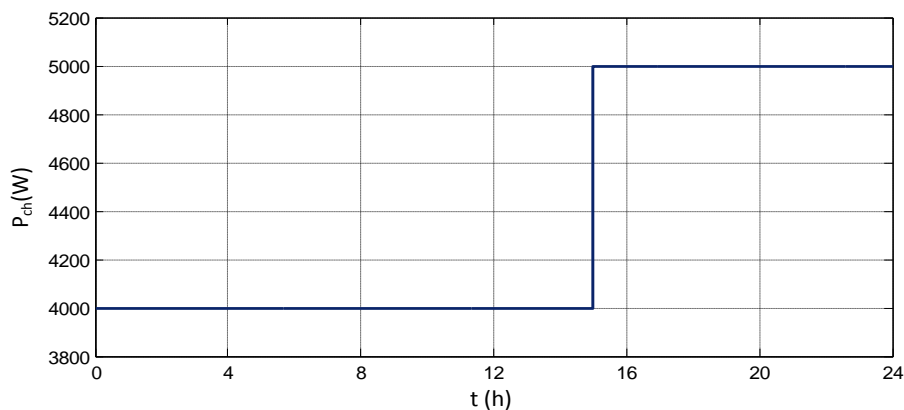
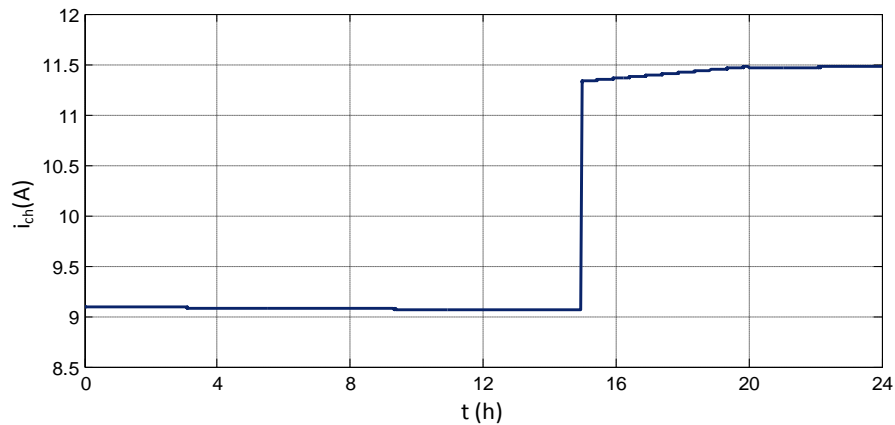
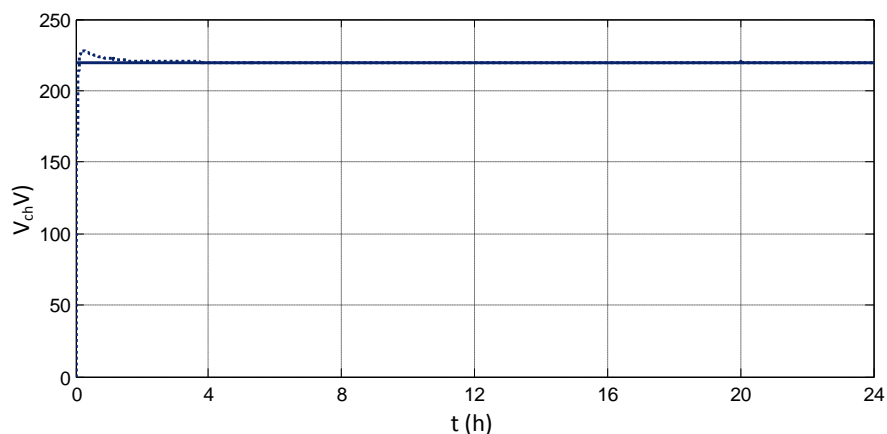


Figure III.35 : Profil de la puissance demandée par la charge



**Figure III.36 :** Courant débité sur la charge

La figure (III.36) montre que pour une tension d'entrée du hacheur abaisseur (buck) variable qui n'est autre que celle imposée par la batterie, la tension de sortie du hacheur en régime permanent est maintenue constante à une valeur de 220V.



**Figure III.37 :** Tension de sortie du hacheur buck

### III.3. Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons conçu sous l'environnement MATLAB/Simulink les deux systèmes ; photovoltaïque avec stockage et éolien avec stockage, leurs simulations a révélé un bon comportement face aux variations climatiques. Les systèmes de poursuite du point de puissance maximale utilisés par les sources d'énergie renouvelable se sont montrés très efficaces pendant les variations du vent et de l'éclairement. On a également une bonne régulation du flux rotorique et du couple électromagnétique par la commande vectorielle utilisée. Et nous avons pu constater que les batteries étaient susceptibles de subir des cycles de charge et décharge.

Dans le chapitre qui va suivre nous allons procéder à la simulation du système global et tester ainsi les performances de l'algorithme de gestion chargé de superviser les flux d'énergie.



# **Chapitre IV**

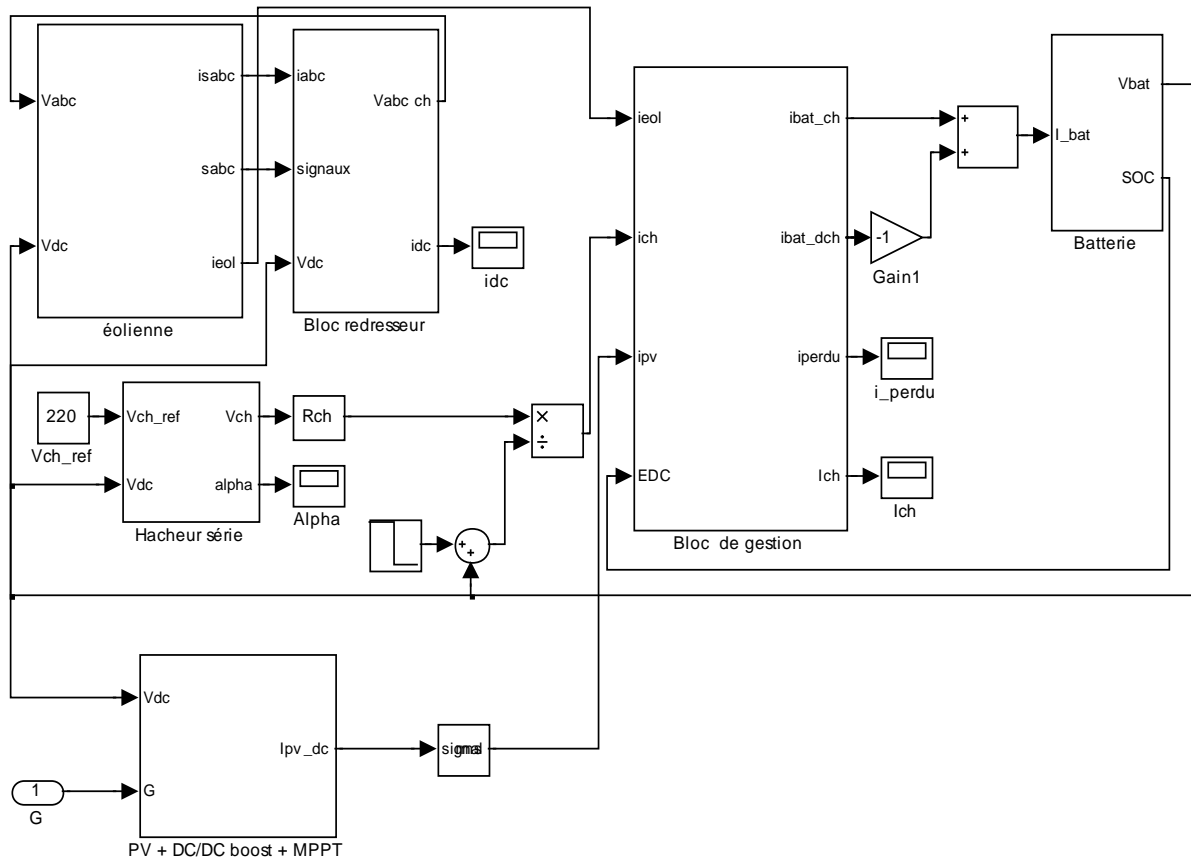
## **Gestion de l'énergie du système hybride (photovoltaïque-éolien) avec stockage**

**IV.1. Introduction**

Dans n'importe quel système hybride il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part (protection contre les surcharges et les décharges profondes), afin de préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

A cet effet, l'algorithme de gestion est chargé de réguler l'énergie provenant du système hybride. Pour se faire, ce dernier est implanté sous Matlab/Simulink puis simulé avec un pas de calcul de  $10^{-5}$ s permettant ainsi de traiter les différents cas possibles auxquelles nous sommes appelés à être confrontés.

Le schéma Matlab /Simulink de la figure(IV.1), représente le système global éolien-photovoltaïque avec stockage supervisé par un algorithme de gestion.



**Figure IV.1 : Schéma Matlab/Simulink du système global**

### IV.2. Organigramme de gestion d'énergie

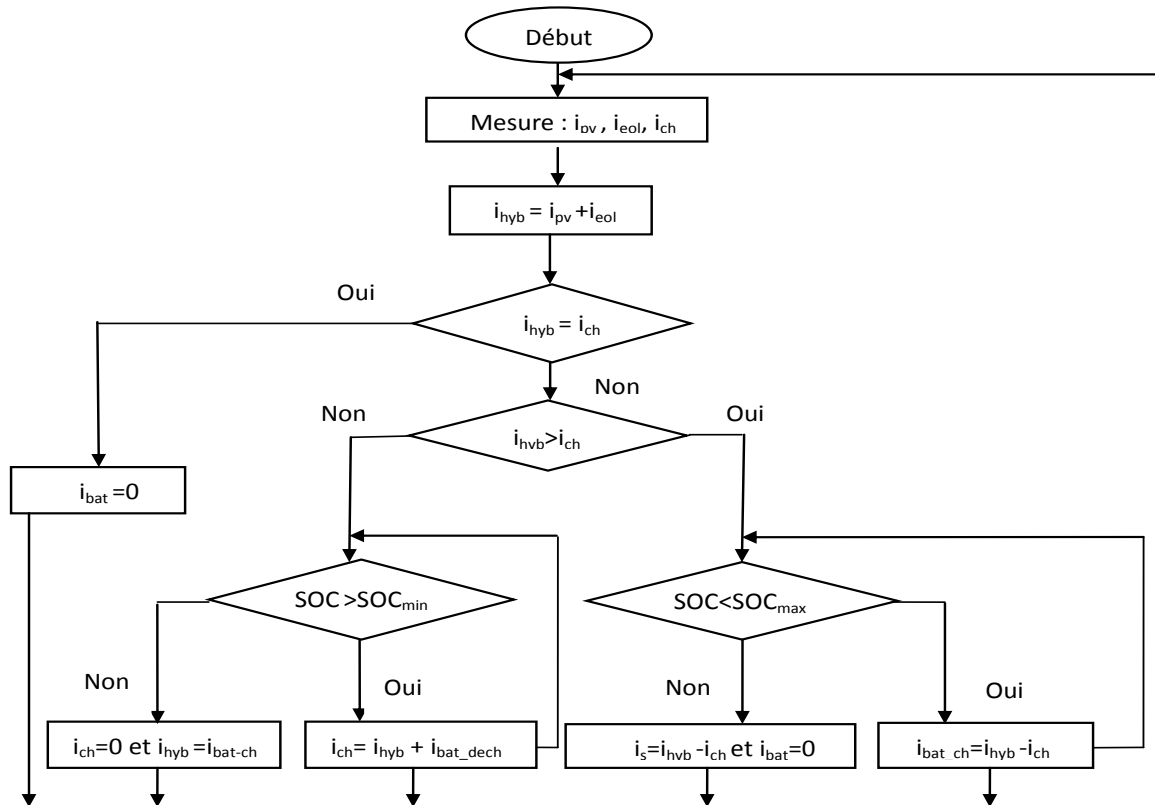


Figure IV.2: Organigramme de gestion d'énergie dans le système global

### IV.3. Simulation du système global

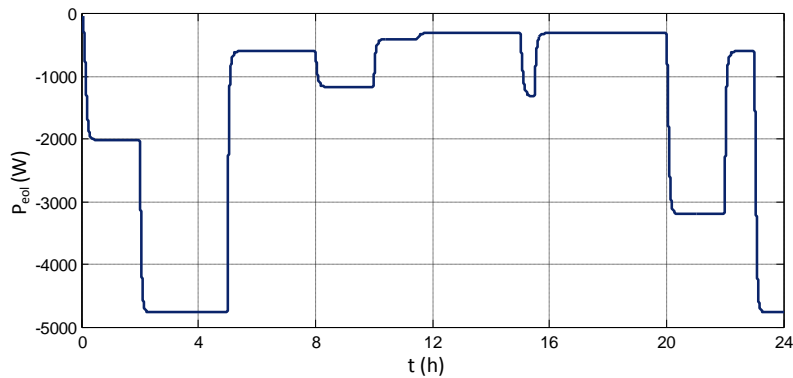
On a procédé à la simulation du système global à pas fixe pendant 24s qui correspond réellement à 24 h avec le changement d'échelle. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possible ; on a fait varier le profil de la charge, ainsi que l'ensoleillement et la vitesse du vent, mis à part la température à la surface des PV qui est considérée constante ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ). Les profils utilisés pour la simulation sont défini dans le tableau suivant :

Temps (h)	0 - 2	2 - 5	5 - 8	8 - 10	10- 10.525	10.525 - 11.5	11.5 - 15
$V_v(\text{m/s})$	6	8	4	5	3.5		3.2
$G(\text{W/m}^2)$	300	1000	500	800	100		110
$P_{ch}(\text{W})$	<b>500</b>		<b>8000</b>	<b>2000</b>		<b>2118</b>	<b>10000</b>
$P_{eol}(\text{W})$	2000	4750	595	1160	405		304
$P_{pv}(\text{W})$	2350	4900	3050	4150	1715		1720
$P_{hyb}(\text{W})$	<b>4350</b>	<b>9650</b>	<b>4645</b>	<b>5310</b>	<b>2120</b>		<b>2024</b>

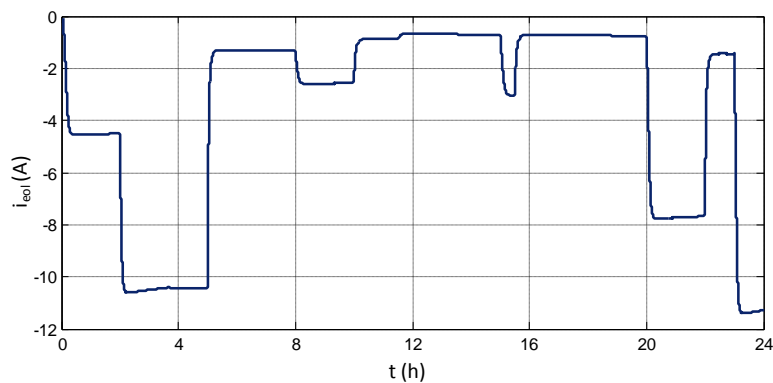
Temps (h)	15 -15.5	15.5 - 20	20 -22	22 -23	23 - 24
$V_v$ (m/s)	5.2	3.2	7	4	8
$G$ (W/m <sup>2</sup> )	400	100	1000	100	1000
$P_{ch}$ (W)	<b>8200</b>	<b>10000</b>	<b>4000</b>	<b>7000</b>	<b>1000</b>
$P_{eol}$ (W)	1306	304	3187	595	4750
$P_{pv}$ (W)	2700	1715	4900	1715	4900
$P_{hyb}$ (W)	<b>4006</b>	<b>2019</b>	<b>8087</b>	<b>2310</b>	<b>9650</b>

### IV.3.1. Interprétation des résultats obtenus par la simulation

Les figures (IV.3) et (IV.4) représentent respectivement la puissance et le courant générés par le système éolien. On remarque que le courant débité suit l'évolution de la puissance éolienne du fait que  $P_{eol} = i_{eol} \cdot V_{bat}$

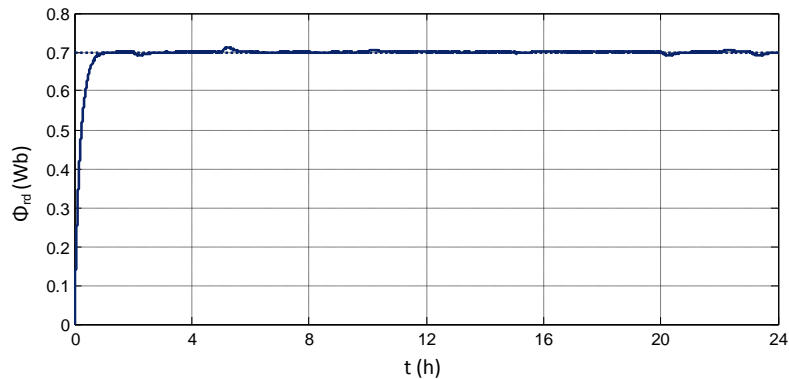


**Figure IV.3** : Puissance fournie par le système éolien



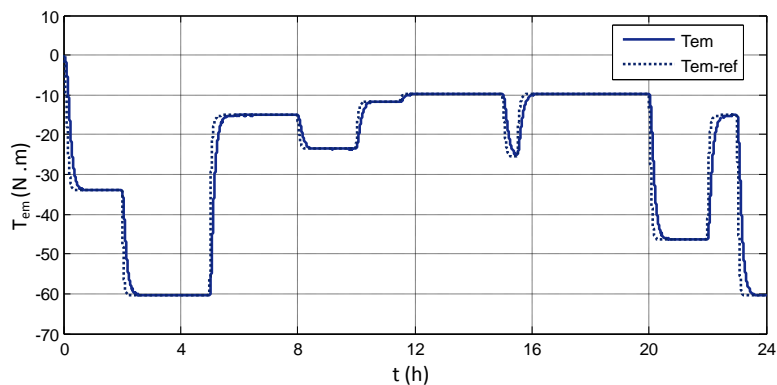
**Figure IV.4** : Courant fournie par le système éolien

La commande vectorielle utilisée pour l'éolienne est celle à flux rotorique orienté, le flux est fixé à une valeur de référence ( $\Phi_{rd-ref} = 0.7\text{Wb}$ ), d'après la figure (IV.5), On peut constater que la grandeur rotorique est bien régulée et reste insensible aux variations de la vitesse.



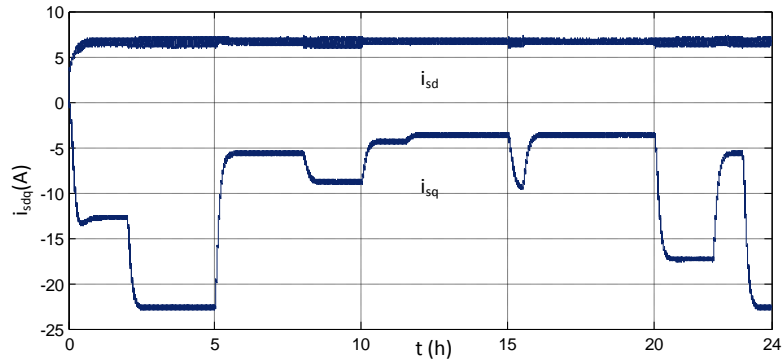
**Figure IV.5 : Flux rotorique.**

La figure (IV-6), représente le couple électromagnétique de la génératrice asynchrone. Le couple électromagnétique étant négatif indique le fonctionnement en mode génératrice. On remarque que la valeur du couple suit sa référence issue de l'algorithme MPPT classique et s'adapte avec les variations de la vitesse selon la puissance fournie.



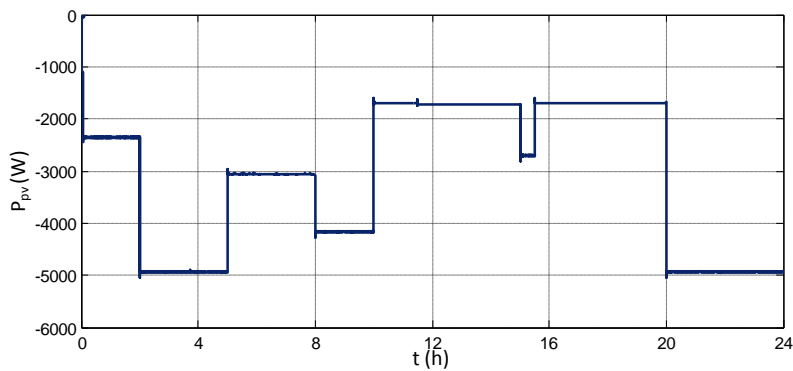
**Figure IV.6 : Couple électromagnétique**

La figure (IV.7) représente l'évolution des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ . L'allure du courant  $i_{sd}$  est similaire à celle du flux rotorique. Ce dernier est bien régulé et insensible aux variations de la vitesse. Le courant  $i_{sq}$ , quant à lui, répond à ces deux derniers pour adapter le couple afin de garder la puissance produite constante.

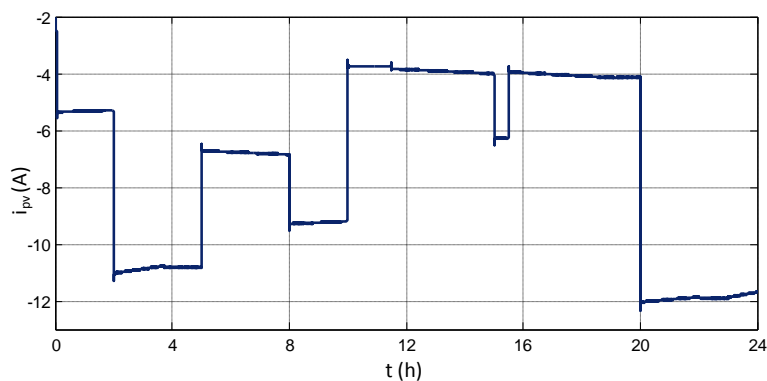


**Figure IV.7 :** Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$

Les figures (IV.8), (IV.9) représentent respectivement la puissance et le courant débité par le générateur photovoltaïque. Leurs interprétations sont identiques à celles du chapitre précédent.

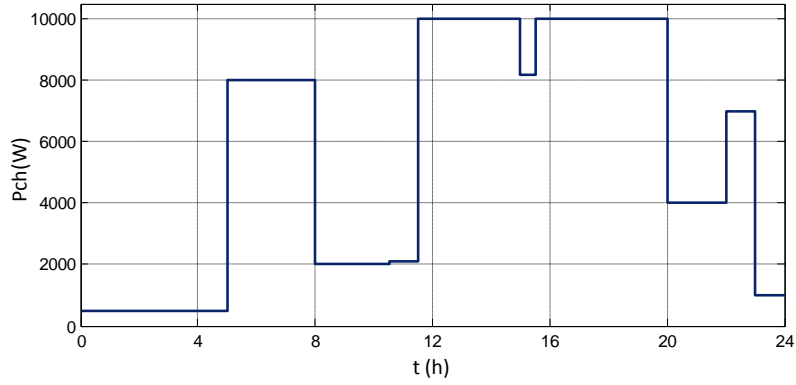


**Figure IV.8:** Puissance fournie par le générateur photovoltaïque

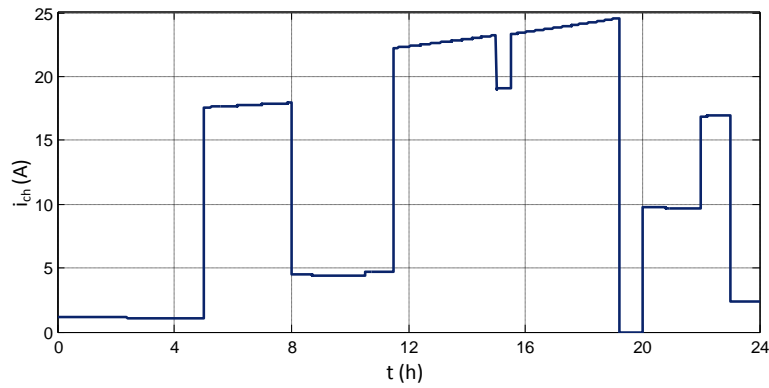


**Figure IV.9 :** Courant fourni par le générateur photovoltaïque

Les figures (IV.10), (IV.11) montrent respectivement la puissance de la charge ainsi que le courant à l'entrée du convertisseur abaisseur ( $i_{ch}$ ). On remarque que l'évolution de la puissance de la charge suit celles du courant et de la tension de la batterie (figure (IV.13)) du fait que  $P_{ch} = i_{ch} \cdot V_{bat}$

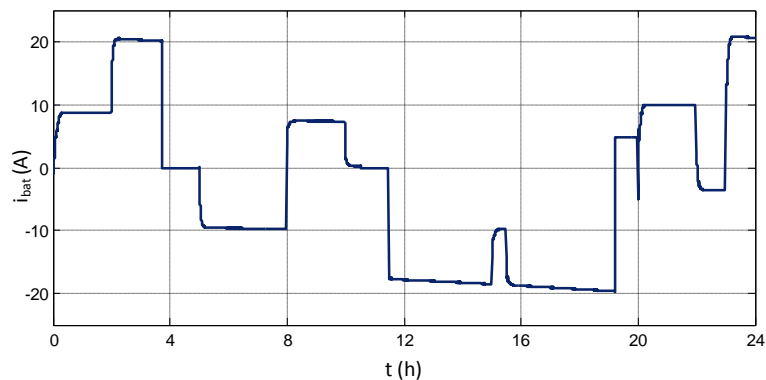


**Figure IV.10** : Puissance demandée par la charge



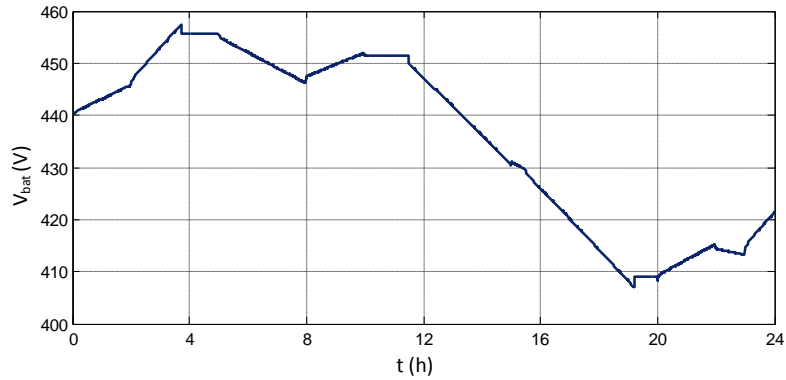
**Figure IV.11** : Courant demandé par la charge

La figure (IV.12), présente le courant de la batterie. On peut constater que l'évolution du courant de la batterie suit l'évolution de son état de charge.

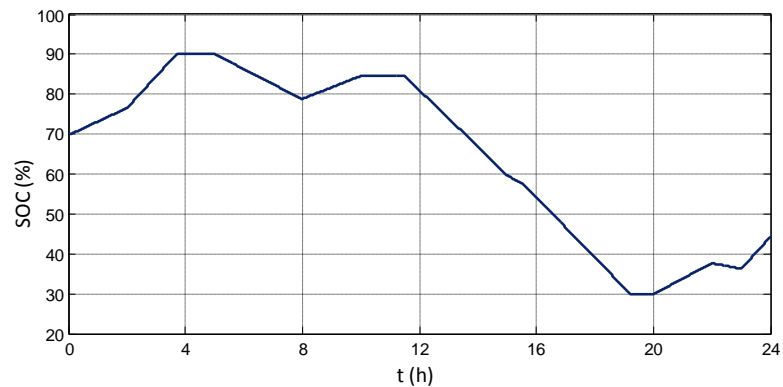


**Figure IV.12** : Courant de la batterie

Sur les figures (IV.14) et (IV.13) nous représentons l'évolution du SOC et de la tension de bus continu imposée par la batterie. On peut constater que l'évolution de l'état de charge de la batterie est similaire à celle de la tension, donc le SOC est l'image de la tension.

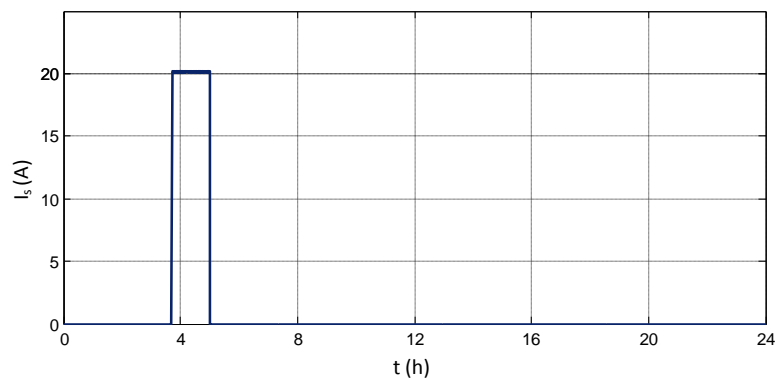


**Figure IV.13 :** Tension de la batterie



**Figure IV.14 :** Etat de charge de la batterie (SOC)

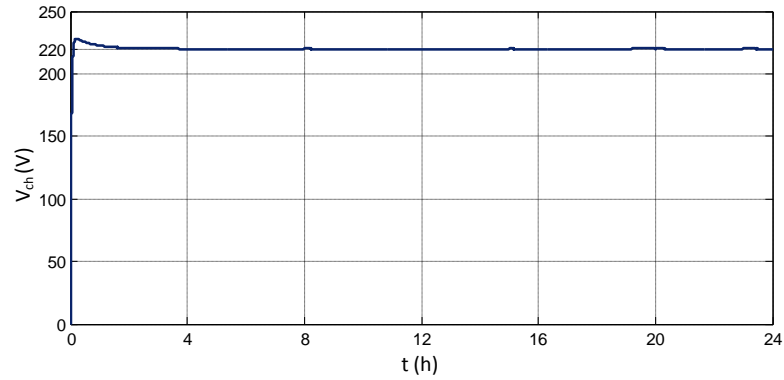
La figure (IV.15) représente le courant de délestage. On déduit à partir de cette figure que ce courant existe seulement si le courant généré par le système hybride est supérieur à celui demandé par la charge et le  $SOC \geq SOC_{max}$ .



**Figure IV.15 :** Courant à dissiper dans une charge dérivative

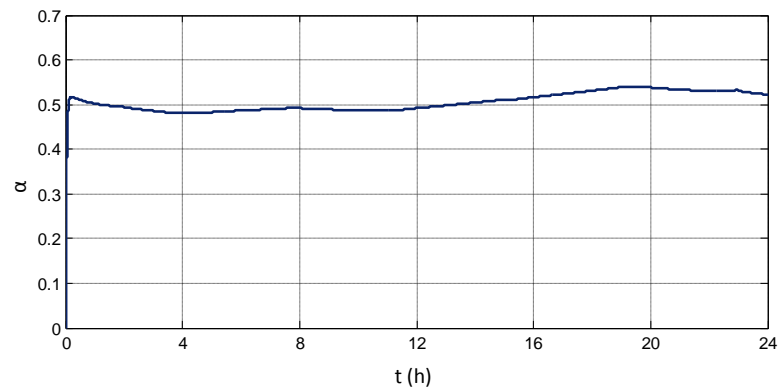
La figure (IV.16), représente la tension aux bornes de la charge à la sortie du hacheur dévolteur. Après un régime transitoire, la tension de la charge est gardée constante quelque que soit la tension du bus continu.





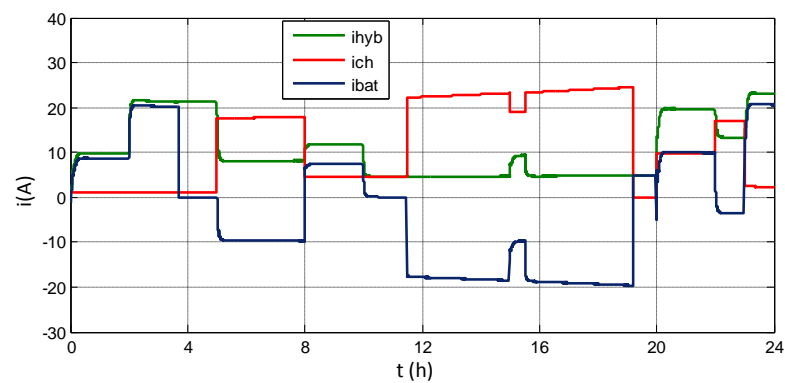
**Figure IV.16 :** Tension aux bornes de la charge

La figure (IV.17), montre le rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur buck, on constate que  $\alpha$  du convertisseur buck évolue de façon à gardé la tension a la sortie de convertisseur constante.



**Figure IV.17 :** Rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur buck

La figure (IV.18), représente le courant total fourni par le système hybride ( $i_{hyb}$ ), le courant à l'entrée de convertisseur buck ( $i_{ch}$ ) et le courant de la batterie.



**Figure IV.18 :** Allure des courants  $i_{hyb}$ ,  $i_{ch}$  et  $i_{bat}$

➤ **Synthèse sur le fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion**

D'après les figures (IV.14) du Soc, (IV.15) et (IV.18) des courants et (IV. 3), (IV.8), (IV.10) pour les puissances, on peut déduire les interprétations suivantes sur le fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion :

**Phase 1 (t=0-2 h) :** On remarque que le courant fourni par le système hybride est supérieur au courant appelé par la charge (Figure IV.18), on alimente donc la charge et on charge la batterie étant donné le  $SOC < SOC_{max}$  (90 %).

**Phase 2 (t=2 - 5 h) :** Cette phase se divise en deux sous-phase

**Sous-phase 2a (t=2 - 3.7 h) :** Ce cas est le plus favorable, car il correspond à une situation où notre système hybride fournit un courant largement supérieur à celui de la charge (Figure IV.18), à cet effet la batterie se charge rapidement par rapport au cas précédent jusqu'à un  $SOC_{max}$  (90 %).

**Sous-phase 2b (t=3.7 - 5 h) :** On voit bien que le  $SOC=SOC_{max}$  (Figure IV.14), on considère donc que la batterie est complètement rechargée ; et on la déconnecte. La charge est alimentée par le système hybride (Figure IV.18) et le surplus d'énergie (figure IV.15) est dirigé vers une charge dérivative (délestage).

**Phase 3 (t=5 - 8 h) :** Ce cas est moins favorable que le premier, car il représente la situation où le courant fourni par le système éolien et photovoltaïque est inférieure à celui demandé par la charge, dans ce cas le manque sera compensée par la batterie étant donné le  $SOC > SOC_{min}$  (30%).

**Phase 4 (t=8 - 10 h) :** La puissance fournie par la source photovoltaïque et éolienne est supérieure à celle demandée par la charge (figures (IV.3), (IV.8) et (IV, 10)) ce qui implique l'alimentation de la charge, et comme le SOC est inférieur au  $SOC_{max}$ , la batterie se charge à nouveau.

**Phase 5 (t=10 – 10.525 h):** On remarque d'après la figure (IV.18) que le courant du système hybride est presque égale au courant demandé par la charge et le  $SOC < SOC_{max}$  donc la batterie se charge lentement.

**Phase 6 (t=10.525 – 11.5 h) :** Dans ce cas, le courant fournie par le système hybride est sensiblement égale à celui demandé par la charge (figure IV.18) ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge et la déconnexion de la batterie (le SOC reste constant).

**Phase 7 (t= 11.5 – 15 h) :** Le courant fourni par le système hybride est insuffisant pour alimenter la charge et puisque le SOC est supérieur au  $SOC_{min}$  la batterie va se décharger rapidement (figure (IV.14) et (IV.18)) afin de satisfaire la charge.

**Phase 8 (t= 15 – 15.5 h) :** Le courant fourni par le système hybride augmente et la puissance de la charge diminue par rapport à ceux du cas précédent, comme le SOC est supérieur au  $SOC_{min}$  la batterie va continuer à se décharger lentement pour pouvoir satisfaire la charge.

**Phase 9 (t =15.5 – 20 h) :** Cette période présente la situation où l'énergie produite par les deux sources principales est très faible, la batterie se décharge alors jusqu'à atteindre le  $SOC_{min}$ , puis elle est déconnectée, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau (figure IV.18) pour emmagasiner le peu d'énergie disponible (se charge très lentement).

**Phase 10 (t =20 – 22 h) :** La puissance fournie par le système hybride est deux fois supérieure à celle de la charge, le système hybride arrive donc à satisfaire largement la charge et puisque  $SOC < SOC_{max}$  la batterie se charge rapidement (figure IV.14)

**Phase 11 (t =22 – 23 h) :** Dans cette situation, qu'on définit comme étant assez défavorable, le système hybride est incapable de satisfaire la charge et la batterie va se décharger à son tour jusqu'à atteindre le  $SOC_{min}$ .

**Phase 12 (t =23 – 24 h) :** Ce cas est favorable, car il correspond à une situation où notre système hybride satisfait pleinement la charge (figure (IV.14) et (IV.18)), et que le surplus de puissance est dirigé vers la batterie puisque le  $SOC < SOC_{max}$ .

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu une méthodologie de développement de loi de gestion d'énergie pour un système hybride avec stockage. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale et perspectives**

Dans ce travail nous avons contribué à l'étude du système hybride photovoltaïque éolien avec stockage, auquel on a implanté un algorithme de gestion.

Dans le premier chapitre, nous avons donné une description de quelques sources d'énergie renouvelables. Ensuite, nous avons présenté quelques techniques de recherche du point de puissance maximale puis les différentes configurations du système hybride.

Le second chapitre a été dédié à l'élaboration des différents modèles qui composent le système hybride. Le module « générateur éolien » a été modélisé en tenant compte de tous ses éléments : rotor éolien, l'arbre de transmission, générateur et convertisseur de puissance. Pour maximiser l'énergie récupérée à partir vent, on a adopté pour la chaîne de production éolienne une commande MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure. Cette commande génère une référence de couple électromagnétique liée à la courbe de puissance maximale. La consigne du couple ainsi obtenue permet d'adapter la vitesse de rotation du rotor éolien à la vitesse du vent, par le biais d'un convertisseur à commande vectorielle connecté au stator de la machine asynchrone. Pour le générateur photovoltaïque, L'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale consiste en la commande P&O « méthode de perturbation et d'observation ». Le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $D$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau *PV*. La modélisation de la batterie de stockage a aussi été réalisée de manière à subir des cycles de charge et de décharge. Le modèle R-C à été donc adopté, vu sa simplicité.

Le troisième chapitre a permis de valider par la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink le modèle mathématique de la batterie, ainsi que ceux des deux systèmes éolien avec stockage et photovoltaïque avec stockage.

Et pour finir, dans le dernier chapitre on a procédé à la simulation du système complet et on a montré l'efficacité de l'algorithme de gestion du flux d'énergie face aux variations climatiques à savoir le vent et l'éclairement.

Les résultats de ce présent travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Utilisation du SEH Eolien/Photovoltaïque/Diesel avec batteries de stockage pour les sites isolés afin d'avoir d'une façon continu l'énergie électrique.
- implantation de la méthode d'incrémentation de la conductance afin de maximiser la puissance du générateur PV, car elle a l'avantage de poursuivre rapidement le point de puissance maximale même dans le cas de grands changements des conditions atmosphériques contrairement à la commande P&O.
- Réalisation de différents tests sur un système réel, car il est très intéressant de tester les performances dynamique des stratégies de commande, ainsi que l'efficacité de l'algorithme de gestion sur un système réel afin de valider les résultats de simulation Par les résultats expérimentaux.
- Utilisation d'un hacheur buck-boost entre les batteries et le bus continu à la place du hacheur buck placé entre la charge et le bus continu dans le but de stabiliser la tension du bus continu.

# **Références Bibliographiques**

**Références bibliographiques**

- [Abb 11] L. Abbassen « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.
- [Abd 07] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [Aim 04] S. EL Aïmani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences Technologies de Lille, France, 2004.
- [Ara 06] H.G. Arantzamendi « Etude des structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micros réseaux », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [Arb 06] A. Arbaoui « Aide à la décision pour la définition d'un système éolien adéquat au site et à un réseau faible », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2006.
- [Bai 10] L. Bailly « Cellules Photovoltaïques Organiques Souples à Grande Surface », Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux I, France, 2010.
- [Bel 02] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabeche « Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel) », Revue des Energies Renouvelables, Zones Arides, 2002, pp. 49-54.
- [Bel 07] M. Belhadj « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister de l'Université de Bechar, Algérie, 2007.
- [Bel 10] S. Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [Boy 06] A. Boyette « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2006.
- [Bri 12] F. Brihmat « L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien », Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.



- [Cam 03]** H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2003.
- [Che 12]** A. Chelabi, A. Ibelhoulen « Etude d'un système hybride autonome », Mémoire de Fin d'Etude de l'Université de Bejaia, Algérie, 2012.
- [Cou 06]** Cour Magistral de Stéphan ASTIER Professeur des Universités - INPT-ENSEEIH, 2006.
- [Cra 03]** M. Crappe, M. Delincé, D. Georges, N. Hadjsaid, N. Janssens, A. Robert et J. Trécat « Commande et régulation des réseaux électriques », Edition LAVOISIER, France, 2003.
- [Cum 10]** P. Cumunel, B. Faraggi, A. Labouret, J.-P. Braun « Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque », 2010, Tome V, pp. 46.
- [Has 10]** H. Hassini « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque », Mémoire de Magister de l'Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2010.
- [Ene 12]** Web : <http://energies-renouvelables.consoneo.com>, consulté Novembre 2012.
- [Ene 13]** Web: <http://www.energies-renouvelables.org>, consulté janvier 2013.
- [Fer 09]** K. Ferkous « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magistère de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2009.
- [Fic 10]** Fiches Infos « Le Photovoltaïque – Fonctionnement et Technologies », IBGE Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, France, 2010.
- [Ger 02]** O. Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [Ghe 11]** T. Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [Gue 09]** M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M.I. Milanés and E. González « Overview of Medium, Scale Energy Storage Systems », CPE 2009 6th International Conference-Workshop, Compatibility and Power Electronics, Power Quality, Alternative Energy and Power, Electronics, 2009, pp. 94-100.

- [Hoh 03]** D.P.Hohm and M.E.Ropp « Comparative study of Maximum Power Point Tracking Algorithms », in Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 2003.
- [Idj 10]** K. Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse en cotutelle entre l'Université de Bejaia, Algérie et l'Université Lille 1, France, 2010.
- [Kaa 06]** A. Kaabeche , M. Belhamel , R. Ibtouen , S. Moussa et M. R. Benhaddadi « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque totalement autonome) », Revue des Energies Renouvelables, 2006, Vol. 9 N°3, pp. 199 – 209.
- [Lab 06]** A. LABOURE, M. VILLOZ – « Énergie solaire photovoltaïque », Environnement et Sécurité, Tome III, Paris, 2006, pp. 01-48.
- [Lai 10]** Z. Laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [Lal 09]** S. LALOUNI « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2009.
- [Lec 04]** L. Leclercq « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (L2eP), Lille, France, 2004.
- [Lop 06]** M. Lopez « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale de Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes de Paris-Sud 11, France, 2006.
- [Mek 04]** N. Mekkaoui « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie, 2004.
- [Mel 10]** K. El-Melouani « Dimensionnement d'un hacheur survolteur », Application note de Polytech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [Mir 05]** A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, France, 2005.

- [Oct 05]** G. Octavian « Système Inertiel De Stockage D'énergie Associé A Des Générateurs Eoliens », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, France, 2005.
- [Ole 05]** N. Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2005.
- [Pai 10]** D. Paire « Dimensionnement et gestion d'énergie de système d'entraînements électriques hybrides : Application à un ascenseur avec régulation d'énergie », Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques de Belfort-Montbéliard, France, 2010.
- [Pas 06]** M. A. C. Pastor « Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electroniques », Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, France, 2006.
- [Pen 00]** R.S. PENA, R.J. CARDENAS, G. MASHER ET J.C. CLARE « Vector controlled induction machines for Stand-Alone wind energy applications », Electrical Engineering Departement, University of Magallanes, 2000.
- [Pet 05]** A. Petersson « Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines », Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de CHALMERS de Göteborg, Suède, 2005.
- [Poi 03]** F. Poitiers « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [Ram 10]** A. Rameli « Contribution à l'Amélioration des Performances d'un Aérogénérateur basé sur une MSAP », Mémoire de Magistère de l'Université de Bejaia, Algérie, 2010.
- [Rek 07]** D. Rekioua, O. Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [Sad 09]** A. Sadek « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », Mémoire de Magistère de l'Université de Batna, Algérie, 2009.
- [Sin 10]** A. T. Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2010.
- [Som 10]** SOCOMEC, Cahier technique photovoltaïque 2010.

- [Ste 09]** M. P. Stephane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, France, 2009.
- [Sto 11]** L. Stoyanov « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de Doctorat de l'Université Technique de SOFIA, 2011.
- [Vec 05]** I. Vechiu « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France, 2005.

# **Annexes**

## Annexe 1

**a-Paramètres de la machine asynchrone [Idj 10]**

Rotor de type de cage d'écureuil

4 paires de pôles

230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn

$$R_s = 1,07131 \Omega ;$$

$$R_r = 1,29511 \Omega ;$$

$$L_s = 8,9382 \text{ mH} ;$$

$$L_r = 4,8613 \text{ mH} ;$$

**b- Paramètres de la turbine [PEN 00]**

Puissance nominale :  $P_n = 7.5 \text{ kW} ;$

Rayon de la turbine :  $R_t = 3.24 \text{ m} ;$

Vitesse nominal de la turbine :  $\Omega_{tn} = 296 \text{ tr /mn} ;$

Vitesse maximal de la turbine :  $\Omega_{t \max} = 10 \text{ tr /mn} ;$

Vitesse minimal de la turbine :  $\Omega_{t \min} = 4 \text{ tr /mn} ;$

Moment d'inertie :  $J = 0.075 \text{ Kg.m}^2 ;$

Frottement :  $f = 0 ;$

Le gain de multiplicateur  $G = 3.54 ;$

## Annexe 2

### Paramètres d'un panneau photovoltaïque SHARP NTR5E3E [Che 12]

Dimension extérieur : 1575\*826 mm.

Epaisseur : 40 mm.

Poids : 17.0 kg.

Puissance maximale du panneau :  $P_{ppm} = 175$  W ;

Courant au point de puissance maximale :  $I_{ppm} = 4.95$  A ;

Tension au point de puissance maximale :  $V_{ppm} = 35.4$  V ;

Courant de court-circuit :  $I_{cc} = 5.4$  A.

Tension en circuit ouvert :  $V_{co} = 44.4$  V.

### Batterie [Sin 10]

$C_b = 2600$  Ah

$V_b = 480$  V ;