

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة – أكلي محند أولحاج -البويرة
UNIVERSITE Akli Mohand Oulhadj —Bouira
(ALGERIE)

Mémoire de Master

Présenté au département de Génie Electrique
Faculté des Sciences et Sciences Appliquées
Pour obtenir le diplôme

De Master

En:

Electromécanique et système de commande

Par :

M. Bousiga Moussa Ammar

Thème

***Optimisation et gestion d'énergie d'un système
hybride avec stockage Electrochimique***

Soutenu le 24/09/2017 devant le jury composé de :

M. MOHAMMEDI Ahmed	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Président</i>
M. GRICHE Issam	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Co-Encadreur</i>
M. KHARCHI Mohamed	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Examineur</i>
M. BERRAG Amine	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Examineur</i>
M. HACINI Ismail	Enseignant à l'université de Bouira	<i>Encadreur</i>

Remerciements

Remerciements

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

On tient à remercier mes très chers parents, qui se sont sacrifiés pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leur soutien depuis toujours, que le bon dieu les garde et les protège.

On tient à remercier sincèrement Monsieur I. HACINI, Enseignant à l'université de Bouira (Algérie), et Monsieur I. GRICHE, Maître Assistant à l'université de Bouira (Algérie), qui, en tant que directeur de mémoire et encadreurs, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponibles 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.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides (SEH)	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition d'un SEH	4
I.3. Le but d'un SEH.....	4
I.4. La fiabilité et la performance d'un SEH.....	4
I.5. Classification des systèmes d'énergie hybrides.....	5
I.5.1. Classification par régime du fonctionnement.....	5
I.5.2. Classification par structure du système hybride.....	5
I.6. Schéma général des systèmes hybrides.....	6
I.7. Production de l'électricité par les énergies renouvelables.....	7
I.7.1. L'hydraulique.....	8
I.7.2. Le solaire.....	8
I.7.3. L'éolienne.....	8
I.7.4. La biomasse.....	8
I.7.5. La géothermie.....	8
I.7.6. Les énergies marines.....	8
I.8. Les différentes structures des systèmes hybrides.....	8
I.8.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle.....	8
I.8.1.1. Système hybride éolien/source conventionnelle (diesel).....	8
I.8.1.2. Système hybride photovoltaïque/source conventionnelle (diesel).....	8
I.8.1.3. Système hybride photovoltaïque/éolien/source conventionnelle (diesel).....	9
I.8.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	9
I.8.2.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage.....	9

Sommaire

I.8.2.2. Système hybride photovoltaïque/stockage.....	9
I.8.2.3. Système hybride éolien/stockage.....	9
I.8.2.4. Système d'énergie hybride photovoltaïque éolien avec stockage.....	10
I.8.3. La complémentarité des ressources éoliennes et solaires.....	10
I.9. Principaux composants du système d'énergie hybride photovoltaïque éolien.....	11
I.9.1. Générateurs photovoltaïques.....	11
I.9.1.1. Effet photovoltaïque.....	11
I.9.1.2. Cellules photovoltaïques.....	12
I.9.1.3. Différents types des cellules solaires.....	12
I.9.1.4. Module photovoltaïque.....	13
I.9.1.5. Panneau photovoltaïque.....	14
I.9.2. Générateur éolien.....	15
I.9.2.1. Généralités sur les systèmes éoliens.....	15
I.9.2.2. Constitution d'un aérogénérateur.....	15
I.9.2.3. Classification des éoliennes.....	16
I.9.3. Systèmes de conversions.....	17
I.9.3.1. Les hacheurs.....	17
I.9.3.2. Les onduleurs.....	17
I.9.4. Les différentes technologies de stockage de l'électricité.....	17
I.9.4.1. Stockage Mécanique.....	17
I.9.4.2. Stockage électrochimique.....	18
I.9.4.3. Stockage électromagnétique.....	19
I.9.4.4. Stockage thermique (chaleur et froid).....	19
I.9.5. Le choix de technologie de stockage de l'électricité.....	19
I.10. Les différents architectures des systèmes hybrides.....	20
I. 10.1. Architecture à bus à CC.....	20
I. 10.2. Architecture mixte à bus à CC/CA.....	21

Sommaire

I. 10.3. Configuration de bus CA.....	22
I.11. Avantage et inconvénient d'un système hybride.....	23
I.11. 1. Avantages.....	23
I.11.2. Inconvénients.....	23
I.12. Conclusion.....	23

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion photovoltaïque

II.1. Introduction.....	24
II.2. Systèmes photovoltaïques autonomes.....	24
II.3. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	25
II.4. Dimensionnement du système PV.....	28
II.5. Dimensionnement des panneaux PV.....	28
II.6. Rendement Générateur photovoltaïque.....	29
II.7. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards de fonctionnement..	30
II.8. Influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques du module photovoltaïque.....	31
II.8.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque.....	31
II.8.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque.....	32
II.9. Modélisation du hacheur survolteur.....	33
II.9.1. Convertisseur DC/DC de type élévateur (Boost).....	33
II.9.2. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost).....	34
II.10. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)).....	34
II.10.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O).....	35
II.10.2. Les résultats la commande MPPT.....	37
II.11. Le modèle électrique de la batterie.....	38
II.11.1. Le dimensionnement des batteries.....	39
II.12. Convertisseur Buck-Boost.....	39

Sommaire

II.13. Modèle du bus continu.....	40
II.14. Gestion d'énergie du système photovoltaïque.....	41
II.15. Simulation du système photovoltaïque avec stockage.....	42
II.15.1. Résultats de simulation et interprétations pour une journée d'été.....	43
II.15.2. Résultats de simulation et interprétations pour une journée d'hiver.....	46
II.16. Conclusion.....	48

Chapitre III : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion éolienne

III.1. Introduction	49
III.2. La chaîne de production d'énergie éolienne.....	49
III.2.1. Modèle du vent.....	49
III.2.2. Modèle de la turbine éolienne.....	49
III.2.3. Modèle du multiplicateur.....	51
III.2.4. Modèle de l'arbre de transmission mécanique de la machine asynchrone.....	51
III.2.5. Modélisation de la machine asynchrone à cage.....	52
III.2.5.1. Principe de fonctionnement.....	52
III.2.5.2. Modèle triphasé de la MAS.....	53
III.2.5.3. Transformation de Park.....	55
III.2.5.4. Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant.....	55
III.2.6. Modélisation du redresseur MLI.....	56
III.2.7. Rendement Générateur éolien.....	57
III.2.8. Commande vectorielle de la génératrice asynchrone.....	58
III.3. Présentation de la chaîne de conversion éolienne avec stockage par batterie.....	60
III.3.1. Simulation et interprétation des résultats.....	61
III.4. Conclusion.....	64

Chapitre IV : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion hybride

IV.1. Introduction.....	65
-------------------------	----

Sommaire

IV.2. Le bus continu.....	66
IV.3. Organigramme de gestion d'énergie.....	67
IV.4. Simulation du système globale.....	68
IV.4.1. Interprétation des résultats obtenus par la simulation.....	69
IV.5. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73
Annexes	
Références bibliographiques	
Résumé	

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 :Classification des systèmes hybrides [Lud 11].	6
Figure I.2 :Schéma général de système énergétique hybride multi-sources[Dha 12].	7
Figure I.3 : Les énergies renouvelables qui produit l'électricité [Fed 14].	7
Figure I.4 : Schéma synoptique du système hybride photovoltaïque éolien stockage	10
Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [ZID 14].	11
Figure I.6 : description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [Tou 13].	12
Figure I.7 : Ceulles identiques en série	14
Figure I.8 : Cellules identiques en parallèles	14
Figure I.9 : Panneau photovoltaïque [MEC 13].	15
Figure I.10 : Exemple de constituants d'un système éolien à axe horizontal [Ber 12].	16
Figure I 11 : Configuration du SEH à bus CC [Ion 05].	20
Figure I 12 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [Ion 05].	21
Figure I 13 : Configuration du SEH à bus AC	22

Chapitre II

Figure II.1 : Système photovoltaïque autonome [Xua 15]	24
Figure II.2 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode.	25
Figure II.3 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$.	30
Figure II.4 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$	30
Figure II.5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.	31
Figure II.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	31
Figure II.7 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.	32
Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.	32
Figure II.9 : Système PV conçu autour d'un hacheur BOOST [Khé 09].	33
Figure II.10 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque. [BEN 14].	36
Figure II.11 : présente le diagramme de l'algorithme P&O.	37
Figure II.12 : L'algorithme P&O suite à des variations de l'ensoleillement	38
Figure II.13 : L'algorithme P&O pour différentes valeurs de la température interne du	38
Figure II.14 : Modèle électrique de la batterie	39

Liste des figures

Figure II.15 : Système PV conçu autour d'un hacheur Buck-Boost	40
Figure II.16 : Schéma du bus continu	41
Figure II.17 : Organigramme d'algorithme de gestion d'énergie de système photovoltaïque.	41
Figure II.18 : Schéma du système photovoltaïque avec stockage.....	42
Figure II.19 : Profile de consommation.....	43
Figure II.20 : Profile de l'éclairement pendant une journée d'été	43
Figure II.21 : Puissance photovoltaïque fournie	44
Figure II.22 : Allure de la tension du bus continu et sa référence.....	44
Figure II.23 : Tension aux bornes des batteries	44
Figure II.24 : Etat de charge des batteries	45
Figure II.25 : Courant dissiper dans une charge dérivative.....	45
Figure II.26 : Allure des courant I_{pv} , I_{ch} et I_{bat}	45
Figure II.27 : Profile de l'éclairement pendant une journée d'hiver	46
Figure II.28 : Puissance fournie par les panneaux photovoltaïques	46
Figure II.29 : Etat de charge des batteries	46
Figure II.30 : Tension aux bornes des batteries	47
Figure II.31 : Allure des courant I_{pv} , I_{ch} et I_{bat}	47

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma de l'aérogénérateur.....	49
Figure III.2 : Représentation schématique des enroulements de la MAS.	53
Figure III.3 : Schéma fonctionnelle d'une redresseur MLI.....	57
Figure III.4 : Schéma du système éolien avec stockage.....	60
Figure III.5 : profile de vent appliqué	61
Figure III.6 : la puissance demandée par la charge	61
Figure III.7 : Allure de coefficient de puissance CP	61
Figure III.8 : Allure de la vitesse de la génératrice	62
Figure III.9 : puissance générée par l'éolienne	62
Figure III.10 : Allure du couple électromécanique développé.....	62
Figure III.11 : Vitesse d'entraînement de la génératrice	62
Figure III.12 : Tension de bus continu	63
Figure III.13 : Allure des courants	63
Figure III.14 : état de charge des batteries	64

Liste des figures

Figure III.15 : Tension aux bornes des batteries de stockage 64

Chapitre IV

Figure IV.1 : système Hybride (éolienne, photovoltaïque) avec stockage par batteries électrochimiques..... 65

Figure IV.2 : Schéma du bus continu 66

Figure IV.3 : Organigramme d'algorithme de gestion d'énergie du système Hybride avec stockage 67

Figure IV.4 : profile de puissance demandée par la charge 68

Figure IV.5 : la vitesse du vent 69

Figure IV.6 : profile de l'ensoleillement..... 69

Figure IV.7 : tension de bus continu 69

Figure IV.8 : allure de la tension des batteries 70

Figure IV.9 : état de charge des batteries 70

Figure IV.10 : le courant a dissipé dans une charge dérivative..... 70

Figure IV.11 : allure des courants 71

Nomenclature

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 np cellules [A] ;
- I_{pv} Le photocourant [A] ;
- I_{rsh} Le courant shunt [A] ;
- J L'inertie totale (éolienne et génératrice) [Kg.m²] ;
- 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] ;
- Φ_{ds} Flux statorique d'axe direct [Wb] ;
- Φ_{qs} Flux statorique d'axe quadratique [Wb] ;
- Φ_{dr} Flux rotorique d'axe direct [Wb] ;
- Φ_{qr} Flux rotorique d'axe quadratique [Wb] ;
- Φ_{sabc} Flux des phases statoriques [Wb] ;
- Φ_{rabc} Flux des phases rotoriques [Wb] ;

Nomenclature

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 nominale [W] ;
P_{opt}	Puissance optimale [W] ;
R	Le rayon de la turbine [m] ;
R_r	Résistance rotorique de la génératrice [Ω] ;
R_s	Résistance statorique de la génératrice [Ω] ;
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 directe 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] ;
W_c	Watt crête [W] ;
α	Rapport cyclique du hacheur ;
λ	Vitesse relative de l'éolienne [m/s] ;
λ_{opt}	Vitesse relative optimale [m/s] ;
β	Angle d'orientation des pâles ;
Ω	La vitesse mécanique de la génératrice [rd/s] ;
Ω_t	La vitesse de rotation de la turbine [rd/s] ;

Nomenclature

- ω La pulsation mécanique [rd/s] ;
 ρ Densité d'air [Kg/m³] ;
 θ_s L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase a du stator ;
 θ_r L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase a du rotor ;
 θ L'angle électrique entre l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique ;

Abréviations

- CS Convertisseur statique ;
DC Direct courant ;
 D_p Diode connectée en parallèle « diode bypass » ;
 D_r Diode anti-retour ;
 G_m 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

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables. **[Fel 12]**

En ce qui concerne notre pays : l'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie.

Ainsi de sa part sa situation géographique, l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne .En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu (169.440 TWh/an), le plus important de tout le bassin méditerranéen, et représente 5.000 fois la consommation Algérienne en électricité et 60

Introduction générale

fois la consommation de l'Europe des 15 (estimée à 3.000 TWh/an), notre pays couvre certains de ses besoins en énergie solaire.

Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important à la région sud Adrar très précisément, donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelables dans les décennies à venir.

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie citées ci-dessus, est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du kWh électrique produit, en raison de l'intégralité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire qui posent le problème du stockage d'énergie. Or cet aspect de ces énergies est encore aujourd'hui un de ceux qui ralentissent le plus leur développement, car ce stockage, d'autant plus important que les régimes de vent soient irréguliers ou que les temps d'ensoleillement soient faibles, constitue souvent une grande part (environ 20%). **[Fel 12]**

De l'investissement d'une installation de production d'énergie électrique à partir du vent ou du rayonnement solaire.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Ainsi cette complémentarité d'énergie est accompagnée par un système de stockage assuré par des batteries au plomb, pour cela le dimensionnement de stockage optimale basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale:

Dans le premier chapitre un résumé un état de l'art sur les systèmes à énergie renouvelable et particulièrement les systèmes hybrides

Dans le deuxième chapitre nous intéressons sur les modèles de ces composants, c'est à dire la modélisation du champ photovoltaïque, batterie, régulateur et le convertisseur, en suite une gestion d'énergie de ce système par un algorithme qui prouve sa fiabilité par les résultats de simulation obtenir.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre on va modéliser une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable, qui intègre une génératrice asynchrone à cage d'écureuil. L'étude du système concerne la modélisation et la commande vectorielle de la machine asynchrone et de la partie de stockage d'énergie éolienne.

Dans le dernier chapitre présente une analyse des résultats de l'optimisation et de la simulation numérique du système hybride traitée à l'aide du logiciel MATLAB, qui va nous permettre de superviser les flux d'énergie et le protéger des batteries contre les surcharges et les décharges profondes, et également protéger la charge dans le cas où la demande n'est pas satisfaite.

On termine ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides (SEH)

I.1. Introduction

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental [Fel 12]. Malheureusement, le caractère aléatoire et discontinu de ces énergies les rend difficile à maîtriser et il est nécessaire de caractériser le plus précisément possible les variations de ces ressources. L'influence de leur nature peut être diminuée avec le couplage de deux ou plusieurs sources d'énergie, renouvelables ou pas, connectés à un réseau électrique ou alimentant une charge isolée [Rev 10].

I.2. Définition d'un SEH :

Le terme « Système d'énergie hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé. Leur intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source. Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie [Dha 12].

I.3. Le but d'un SEH

Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenues par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système [Ion 05].

I.4. La fiabilité et la performance d'un SEH

Du point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance, compte tenu des conditions particulières des régions isolées. Les systèmes isolés sont souvent caractérisés par une infrastructure (communication, services, etc.) pauvre, un accès difficile et un manque de personnel qualifié [Ion 05].

Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants,

l'architecture, et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien.

La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés).

Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel [Ion 05].

I.5. Classification des systèmes d'énergie hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues [Lud 11].

I.5.1. Classification par régime de fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique: refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc [Lud 11].

I.5.2. Classification par structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet une centrale tout entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie.

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une

éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle [Lud 11].

La figure suivante représentée les défirantes classification des systemes hybrides

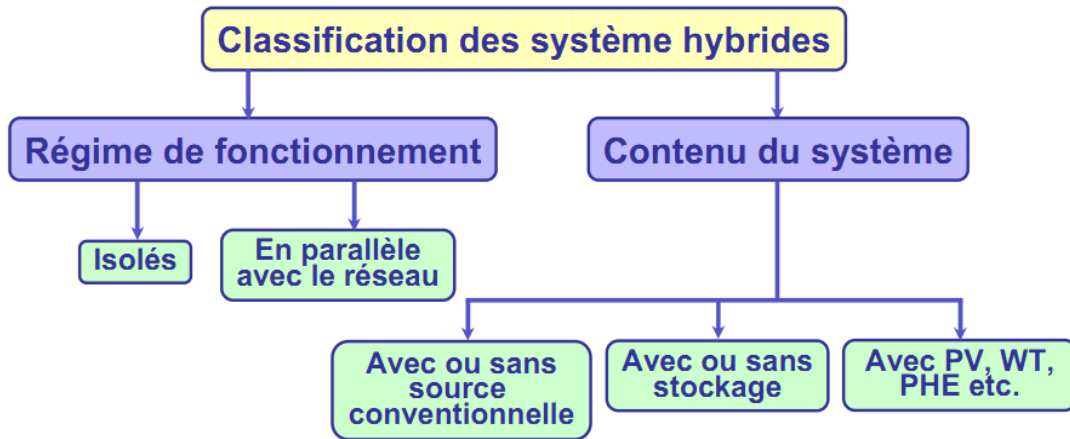


Figure I.1 :Classification des systèmes hybrides [Lud 11].

I.6.Schéma général des systèmes hybrides

Schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés selon leur fonction électrique : les éléments de génération, les éléments de charge et les éléments de stockage [Dha 12].

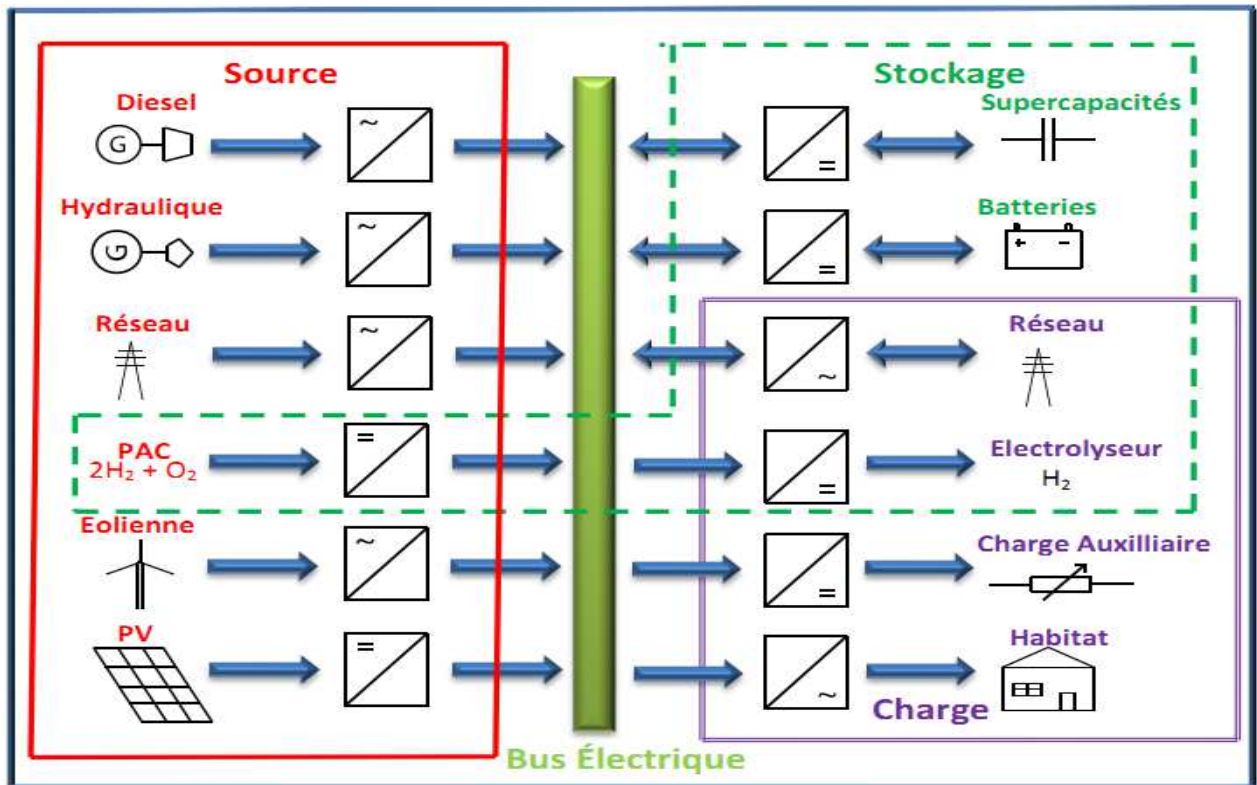


Figure I.2 :Schéma général de système énergétique hybride multi-sources[Dha 12].

I.7.Production de l'électricité par les énergies renouvelables.

Il y'en a pleinement d'énergies qui rentrent dans cette catégorie, elles sont classées comme suit figure(I.3)[Fed 14].

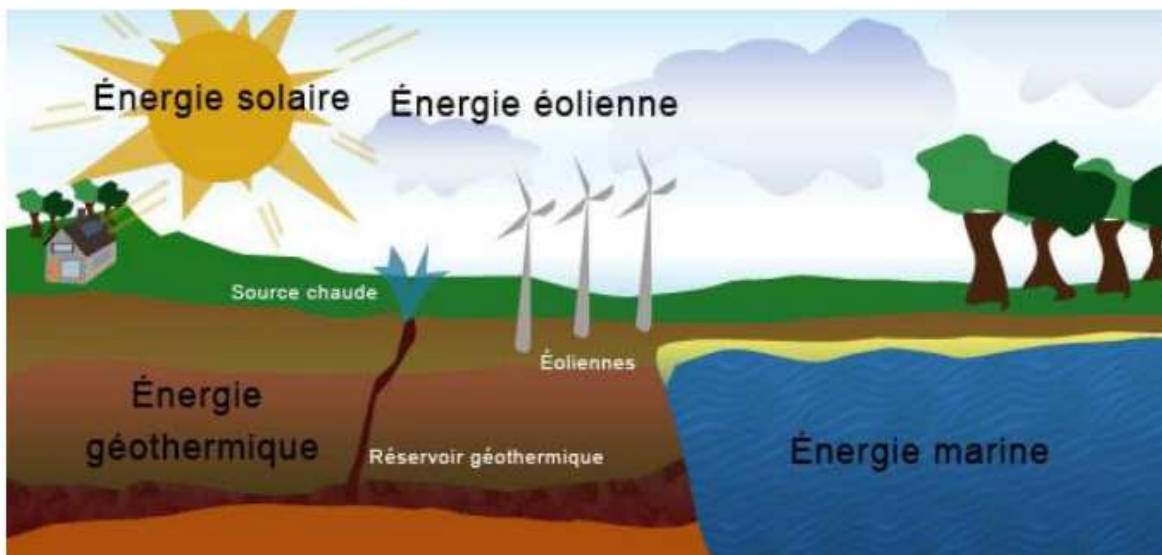


Figure I.3 : Les énergies renouvelables qui produisent l'électricité[Fed 14].

I.7.1. L'hydraulique :

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice .

I.7.2.Le solaire :

Deux grand types d'énergies rentrent au-dessous de cette catégorie, la première thermique se base sur la température. La deuxième photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique.

I.7.3.L'éolienne :

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère.

I.7.4. La biomasse :

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse.

I.7.5.La géothermie :

La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité.

I.7.6. Les énergies marines :

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice, l'énergie des vagues, l'énergie thermique des mers, les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique[Fed 14] .

I.8. Les différentes structures des systèmes hybrides

I.8.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir :

I.8.1.1. Système hybride éolien/source conventionnelle (diesel)

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

I.8.1.2.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. 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 .

I.8.1.3.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) , 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 [Rev 02].

I.8.2.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

I.8.2.1. 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 [Lud 11].

I.8.2.2. 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 [Rev 02].

I.8.2.3.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 [Lud 11].

I.8.2.4.Système d'énergie hybride photovoltaïque éolien avec stockage

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Voir Figure I.4), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit [Lud 11].En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques

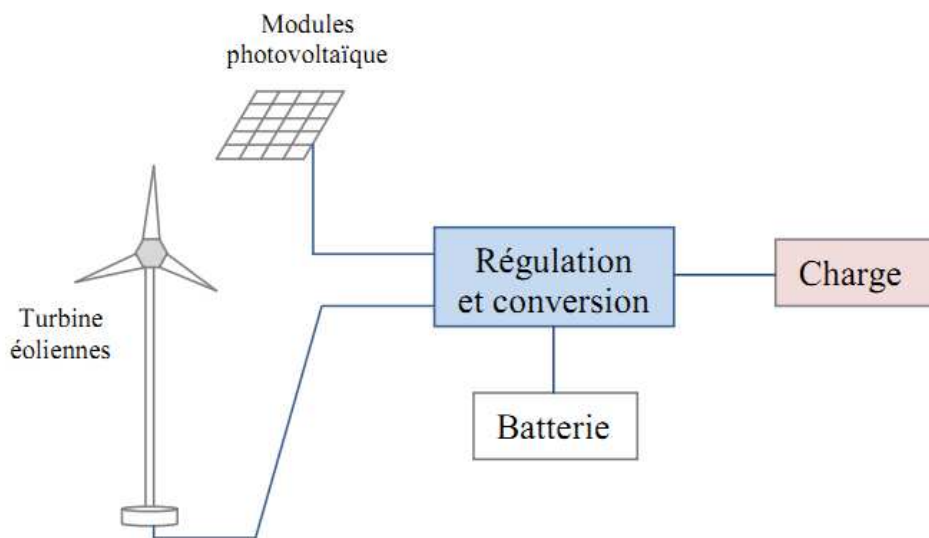


Figure I.4 : Schéma synoptique du système hybride photovoltaïque éolien stockage

I.8.3. 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 [Hac 15]. Et on va s'intéresser uniquement à la complémentarité des sources qui sont 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 [Lud 11].

I.9.Principaux composants du système d'énergie hybride photovoltaïque - éolien

I.9.1.Générateurs photovoltaïques

I.9.1.1. Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$). Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap (E_g) de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie inférieure E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque[Zid 14].

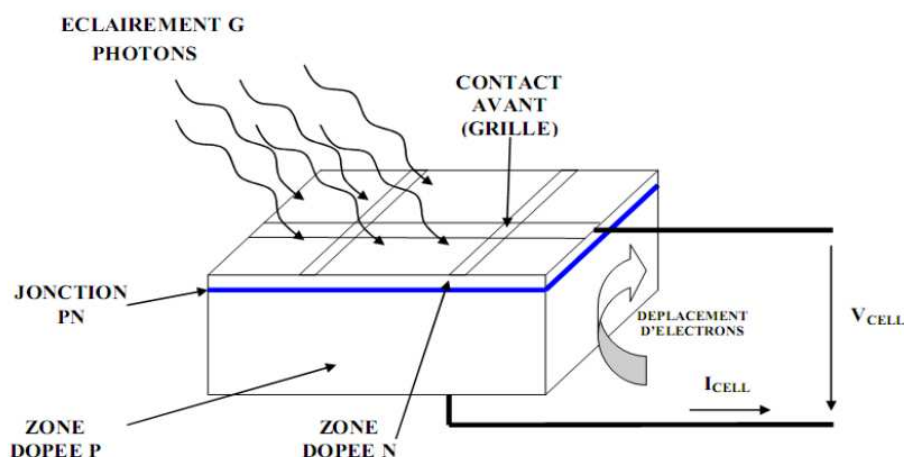


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [Zid 14].

I.9.1.2.Cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électroniques a semi-conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Les matériaux les plus connus sont :

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (Cds)
- l'arséniure de gallium (As Ga)
- le tellure de cadmium (Cd Te)
- le germanium (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)

Toutefois, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium pur obtenu à partir de la silice (quartz ou sable) par transformations chimiques et métallurgiques [Zid 14].

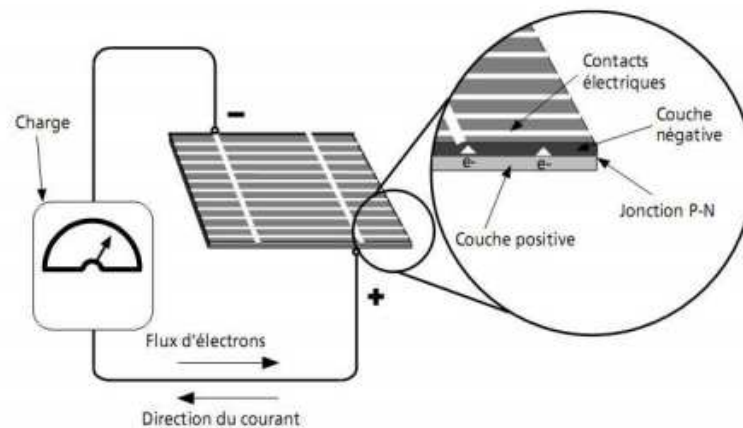


Figure I.6 :description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [Tou 13].

I.9.1.3.Différents types des cellules solaires:

Il existe trois types principaux de cellules :

a. Cellules mono- cristallines

Les cellules monocristallines qui s'approchent le plus du modèle théorique, est effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

b. Cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et hétérogènes. Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

c. Cellules amorphes

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible). Les Cellules amorphes sont caractérisées par :

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire. [Zid 14].

I.9.1.4. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclaircissement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [Mec 13].

a. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série figure(I.7) [Tou 13].

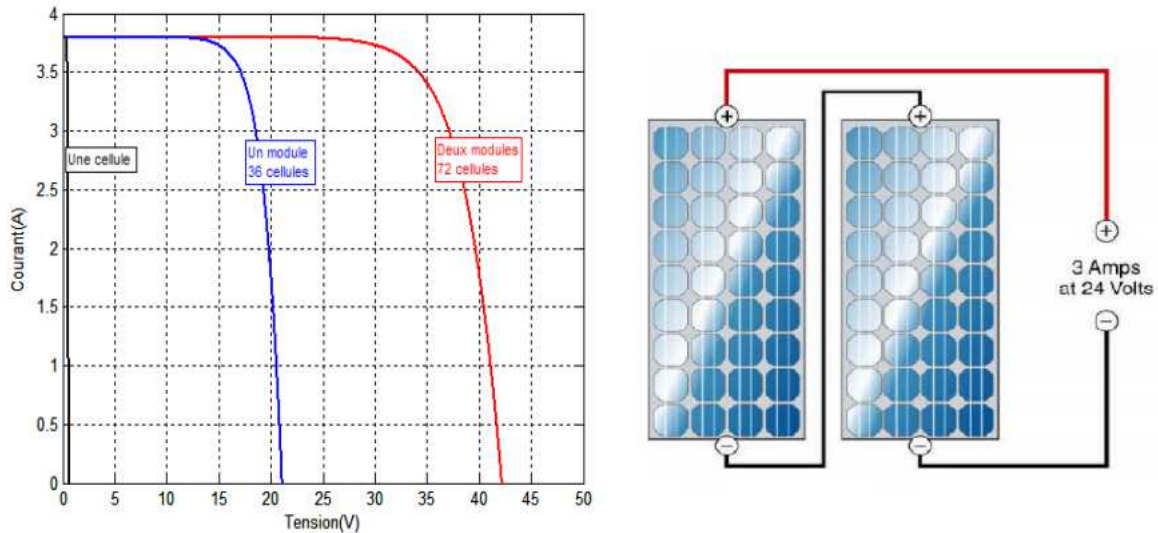


Figure I.7 :Ceulles identiques en série

b. Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [Tou 13].

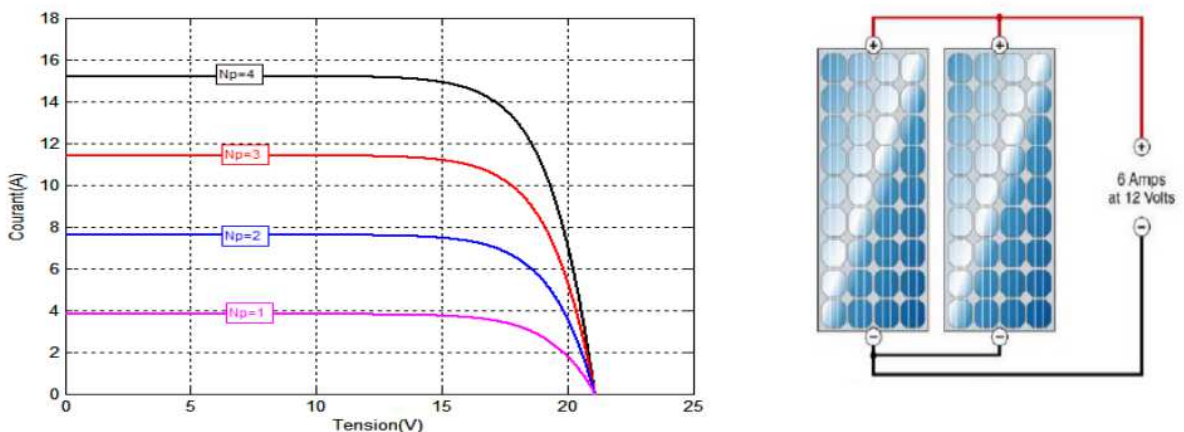


Figure I.8 :Cellules identiques en parallèles

I.9.1.5.Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont

montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [Tou 13].



Figure I.9 : Panneau photovoltaïque [Mec 13].

I.9.2. Générateur éolien

I.9.2.1. 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. 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 [Lah 13].

I.9.2.2. Constitution d'un aérogénérateur :

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [Lya 13]. La figure (I.10) montre la constitution d'une éolienne :

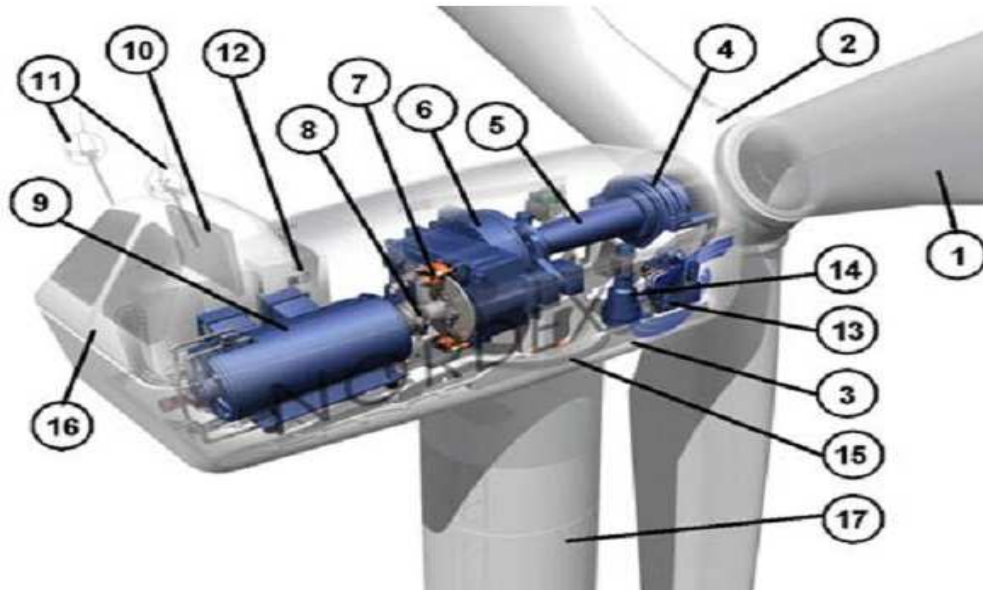


Figure I.10 :Exemple de constituants d'un système éolien à axe horizontal[**Ber 12**].

Tel que :

1 : pales, 2 : moyeu rotor, 3 : nacelle, 4 :cardan, 5 : transmission, 6 : multiplicateur de vitesse, 7 : frein à disque, 8 : accouplement, 9 : génératrice, 10 : radiateur de refroidissement, 11 : centrale de mesures du vent, 12 : contrôle, 13 : centrale hydraulique, 14 : mécanisme d'orientation face au vent, 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16 : capot, 17 : mât.[**Ber 12**]

I.9.2.3.Classification des éoliennes :

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical

a. Eolienne à axe vertical :

L'axe de rotation de ce type d'éolienne est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol donc facilement accessibles. Mais Un inconvénient, pour certaines de ces éoliennes, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage. D'autres utilisent la poussée (drag) plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et un moindre rendement. La majorité des de ces éoliennes tourne à faible vitesse, ce qui est très pénalisant dans les applications de génération d'électricité avec connexion au réseau public car la boîte de vitesses doit permettre une importante

démultiplication. Le faible rendement aérodynamique et la quantité de vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol constituent les principaux handicaps de ces éoliennes à axe vertical.

b. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement de manière à capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [**Lya 13**].

I.9.3. Systèmes de conversions

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose entre la source et la charge, il y'a deux types de convertisseurs : convertisseurs continu-continu (les hacheurs) et convertisseurs continu-alternatif (les onduleurs) .

I.9.3.1. Les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Il existe plusieurs types d'hacheurs, nous citons les plus utilisés couramment : le hacheur buck, le hacheur boost, le hacheur buck-boost.

I.9.3.2. Les onduleurs

Dans leur principe, les structures de ces convertisseurs continu-alternatif sont naturellement réversibles en puissance instantanée, donc en puissance moyenne, autorisant ainsi des marches en onduleur, lorsque la source continue, fournit une puissance moyenne non nulle à la source alternative, mais aussi au redresseur, dans le cas contraire [**Had 12**].

I.9.4. Les différentes technologies de stockage de l'électricité

Les solutions de stockage d'énergie se divisent en quatre catégories :

I.9.4.1. Stockage Mécanique

a. Station de pompage

Les stations de pompage sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du

bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique.

b. Stockage d'énergie par air comprimé

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé (Compressed Air Energy Storage - CAES) de grande puissance consistent, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) grâce à un compresseur. Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité. Le rendement des CAES est malheureusement réduit car la compression de l'air s'accompagne d'un échauffement

c. Stockage inertiel

Longtemps utilisé pour la régulation des machines à vapeur, le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique. L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie. Les systèmes de stockage par volant d'inertie ont une très forte réactivité et une grande longévité. Ces systèmes sont donc adaptés pour des applications de régulation, d'optimisation énergétique d'un système et d'amélioration de qualité.

I.9.4.2. Stockage électrochimique

a. Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydruure métallique. Pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible.
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation.
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.

b. Batteries électrochimiques

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium (zébra), etc. Les principaux avantages des batteries sont leur flexibilité de dimensionnement et leur réactivité.

c. Batteries à circulation

Dans les systèmes de stockage par batteries à circulation, deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques (couples d'ions métalliques zinc/brome, polybromure/polysulfure de sodium et vanadium/vanadium), séparés par une membrane échangeuse de protons, circulent à travers des électrodes. L'échange de charges permet de produire ou d'absorber l'électricité.

I.9.4.3. Stockage électromagnétique

Le principe des supercapacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction. L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts.

I.9.4.4. Stockage thermique (chaleur et froid)

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW, les réseaux de chaleur, Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants [**Bel 15**].

I.9.5. Le choix de technologie de stockage de l'électricité

Parmi les choix possibles, la batterie d'accumulateurs au plomb est une solution de

stockage particulièrement séduisante.se distingue des autres types de batteries et cela pour les avantages suivant :

- Recyclable.
- Faible coût .
- Un bon rendement .
- Un Meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien .
- Sa durée de vie .
- Caractéristique électrochimique favorable .
- Une large disponibilité .
- Entretien faible ou nul .
- Bonne tenue aux températures extrêmes.[Bag 11].

I.10. Les différents architecteurs des systèmes hybrides

les systèmes hybrides sont souvent classés en trois filières selon le type de nœud électrique de couplage et les convertisseurs statiques associés :

I. 10.1. Architecture à bus à CC

Dans le système hybride présenté dans la Figure (I-12), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC :

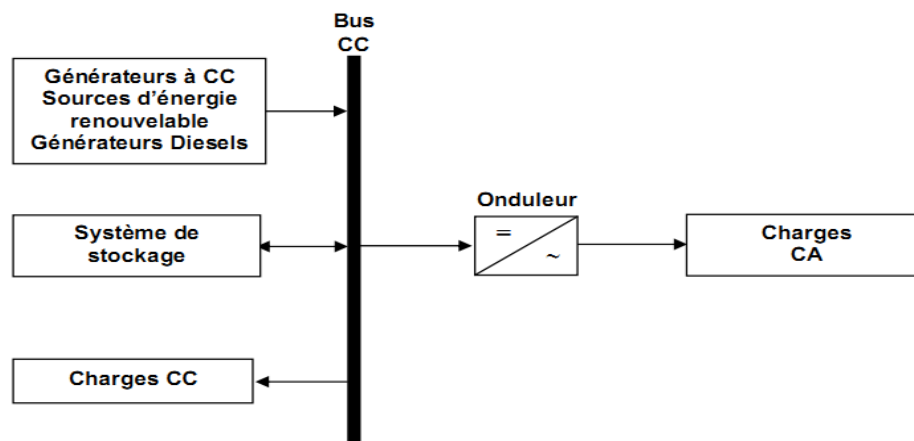


Figure I 11 : Configuration du SEH à bus CC[Ion 05].

a. Avantages :

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

b. Inconvénients :

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge[Bag 11],[Ion 05].

I. 10.2. Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la Figure(I-12).

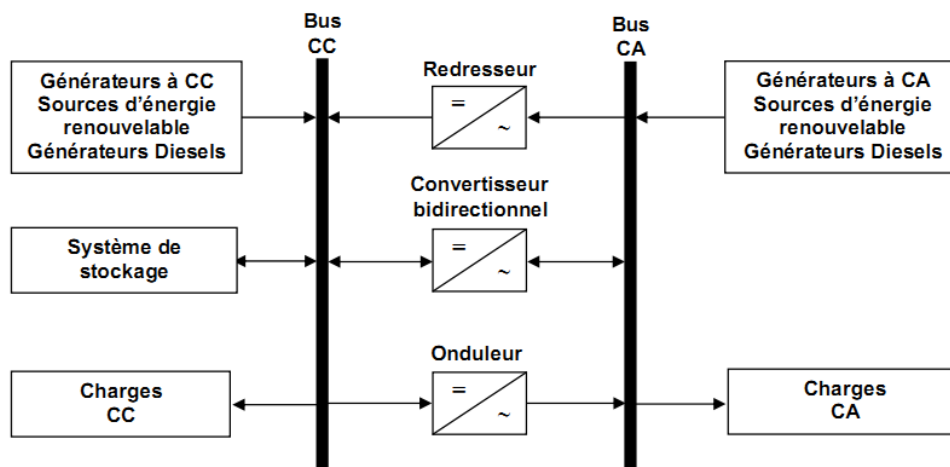


Figure I 12 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA[Ion 05].

a. Avantages :

- Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie.
- Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

b. Inconvénients :

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD)[bag 11], [Ion05].

I. 10.3. Configuration de bus CA

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA) .

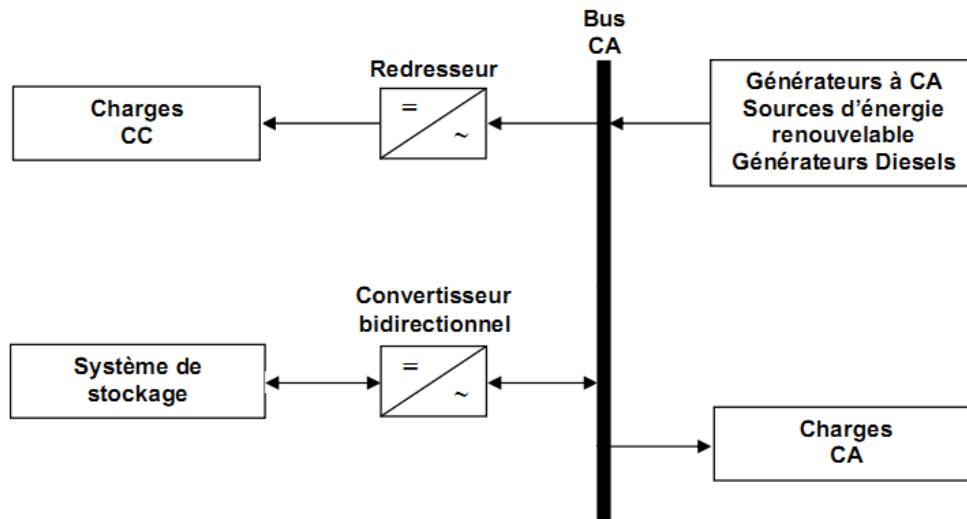


Figure I 13 : Configuration du SEH à bus AC

a. Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres .
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus (AC).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif(transformateur).
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement.
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces.
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence) .

b. Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs .
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande .[Bag 11]

I.11. Avantage et inconvénient d'un système hybride

I.11. 1. Avantages

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

I.11.2. Inconvénients

- Coût de capital élevé.

- Plus complexe que les systèmes électrique isolés; nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité[Lah 13].

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale sur les différents moyens de production d'énergie électrique d'origine renouvelables.

Tous les composants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients et limites d'utilisation de ces configurations.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du système globale doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables. Dans ce but, les sources du SEH étudié sont modélisées et simuler dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion photovoltaïque

II.1. Introduction :

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV) avec un système de stockage, le stockage est assuré par des batteries. Ce système, appelé systèmes PV-Batteries. A cet effet nous nous intéressons sur les modèles de ces composants, c'est à dire la modélisation du champ photovoltaïque, batterie, régulateur et le convertisseur, en suite une gestion d'énergie de ce système par un algorithme qui prouve sa fiabilité par les résultats de simulation obtenir.

II.2. Systèmes photovoltaïques autonomes

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. La Figure(II.1) présente un exemple d'un système PV autonome, en remarquant qu'il y a un système de stockage qui est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système est utilisé en tampon, celui-ci étant rechargé en cas de surplus de production et déchargé en cas de surconsommation.



Figure .II.1 : Système photovoltaïque autonome [Xua 15].

Le système de stockage représente une partie très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement. Un sous-dimensionnement a notamment pour conséquences un vieillissement prématuré du système de stockage ainsi qu'un

accroissement des délestages de consommation et de production alors qu'un surdimensionnement peut conduire à un surcoût économique [Xua 15].

II.3. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque:

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul du courant et de la tension. Parmi ces modèles on trouve :

- **Le modèle idéalisé:** c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est supposée être nulle ($R_s = 0$).
- **Le modèle à une diode :** pour tenir compte des chutes de tension dans les zones P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_{sh} .
- **Le modèle à deux diodes :** une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons.

Par manque de précision du modèle idéalisé et la complexité des autres modèles plus précisés, le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision, il apparaît très adapté pour notre étude [Ben 14].

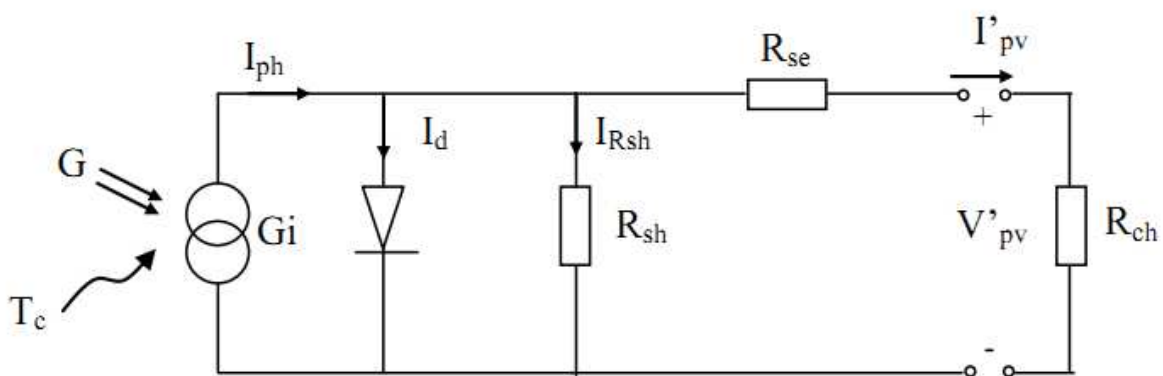


Figure .II.2: Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode.

Avec :

G_i : Source de courant parfaite.

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaine de conversion photovoltaïque

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_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

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

R_{ch} : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

D'après la figure (II.2), le courant I_{pv} généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (II.1)$$

I_{ph} : Représente le photo courant, il dépend de l'irradiation et de la température.

I_d : Représente le courant de diode.

I_{rsh} : Représente le courant shunt.

L'expression(II.1) s'écrit aussi de cette manière :

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot [1 - K_1 \cdot (e^{K_2 V_{pv}^m} - 1)] \quad (II.2)$$

Où les coefficients K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} (II.3) \quad K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc} \cdot (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}} \right] (II.4) \quad K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \quad (II.5)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.6)$$

Tel que :

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum. (A)

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelée aussi tension optimale. (V)

I_{cc} : Courant de court circuit. (A)

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaine de conversion photovoltaïque

V_{co} : Tension en circuit ouvert. (V) [Ben 14].

Il est à noter que l'équation (II.2) 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 :

$$\Delta T_c = T_c - T_{STC} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{STC}} - 1\right) \cdot I_{cc,STC} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

G_{STC} et G : Représentent respectivement, l'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

T_{STC} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température (V).

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température (A).

ΔT_c : Représente la variation de la température ($^\circ\text{C}$).

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

β_{oc} : Coefficient d'incrémentation de la tension quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv,STC} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv,STC} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

Les paramètres du module sous les conditions standards de fonctionnement sont fournis par les constructeurs de panneaux photovoltaïques [**Ben 14**].

II.4. Dimensionnement du système PV

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, il constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place du système. Il dépend :

- de l'ensoleillement sur le site au cours de l'année,
- de l'énergie requise par chaque récepteur à alimenter,
- du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage.

Il est alors évident qu'une demande importante en énergie augmentera la taille et le coût du système tandis que le choix de composants à haut rendement énergétique permettra de les réduire.

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- évaluation des besoins énergétiques,
- dimensionnement des panneaux PV,
- dimensionnement du stockage,
- dimensionnement des convertisseurs. [**Aka 10**].

II.5. Dimensionnement des panneaux PV

Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante :

$$P_c = \frac{B_j}{E_j \cdot \eta_b \cdot \eta_i} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

P_c : puissance crête des panneaux PV [W],

E_j : Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable [kWh/m²/j],

η_b : Rendement électrique des batteries,

η_i : Rendement électrique de l'installation (tenant compte des différentes pertes et des convertisseurs). [Aka 10].

II.6.Rendement Générateur photovoltaïque

L'énergie produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé. L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par [Fel 12]:

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot S_{PV} \cdot P_f \cdot H \quad (\text{II.13})$$

Où :

S_{PV} : La surface totale du générateur photovoltaïque (m^2) ;

R_{PV} : Le rendement du générateur photovoltaïque ;

H : L'irradiation solaire sur plan incliné (KWh/m^2) ;

P_f : Le facteur de remplissage du module, égal à 0.9.

Le rendement du générateur photovoltaïque est représenté par l'équation suivante :

$$R_{PV} = \eta_r \{1 - \gamma(T_c - 25)\} \quad (\text{II.14})$$

$$T_c = T_a + G_{inc} \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (\text{II.15})$$

Avec :

γ : Coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à ($0.0045 / ^\circ C$) ;

η_r : Le rendement de référence du générateur photovoltaïque ;

T_a : Température ambiante moyenne journalière ($^\circ C$) ;

T_c : Température cellule moyenne journalière ($^\circ C$) ;

$NOCT$: Température nominale de fonctionnement de la cellule. [Fel 12].

II.7. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards de fonctionnement :

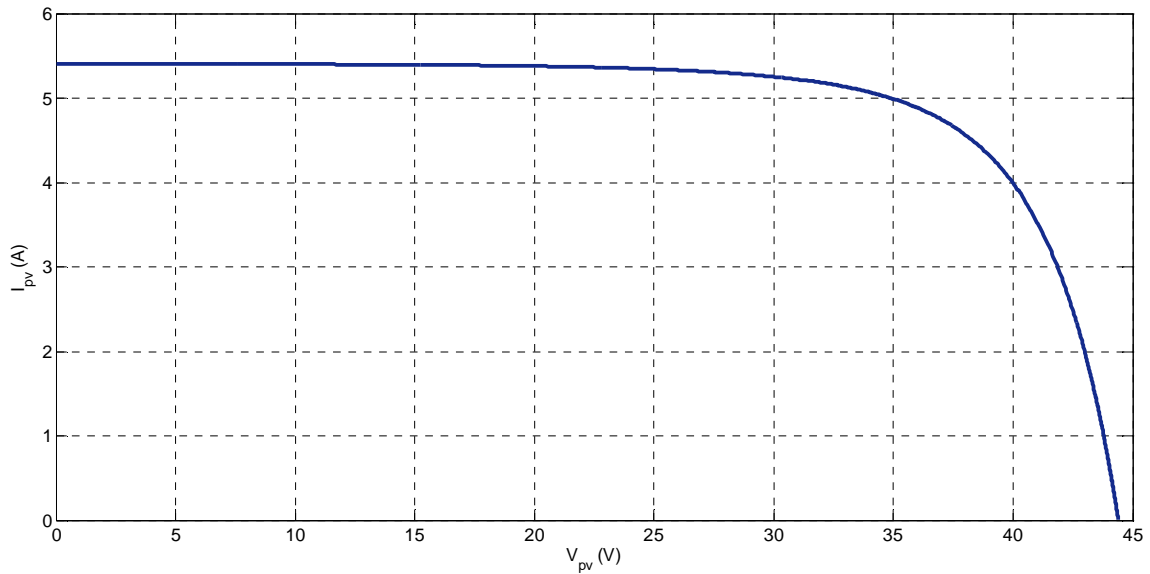


Figure II.3 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

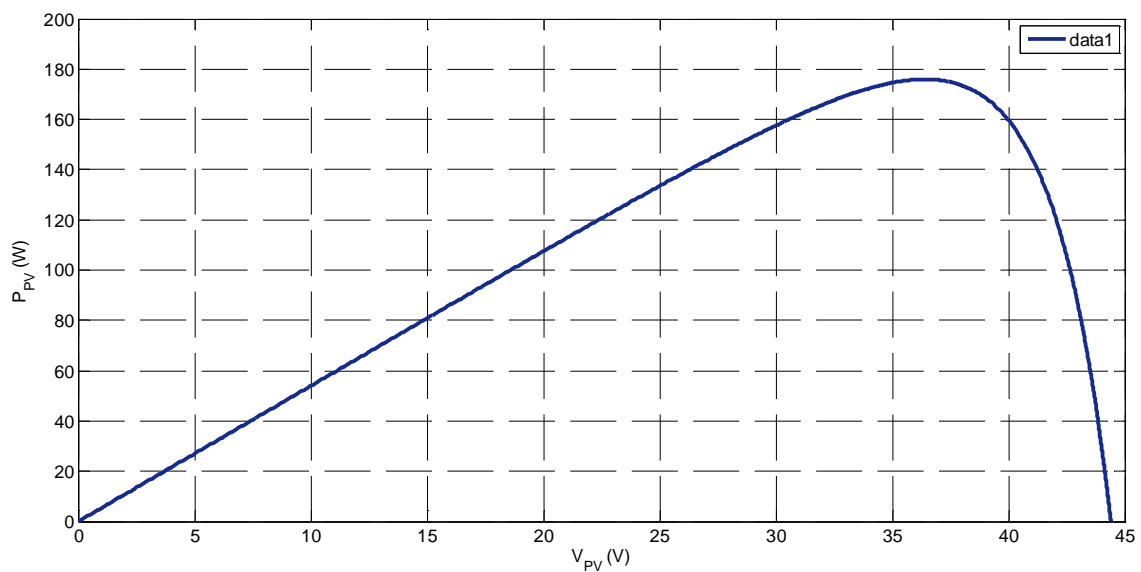


Figure II.4 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions : $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

II.8. Influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques du module photovoltaïque

II.8.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque:

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 200 à 1000W/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 :

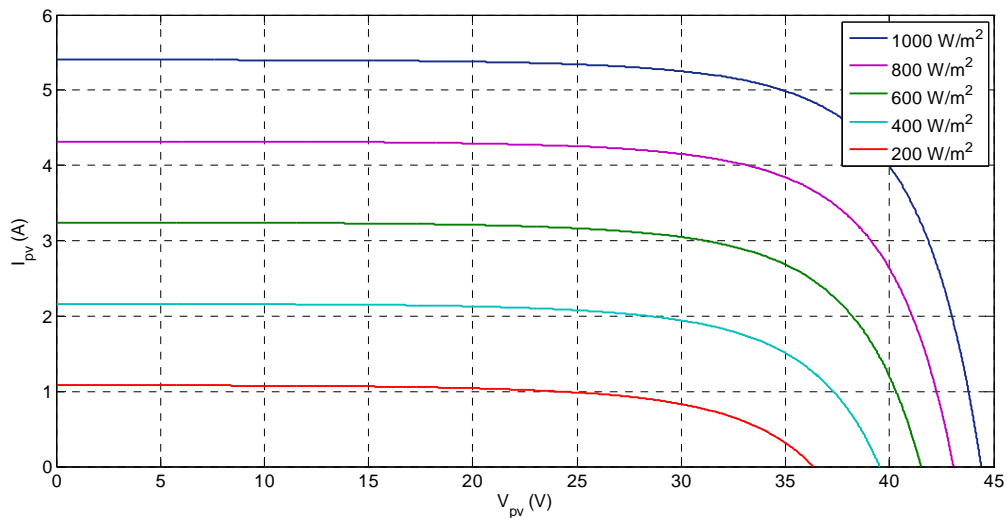


Figure II.5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

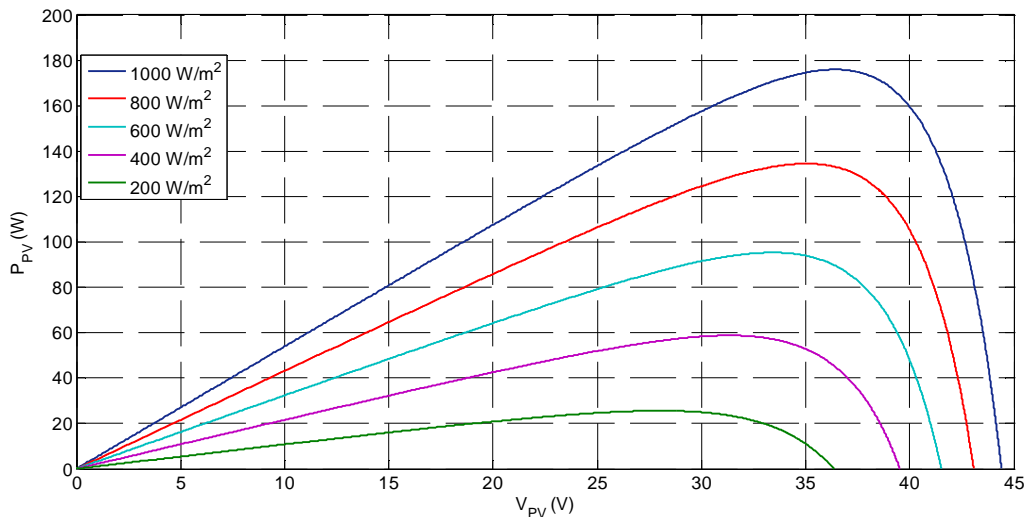


Figure II.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

La variation de l'ensoleillement influe sur le courant de court-circuit qui diminue quand l'ensoleillement diminue, par contre la tension à circuit ouvert est peu sensible à cette variation, ce qui engendre une diminution de la puissance maximale. (On remarque que

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion photovoltaïque

l'ensoleillement a une influence proportionnelle sur l' I_{cc} et une légère influence sur la V_{co} .
Donc l'ensoleillement influe proportionnellement sur la puissance ($P=I*V$)

II.8.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque:

Pour un éclairement constant de $1000W/m^2$, on fait varier la température de $0^{\circ}C$ à $100^{\circ}C$ avec un pas de 25, les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ sont représentées dans les figures qui suivent :

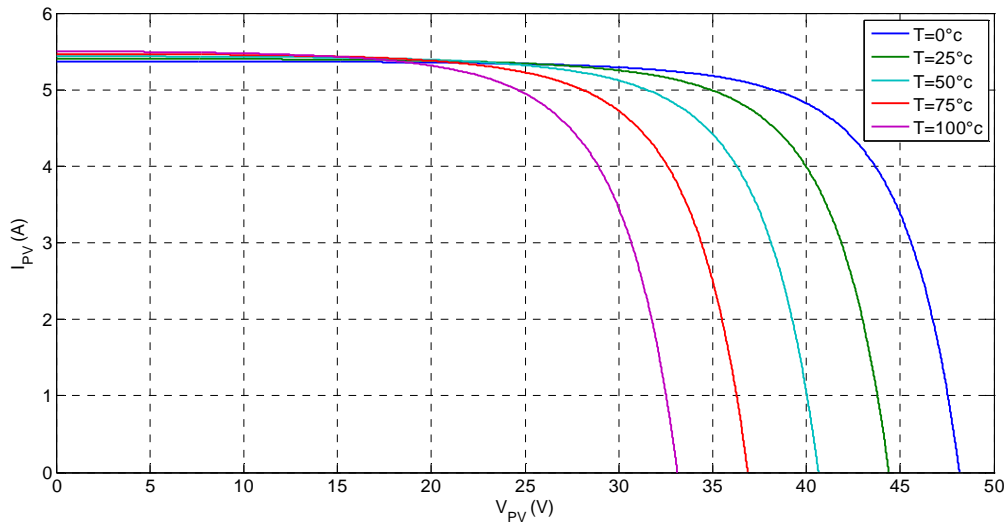


Figure II.7 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

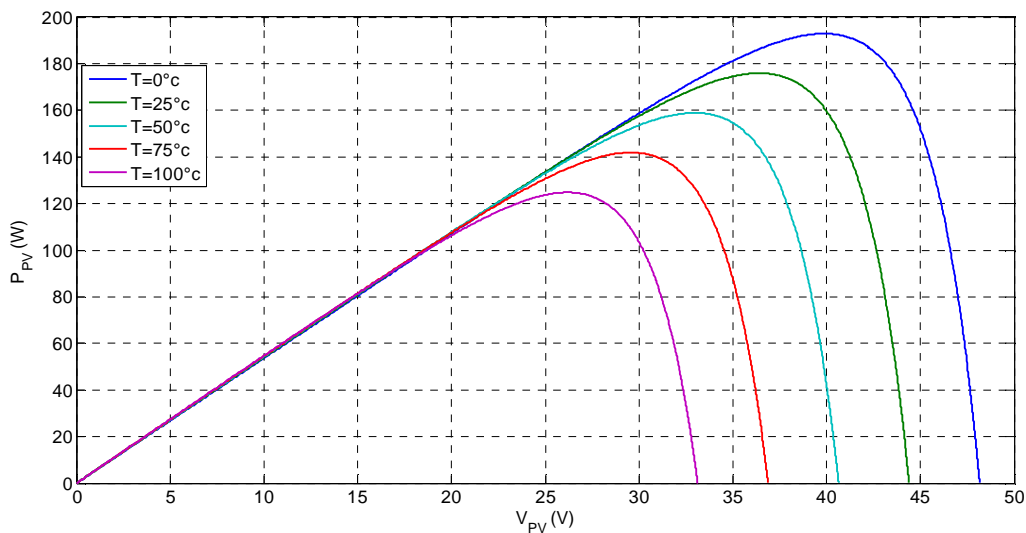


Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque. La tension de circuit ouvert diminue, lorsque la température

augmente. Par contre le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température, cela se traduit par une baisse de puissance. (La température a une influence inversée sur la V_{co} et une légère influence sur I_{cc})

II.9.Modélisation du hacheur survolteur :

II.9.1. Convertisseur DC/DC de type élévateur (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 Ce dispositif de l'électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau photovoltaïque à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale [Ben 14],[Lah 13], la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.9) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque alimentant une charge résistive R_L .

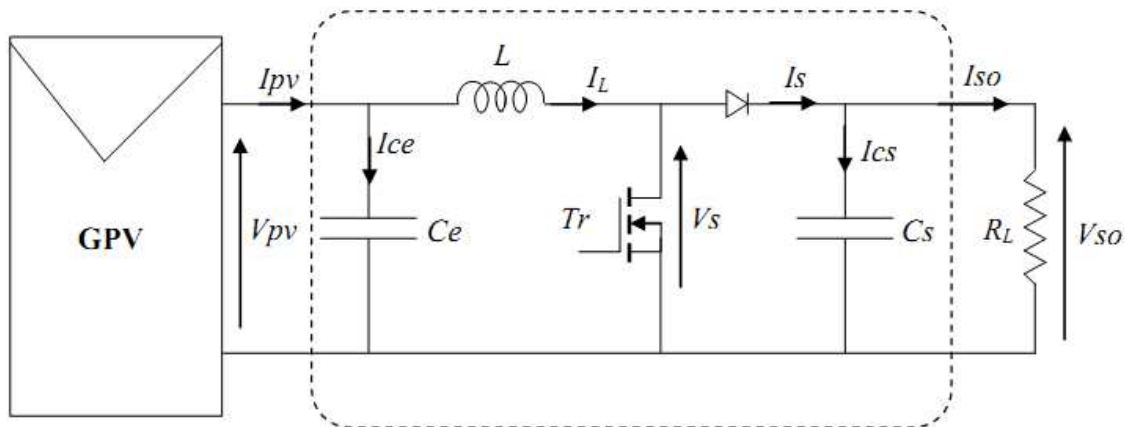


Figure II.9 : Système PV conçu autour d'un hacheur BOOST [Khé 09].

En mode de conduction continue le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor Tr .

Dans la première phase Tr est passant, la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv}$ le courant traversant l'inductance augmente linéairement.

Dans la deuxième phase le transistor est bloqué, la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv} - V_{so}$. Dans cette phase le condensateur C_s se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [Khé 09].

II.9.2. Modèle d'un hacheur survolteur (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. Les équations électriques du hacheur Boost sont : [Lah 13]

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} + (1 - u)V_{dc} \quad (\text{II.16})$$

$$(1 - u)I_l = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.17})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen α . Son expression est donnée par l'équation (II.18). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α [Sin 10].

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.18})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \quad (\text{II.19})$$

Où α est le rapport cyclique.

II.10. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking(MPPT)) :

Par définition, une commande MPPT, associé à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt} , I_{opt}).

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes sont utilisées :

- la méthode d'ajustement de courbe,
- la méthode « look-up table »,

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaine de conversion photovoltaïque

- la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur,
- la méthode de court circuit,
- la méthode Perturbation Observation (P&O),
- la méthode d'incrément de conductance,
- la méthode de la logique floue,
- la méthode du neuro-floue

Le système de poursuite du point de puissance maximale que nous avons choisi est la méthode perturbation & observation (P&O). Vu sa facilité d'implémentation, et elle permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée [Ben 14].

II.10.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O):

La méthode Perturbation & observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM ; on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Comme indique précédemment, le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.10), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande appropriée.

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion photovoltaïque

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

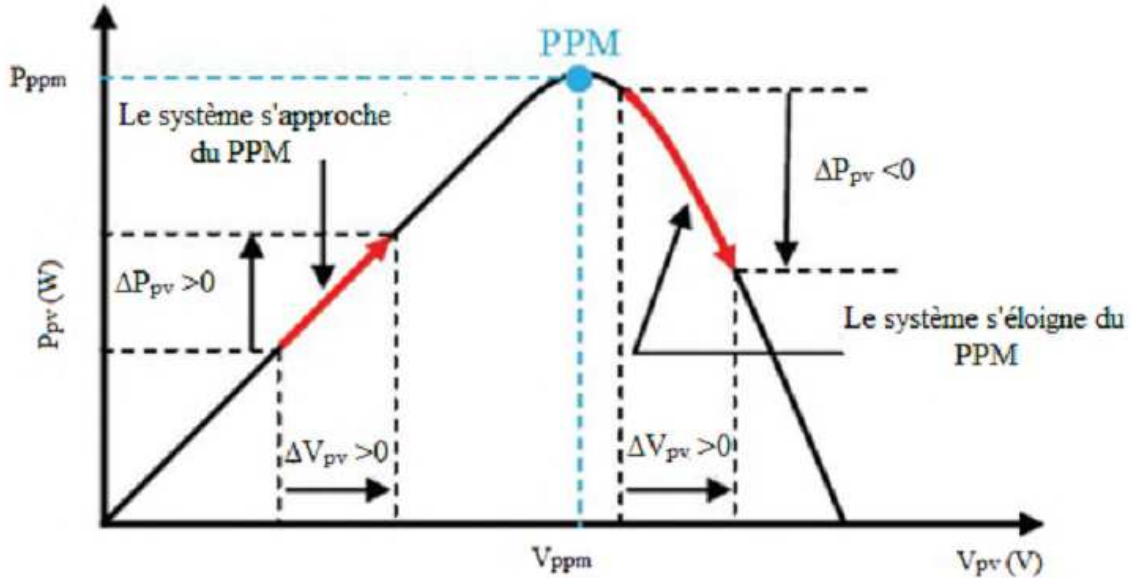


Figure II.10 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque. [Ben 14]

La figure (II.10) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant. La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM. La figure (II.11) présente le diagramme de l'algorithme P&O [Ben 14].

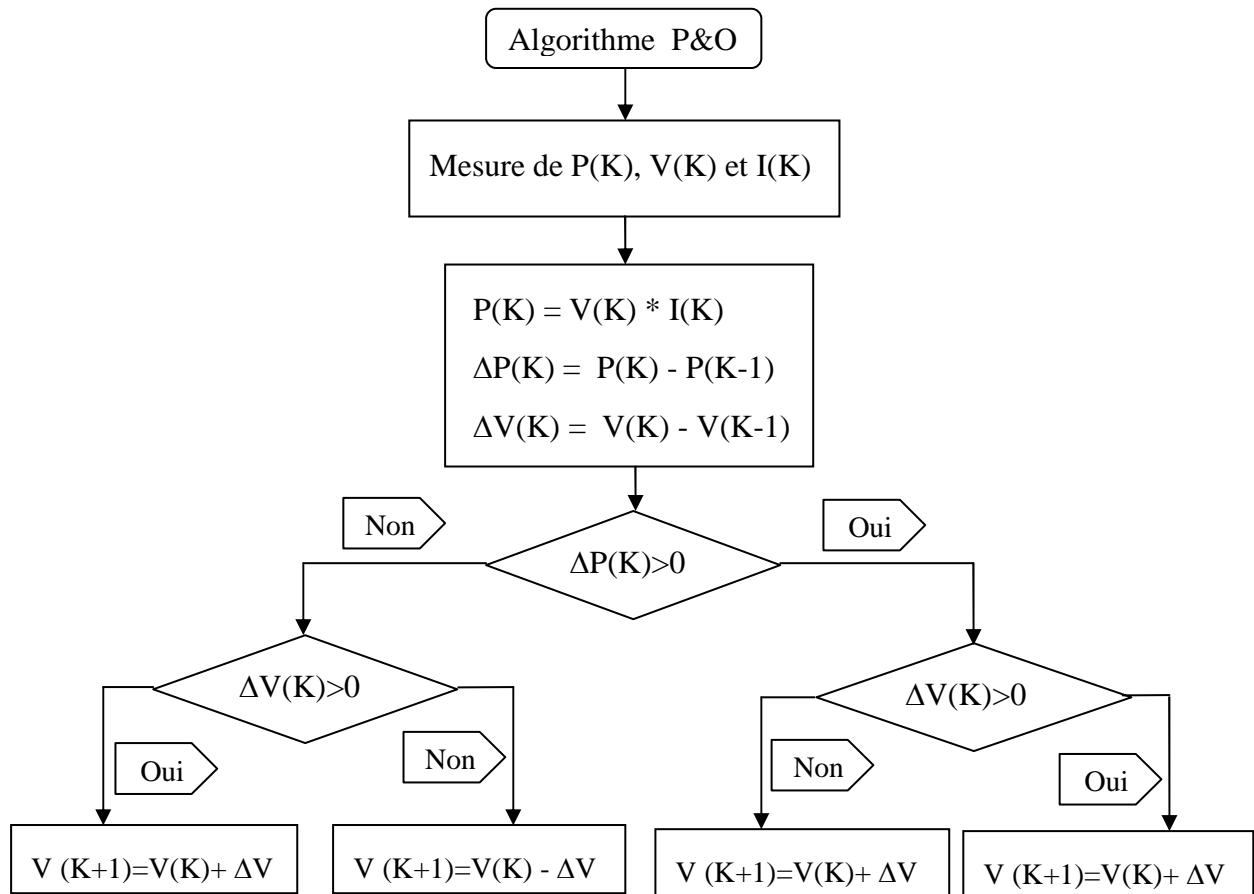


Figure II.11 : présente le diagramme de l'algorithme P&O.

II.10.2. Les résultats la commande MPPT :

Pour la suite, nous nous proposons d'évaluer la robustesse de l'algorithme P&O vis-à-vis des perturbations induites par le changement des paramètres météorologiques et celles causées par les variations de la charge. La figure (II.12) représente la réponse de l'algorithme P&O suite à des variations de l'ensoleillement, les autres paramètres étant considérés constants. Nous avons testé, également, la réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de la température interne du module photovoltaïque, les résultats sont représentés sur la figure (II.13) [Khé 09].

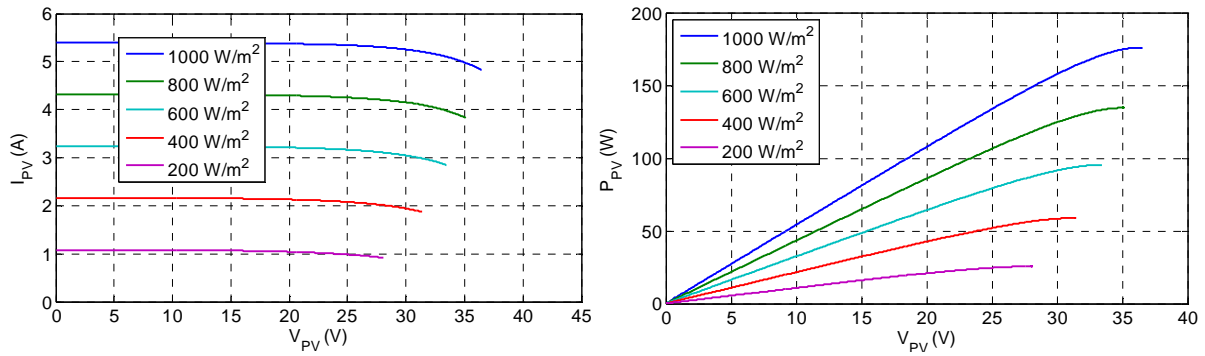


Figure II.12:L'algorithme P&O suite à des variations de l'ensoleillement

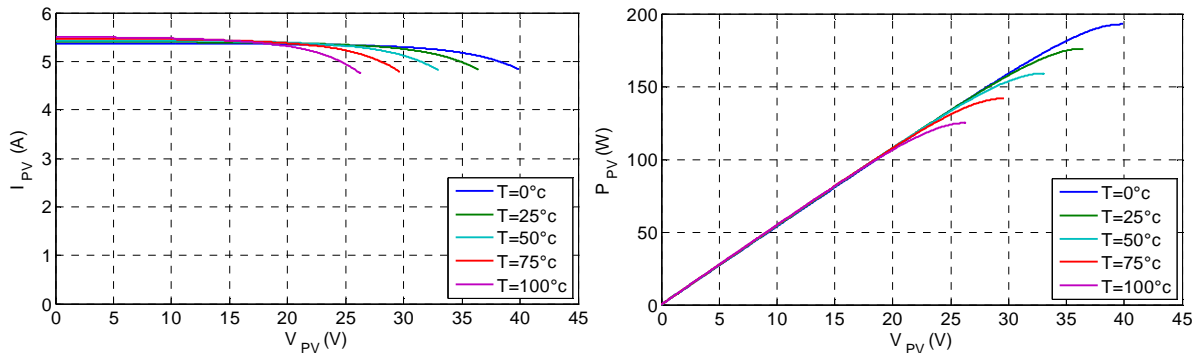


Figure II.13 :L'algorithme P&O pour différentes valeurs de la température interne du module photovoltaïque

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

II.11. Le modèle électrique de la batterie

Le modèle de batterie implanté dans les programmes de simulations numériques s'inspire du modèle des batteries. Soit U , la tension aux bornes de la batterie:

$$U = E_0 - K \cdot \frac{\int I_b \cdot dt}{Q_0} - R_b \cdot I_b \quad (\text{II.20})$$

E_0 est la tension à vide de la batterie chargée; K une constante qui dépend de la batterie; R_b la résistance interne de la batterie, I_b le courant de décharge (> 0); Q_0 est la capacité de la batterie (Ah) et $-\frac{\int I_b \cdot dt}{Q_0}$ indique l'état de décharge de la batterie [Rev 08].

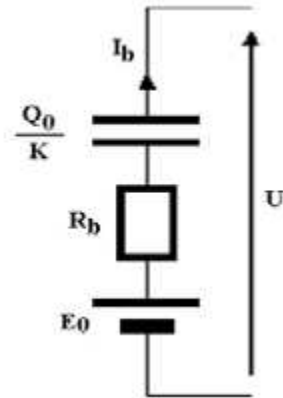


Figure II.14 : Modèle électrique de la batterie

II.11.1. Le dimensionnement des batteries

Le dimensionnement des batteries requiert donc une attention particulière afin d'augmenter la durée de vie de ces dernières et par la même occasion diminuer le coût global du système. La capacité nominale des batteries est donnée par la relation suivante :

$$C_b = \frac{B_j \cdot \text{Aut}}{U_{\text{bat}} \cdot \eta_b \cdot D_b} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

C_b : la capacité nominale des batteries [Ah]

B_j : les besoins énergétiques journaliers [Wh]

Aut : le nombre de jour d'autonomie

U_{bat} : la tension nominale des batteries [V]

η_b : le rendement énergétique des batteries

D_b : la profondeur de décharge des batteries. [Aka 10].

II.12. Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée. Le hacheur Buck-Boost est caractérisé par une fonction de transfert qui peut être soit supérieure soit inférieure à l'unité [Bag 11]. La figure (II.15) représente un système photovoltaïque constitué d'un GPV, un hacheur Buck-Boost et une charge résistive RL [Khé 09].

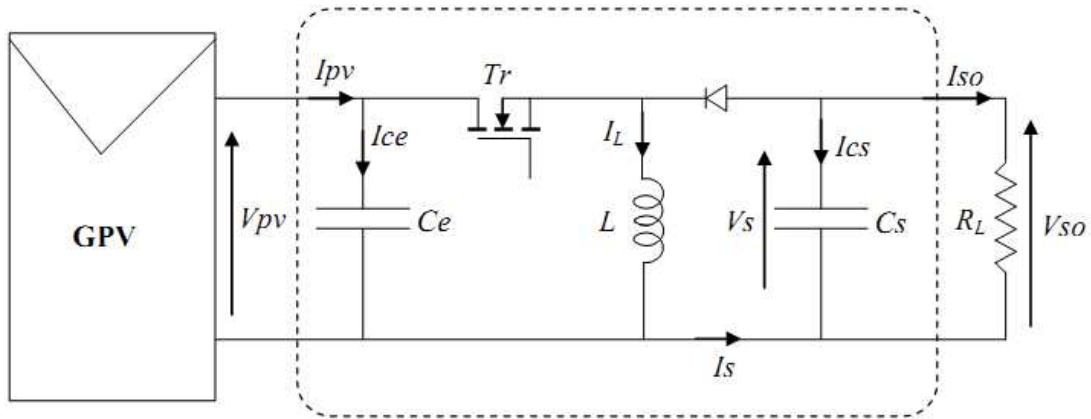


Figure II.15 : Système PV conçu autour d'un hacheur Buck-Boost

Modèle mathématique équivalent :

Lorsque l'interrupteur K est fermé :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.22})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II.23})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.24})$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (\text{II.25})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_o(t) - I_L(t) \quad (\text{II.26})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o(t) \quad (\text{II.27})$$

II.13. Modèle du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension

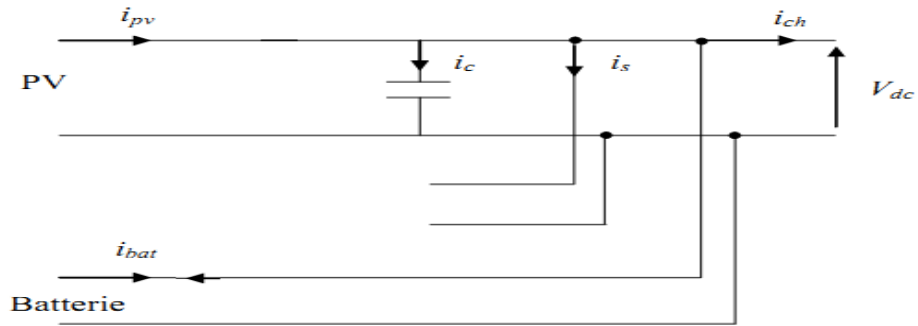


Figure II.16 : Schéma du bus continu

D'après la figure (II.16) on a :

$$I_{ch} = -I_{pv} - I_c - I_s - I_{bat} \quad (II.28)$$

$$I_c = \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II.29)$$

Tel que : I_{pv} est négatif étant donné c'est une source de production d'énergie

II.14. Gestion d'énergie du système photovoltaïque

Le chronogramme suivant présenter l'algorithme de gestion d'énergie de système photovoltaïque qu'il est implanté sous MATLAB pour la simulation :

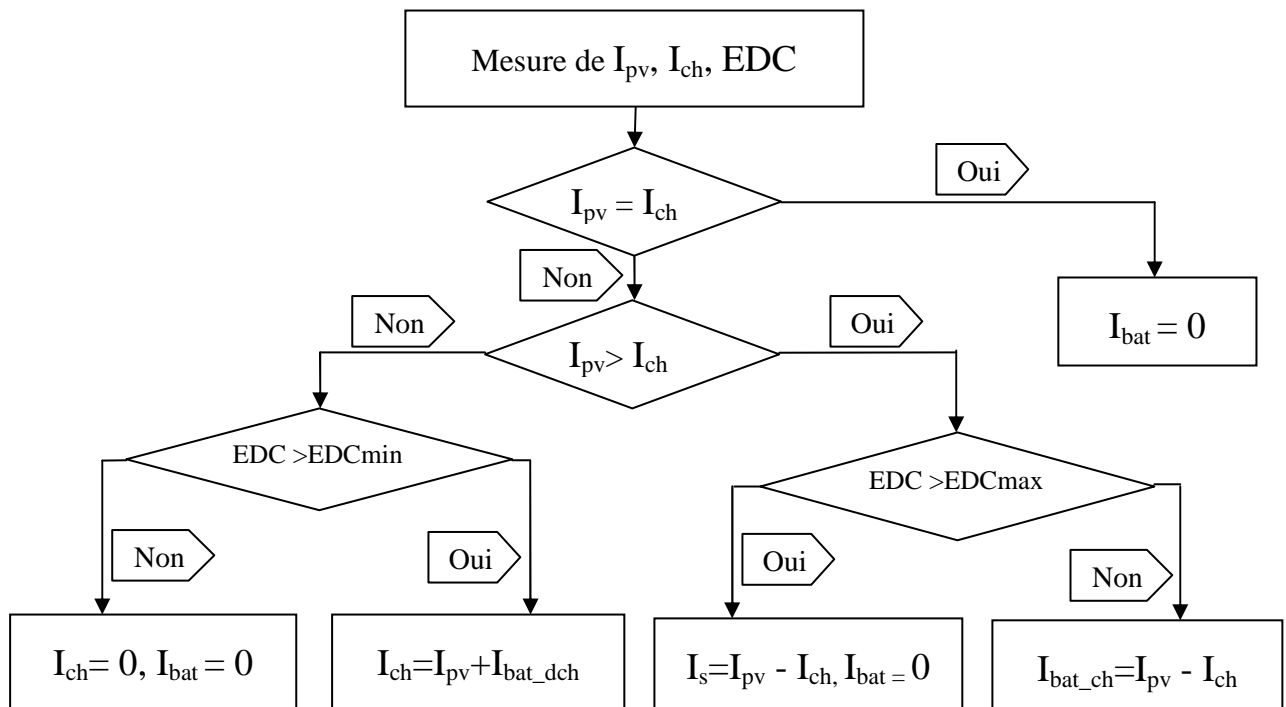


Figure II.17 : Organigramme d'algorithme de gestion d'énergie de système photovoltaïque

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion photovoltaïque

L'algorithme de gestion d'énergie de système photovoltaïque sera chargé de réguler l'énergie provenant des panneaux photovoltaïques et de stockage suivant la demande du consommateur. L'algorithme de supervision est basé sur cinq scénarios :

- Alimentation du consommateur uniquement par les panneaux photovoltaïques si l'énergie solaire provenant des panneaux est égale à la demande de consommateur.
- Alimentation du consommateur par les panneaux photovoltaïques et le stockage si l'énergie solaire insuffisante.
- Déconnecter les batteries et le consommateur si l'énergie solaire insuffisante ($P_{pv} < P_{ch}$) et $EDC < EDC_{min}$.
- Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux photovoltaïques si l'énergie solaire suffisante.
- Alimentation du consommateur uniquement par les panneaux photovoltaïques si l'énergie solaire suffisante et $EDC = EDC_{max}$ et le surplus d'énergie sera dirigé vers une charge de décharge.

II.15. Simulation du système photovoltaïque avec stockage

Le système photovoltaïque est constitué de 33 panneaux photovoltaïques de 175 W chacun, d'un hacheur Buck-Boost et d'un hacheur Boost et de 20 batteries plomb acide branchées en série.

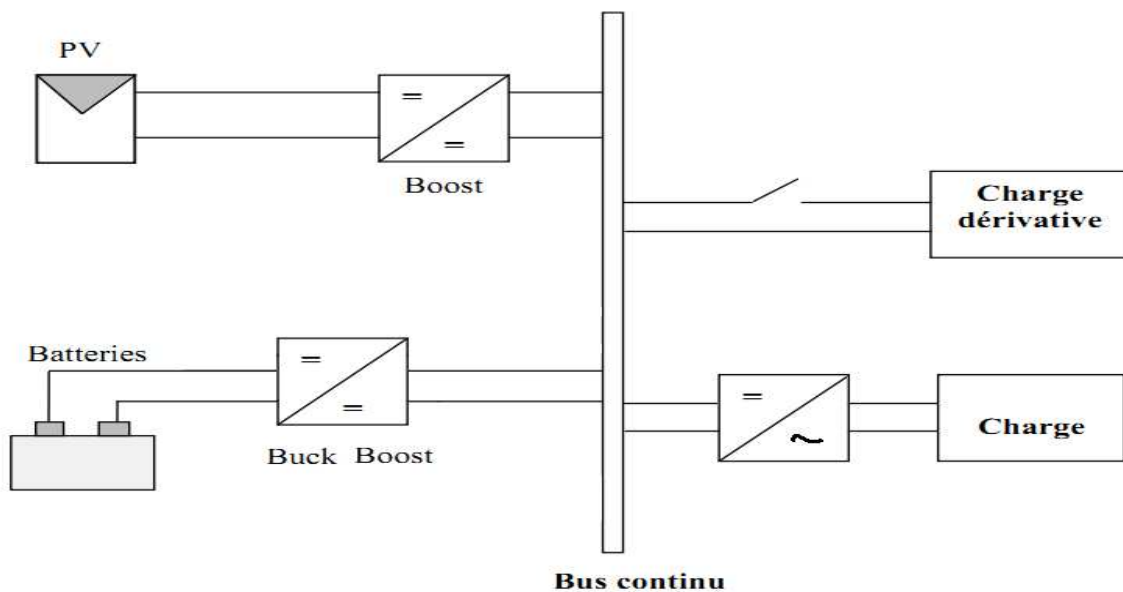


Figure II.18 : Schéma du système photovoltaïque avec stockage

Chapitre II : Gestion d'énergie d'une chaine de conversion photovoltaïque

Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil de consommation, ce profil tient compte des périodes d'utilisation d'électricité au cours de la journée.

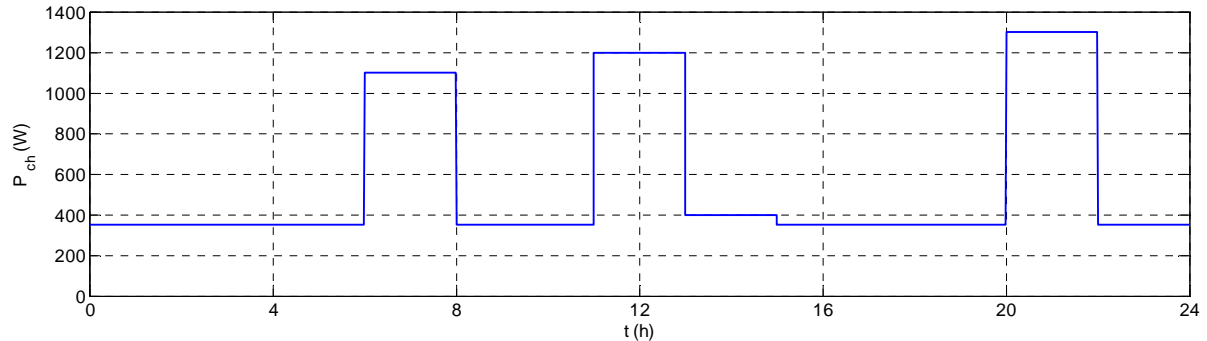


Figure II.19 : Profil de consommation

II.15.1. Résultats de simulation et interprétations pour une journée d'été

Pour la simulation qui va suivre nous avons définis un profil d'éclairement dont l'allure est présentée sur la figure(II.20) pour cet essai, la température est gardée constante à 25°C, seul l'éclairement varie. Comme on peut le voir dans la figure (II.20).

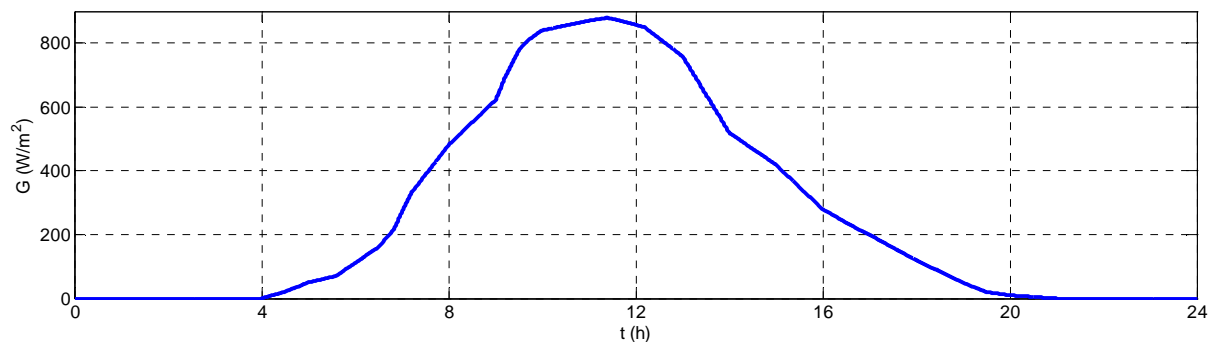


Figure II.20 : Profil de l'éclairement pendant une journée d'été

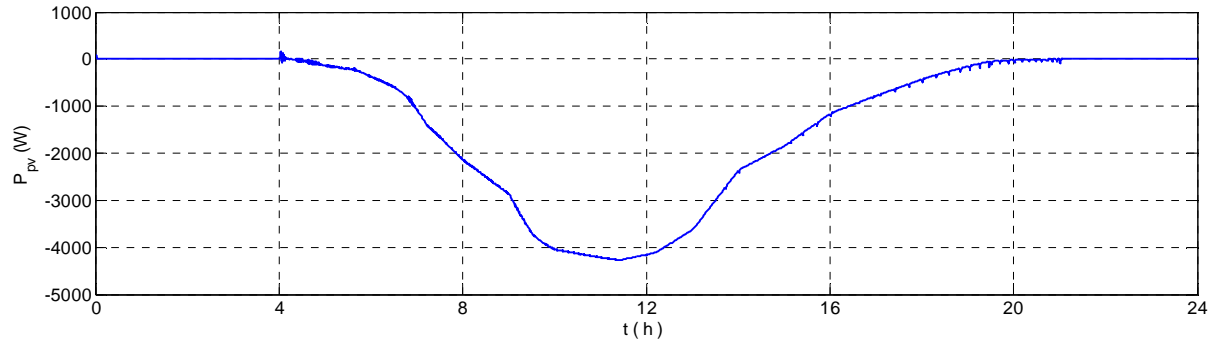


Figure II.21 : Puissance photovoltaïque fournie

La figure (II.21) représente la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques, l'évolution de l'allure de la puissance fournie par le générateur PV suit l'allure du profil d'éclairement, tel que sur intervalle horaire 0h à 4h l'absence d'ensoleillement implique l'absence de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque donc la puissance photovoltaïque fournie est proportionnelle avec l'éclairement pendant la journée.

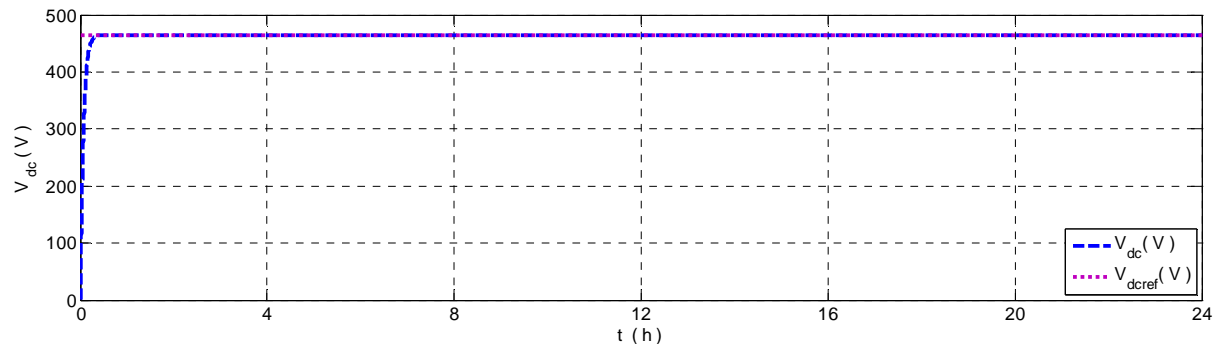


Figure II.22 : Allure de la tension du bus continu et sa référence

On remarque dans la figure que la tension de bus continu est bien suivie sa référence

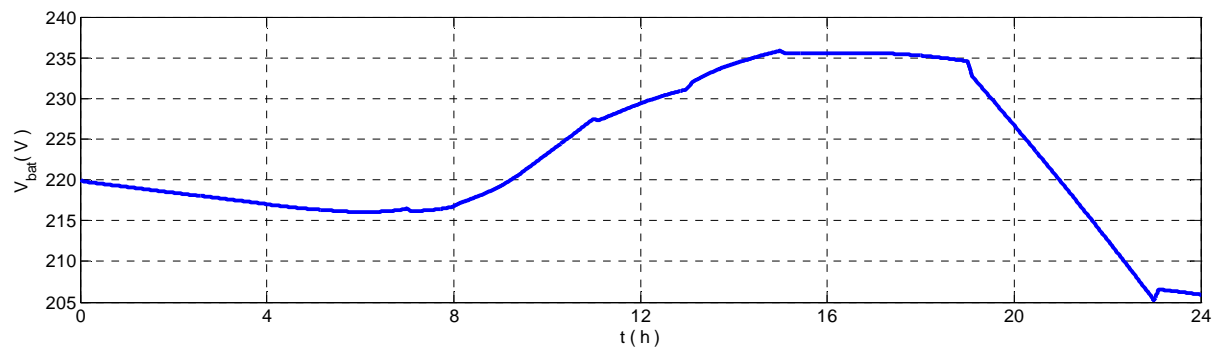


Figure II.23 : Tension aux bornes des batteries

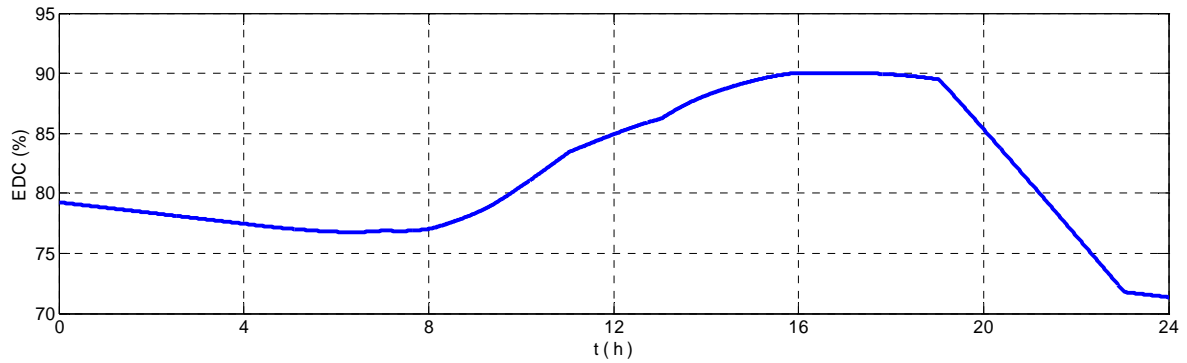


Figure II.24 : Etat de charge des batteries

Les figures (II.23) et (II.24) nous représentent l'évolution de l'EDC 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 l'EDC est l'image de la tension.

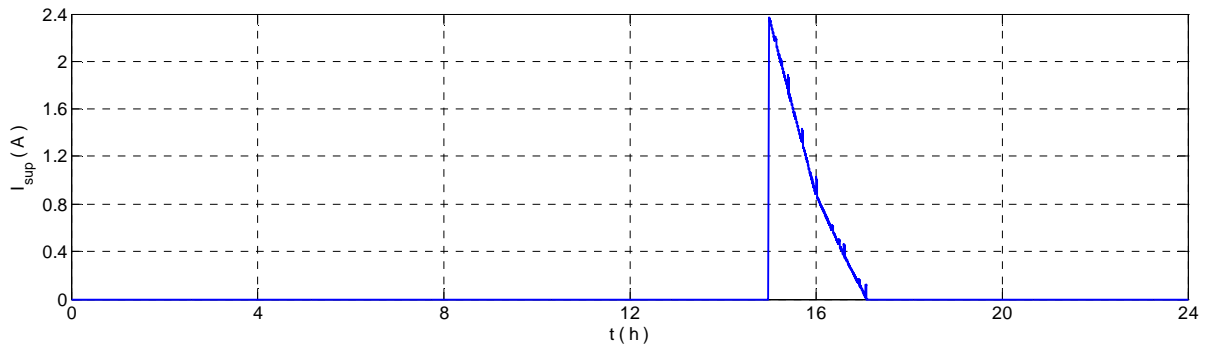


Figure II.25 : Courant dissiper dans une charge dérivative

La figure (II.25) représente le courant de délestage. On déduit à partir de cette figure que ce courant existe seulement si le courant générer par le système hybride est supérieur à celui demandé par la charge et le $EDC = EDC_{max}$.

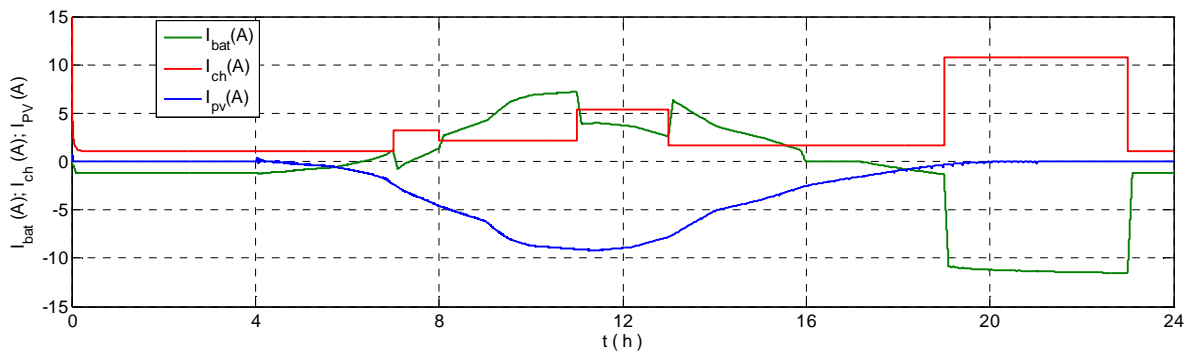


Figure II.26 : Allure des courant I_{pv} , I_{ch} et I_{bat}

II.15.2. Résultats de simulation et interprétations pour une journée d'hiver

Pour faire ressortir l'importance du module de stockage et l'algorithme de gestion d'énergie dans la chaîne de conversion photovoltaïque, le profil d'ensoleillement devra donc pouvoir rendre compte de l'intensité d'éclairement du soleil à différentes heures de la journée et de la saison, pour cela on a défini un autre profil d'éclairement qui correspond à une journée d'hiver (figure II.27)

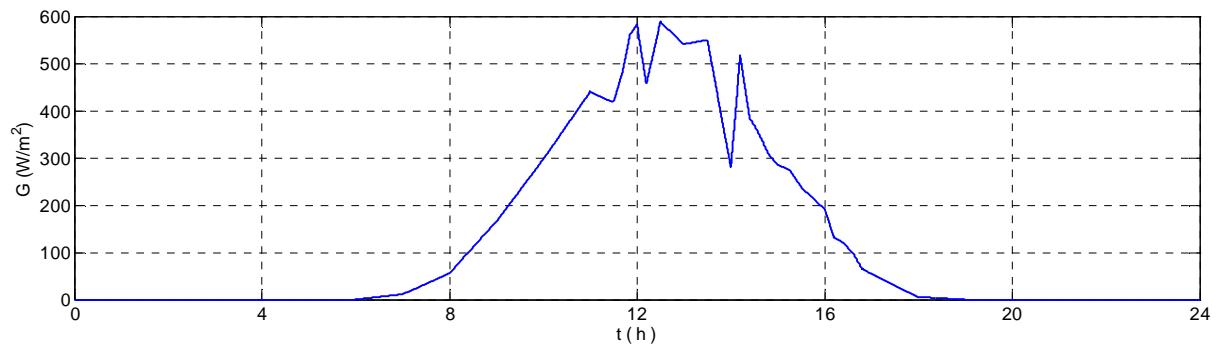


Figure II.27 : Profil de l'éclairement pendant une journée d'hiver

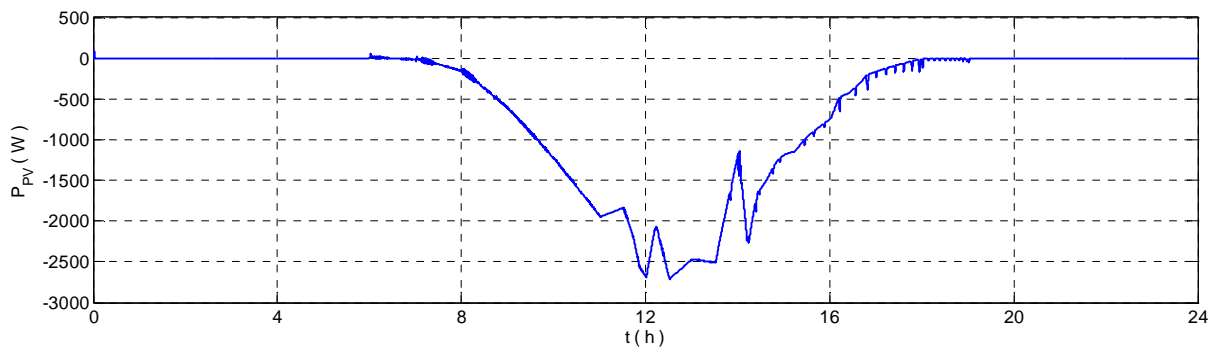


Figure II.28 : Puissance fournie par les panneaux photovoltaïques

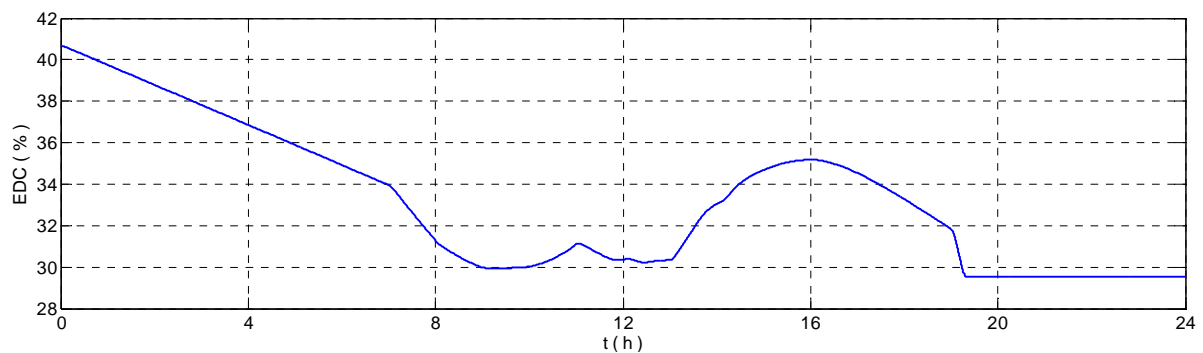


Figure II.29 : Etat de charge des batteries

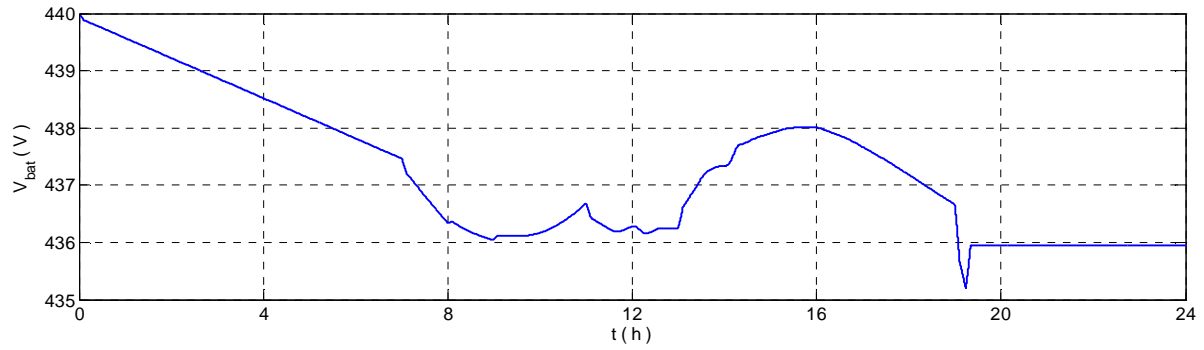


Figure II.30 : Tension aux bornes des batteries

La figure (II.28) représente la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques, l'évolution de l'allure de la puissance fournie par le générateur PV suit l'allure du profil d'éclairement

Les figures (II.29) et (II.30) nous représentent l'évolution de l'EDC 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 l'EDC est l'image de la tension.

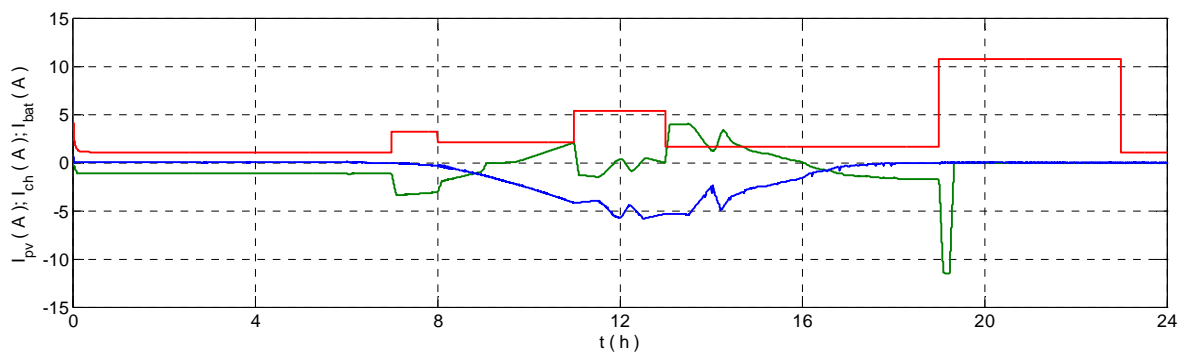


Figure II.31 : Allure des courants I_{pv} , I_{ch} et I_{bat}

D'après ces résultats de simulation on voit bien sur la figure (II.29) que les batteries sont déchargées jusqu'au minimum ($EDC = EDC_{min}$). Donc, les batteries sont déconnectées (figure (II.31)), et vu que la demande de charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi déconnecter, la fourniture d'énergie s'arrête. Donc, la protection au niveau des batteries fonctionne bien avec arrêt de décharge lorsque l'état de charge est au minimum.

II.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation pour les différents profils de l'ensoleillement (été et hiver).

Nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétique dans un tel système s'avère intéressante pour une réalisation réelle.

Chapitre III

Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion éolienne

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va modéliser une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable, qui intègre une génératrice asynchrone à cage d'écurie. L'étude du système concerne la modélisation et la commande vectorielle de la machine asynchrone et de traite le stockage d'énergie éolienne.

III.2. La chaîne de production d'énergie éolienne

III.2.1. 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].

$$V_v = f(t) \quad (III.1)$$

III.2.2. 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 (III.1).

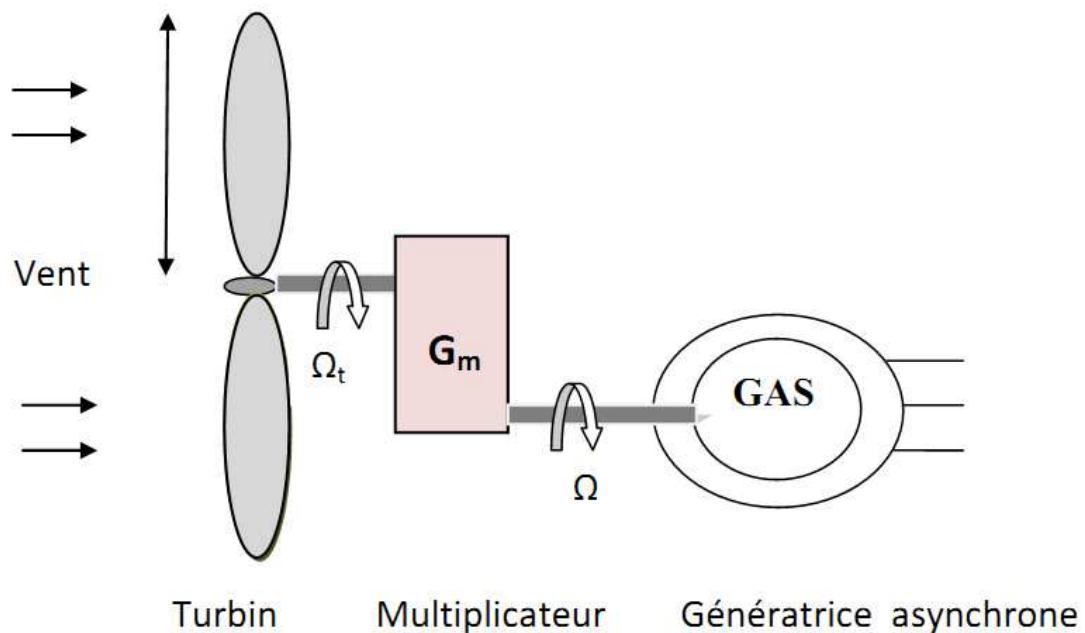


Figure III.1 : Schéma de l'aérogénérateur

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

Chapitre III : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion éolienne

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

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:

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

ρ : 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 pale [m^2]

V_v : est la vitesse du vent [m/s],

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 :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad (\text{III.4})$$

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 **[Bel 10]** :

$$C_{p \text{ opt}} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0.59 \quad (\text{III.5})$$

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]** :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{\text{aer}}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (\text{III.6})$$

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

$$P_{\text{aer}} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (\text{III.7})$$

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

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

Ω_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 :

$$T_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{III.9})$$

III.2.3. 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 [Aim 04] :

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

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G_m} \quad (\text{III.10})$$

Les couples sur l'arbre lent et sur l'arbre rapide sont exprimés par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G_m} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

G_m : Le gain du multiplicateur

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

Ω : La vitesse mécanique de la génératrice [rd/s]

III.2.4. 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 :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + T_{vis} = T_{em} - T_t \quad (\text{III.12})$$

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

$$T_{\text{vis}} = f \cdot \Omega \quad (\text{III.13})$$

Avec :

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

f : Le coefficient de frottement visqueux [Lah 13].

III.2.5. Modélisation de la machine asynchrone à cage

Comme tout système, l'étude des machines électriques s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande des machines électriques, néanmoins la répartition des enroulements et la géométrie propre de la machine asynchrone à cage (MAS) rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté :

- * l'entrefer est d'épaisseur uniforme
- * l'effet d'encochage est négligeable
- * force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale
- * machine de construction symétrique
- * la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables [Abd 12].

III.2.5.1. Principe de fonctionnement

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60f}{P} \quad (\text{III.14})$$

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence (adimensionnée) entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de

rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Pour une augmentation limitée de la vitesse de rotation de l'éolienne, le couple et donc la puissance fournie sont proportionnels au glissement [Mod 11].

III.2.5.2. Modèle triphasé de la MAS

La figure(III.2) représente schématiquement les enroulements de la MAS, où l'angle θ_r représente la position du rotor (phase a_r) par rapport au stator (phase a_s).

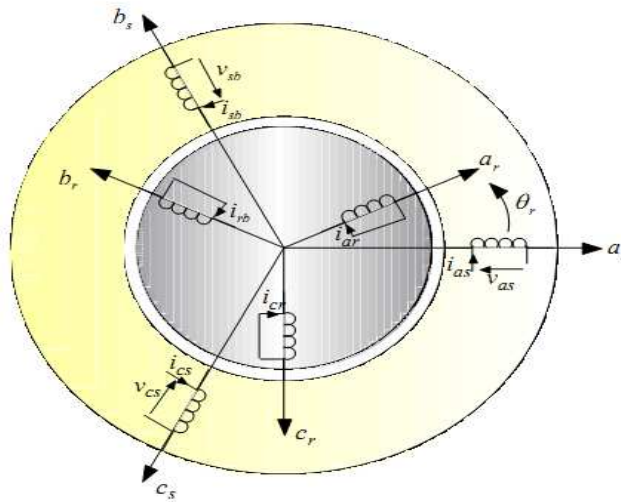


Figure III.2 : Représentation schématique des enroulements de la MAS.

a. Equations électriques

Les équations électriques des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \phi_{as} \\ v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \phi_{bs} \\ v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \phi_{cs} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \phi_{ar} = 0 \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \phi_{br} = 0 \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \phi_{cr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Soit on écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_S] = [R_S][i_S] + \frac{d}{dt}[\phi_S] \\ [v_R] = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt}[\phi_R] \end{cases} \quad (III.17)$$

Avec :

$$[v_S] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [i_S] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [R_S] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix}; [R_R] = \begin{bmatrix} R_R & 0 & 0 \\ 0 & R_R & 0 \\ 0 & 0 & R_R \end{bmatrix}; \quad (III.18)$$

$$[\phi_S] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}; [v_R] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_R] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\phi_R] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

R_S, R_r : Résistance par phase statorique et rotorique

$[v_S], [v_R]$: Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques

$[\phi_S], [\phi_R]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques

$[i_S], [i_R]$: Vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques.

b. Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. L'écriture matricielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques et rotoriques :

$$[\phi_S] = [L_S][i_S] + [M_{SR}][i_R] \quad (III.20)$$

Avec :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix}; [M_{SR}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & M_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

$$[\phi_R] = [L_R][i_R] + [M_{rs}][i_S] \quad (III.22)$$

Où :

$$[L_R] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ba} & M_{ca} \\ M_{ab} & M_{bb} & M_{cb} \\ M_{ac} & M_{bc} & M_{cc} \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

L_S : Inductance propre d'une phase statorique

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques

$M_{sr} = M_{rs}$: Inductance mutuelle entre phase du stator et phase du rotor.

La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est donnée par :

$$[M_{sr}] = L_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

L_m : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t \quad (\text{III.25})$$

III.2.5.3. Transformation de Park

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales, pour cela on applique les matrices de passage de Park directe et inverse suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Avec, $\theta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques et $\theta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est donné par les transformations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

X : tension, courant ou flux ; o : indice de l'axe homopolaire.

III.2.5.4. Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant

Ce système d'axes (d,q) est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques.

a. Equations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

b. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

En introduisant le système d'équations (4.28) dans (4.27), et en posant

$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$ et $p = \frac{d}{dt}$, on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s p i_{ds} + L_m p i_{dr} - \omega_s (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s p i_{qs} + L_m p i_{qr} + \omega_s (L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r p i_{dr} + L_m p i_{ds} - \omega_{gl} (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r p i_{qr} + L_m p i_{qs} + \omega_{gl} (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques est exprimée par **[Abd10]** :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{III.32})$$

Les puissances active et réactive statoriques sont données par :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

III.2.6. Modélisation du redresseur MLI

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu est mesurée et comparée avec une référence. Le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continue mesurée aux bornes du condensateur C.

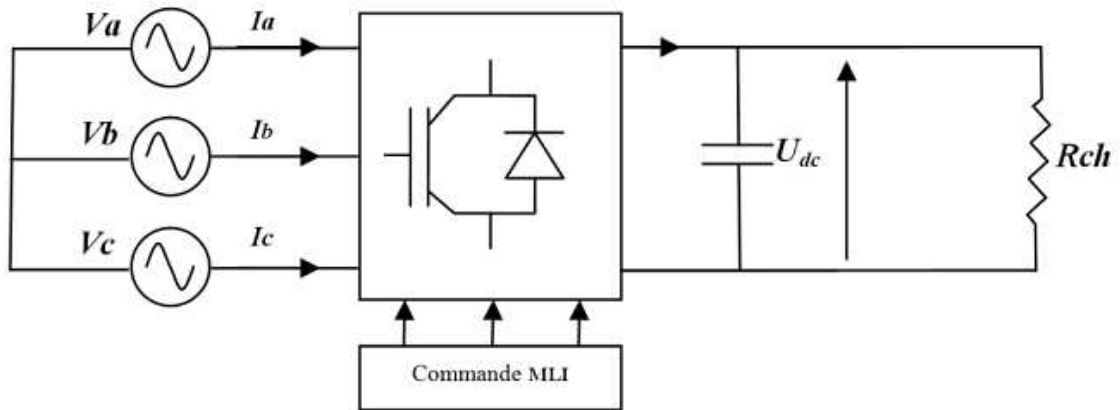


Figure III.3 : Schéma fonctionnelle d'une redresseur MLI.

Les tensions d'entré redresseur d'une manière générale sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ V_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ V_{ca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (III.34)$$

D'où on peut déduire les tensions simples:

$$\begin{cases} v_a = f_a U_{dc} \\ v_b = f_b U_{dc} \\ v_c = f_c U_{dc} \end{cases} \quad (III.35)$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b - S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_c - S_a)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_a - S_b)}{3} \end{cases} \quad (III.36)$$

Où f_a, f_b, f_c prends $0, \pm 1/3$ et $\pm 2/3$.

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (III.37)$$

Et en plus pour les courants :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{dc} \quad (III.38)$$

III.2.7. Rendement Générateur éolien :

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique, P (W), dans le vent est exprimée par :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{III.39})$$

Avec :

S : Surface traversée par le vent (m^2) ;

ρ : Densité de l'air ($\rho = 1,225 \text{Kg/m}^3$) ;

P : Vitesse du vent (m/s).

Le générateur éolien ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance de vent et qui représente la puissance produite par le générateur éolien :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho C_e S V^3 10^{-3} \quad (\text{III.40})$$

Ou :

C_e : Facteur d'efficacité, qui dépend de la vitesse du vent et de l'architecture du système [Rev 10].

Il est déterminé à partir des performances de l'unité de transformation.

$$C_e = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (\text{III.41})$$

Ou :

η_m et η_g : représentent le rendement respectivement du multiplicateur et de la génératrice.

C_p : Le coefficient de performance de la turbine éolienne. Il ne peut théoriquement pas dépasser une limite dite limite de Betz ($C_{p \text{ limite}} = 0.593$).

Par conséquent, l'énergie produite par le générateur éolien est exprimée par :

$$E_{eol} = P_{eol} \cdot \Delta t \quad (\text{III.42})$$

III.2.8. Commande vectorielle de la génératrice asynchrone

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 courant et donc du couple. Cependant la formule de couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée ou le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couplage rend sa commande aisée [**Hac 15**].

Chapitre III : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion éolienne

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

On choisit l'orientation du repère telle que :

$$\phi_{rd} = \phi_r \text{ et } \phi_{rq} = 0 \quad (\text{III.43})$$

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

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \phi_r \cdot i_{sq} \quad (\text{III.44})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_r}{dt} \quad (\text{III.45})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \phi_r \quad (\text{III.46})$$

$$\phi_r = M \cdot i_{sd} + L_r i_{rd} \quad (\text{III.47})$$

$$0 = M \cdot i_{sq} + L_r i_{rq} \quad (\text{III.48})$$

A partir de l'équation (III.45), on obtient :

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.49})$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (III.46) sous la forme suivante :

$$\phi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.50})$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer ϕ_r et ω_r

On peut, à partir de la relation (III.47), exprimer le courant i_{rd} comme suit :

$$i_{rd} = \frac{\phi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.51})$$

Par ailleurs, la relation (III.48) peut s'écrire de la manière suivante :

$$i_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot i_{sq} \quad (\text{III.52})$$

Dans la relation (III.47), on remplace i_{rq} par sa valeur, il vient

$$\phi_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + T_r \cdot s} \quad (\text{III.53})$$

Avec :

T_r : Constante de temps rotorique

s : Opérateur de dérivation

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel <<d q>> doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + P.\Omega$ la vitesse de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. Dans l'équation (III.49), on remplace i_{rq} par sa valeur donnée en(III.52). Ce qui donne

$$\omega_r = \frac{M.i_{sq}}{T_r.\phi_r} \quad (III.54)$$

On obtient finalement

$$\omega_s = \frac{M.i_{sq}}{T_r.\phi_r} + P.\Omega \quad (III.55)$$

Cette dernière relation correspond à un autopilotage de la machine asynchrone. C'est cette relation qui force à zéro une grandeur de sortie, et permet ainsi le découplage entre les deux grandeurs restantes dans l'expression du couple [Hac 15].

III.3. Présentation de la chaîne de conversion éolienne avec stockage par batterie

Nous faisons une simulation du système éolien associé au système de stockage électrochimique. Le schéma de la chaîne de conversion éolienne est compte tenu dans la figure (III.4).

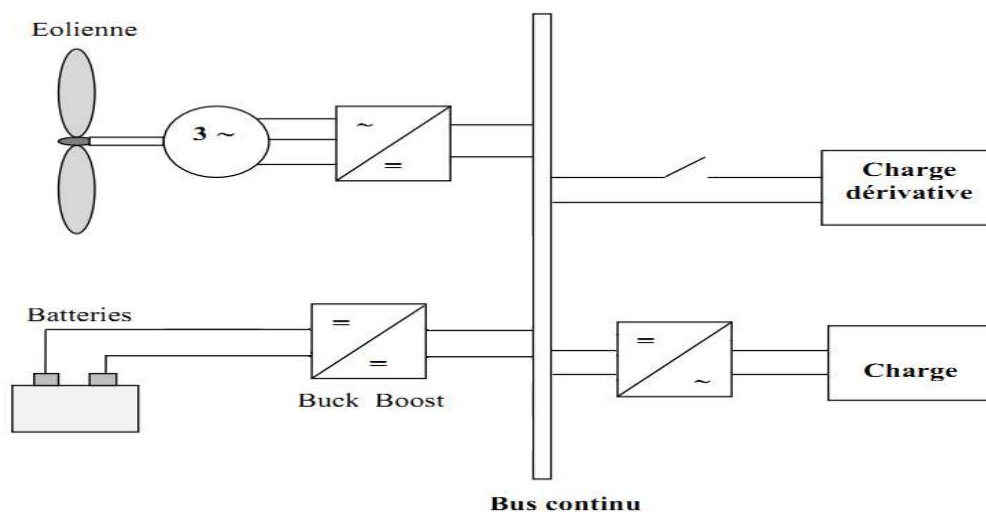


Figure III.4: Schéma du système éolien avec stockage

Chapitre III : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion éolienne

Le système est constitué d'une source d'énergie éolienne reliées au bus CC à travers d'un convertisseur statique, des batteries de stockage et une charge.

III.3.1. Simulation et interprétation des résultats

Pour la simulation de stockage par batterie nous avons définis un profile de vent dans l'allure est présentée sur la figure (III.5) et pour la gestion de l'énergie on utilise le même algorithme développé en chapitre II.

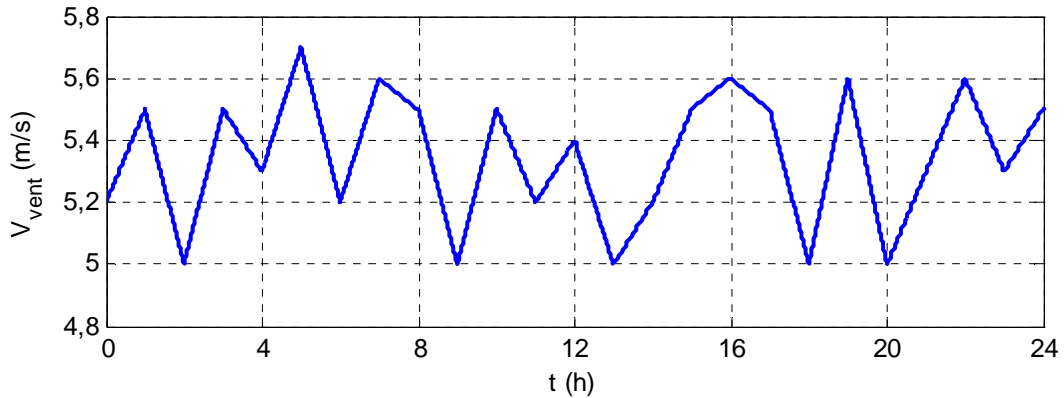


Figure III.5: profile de vent appliqué

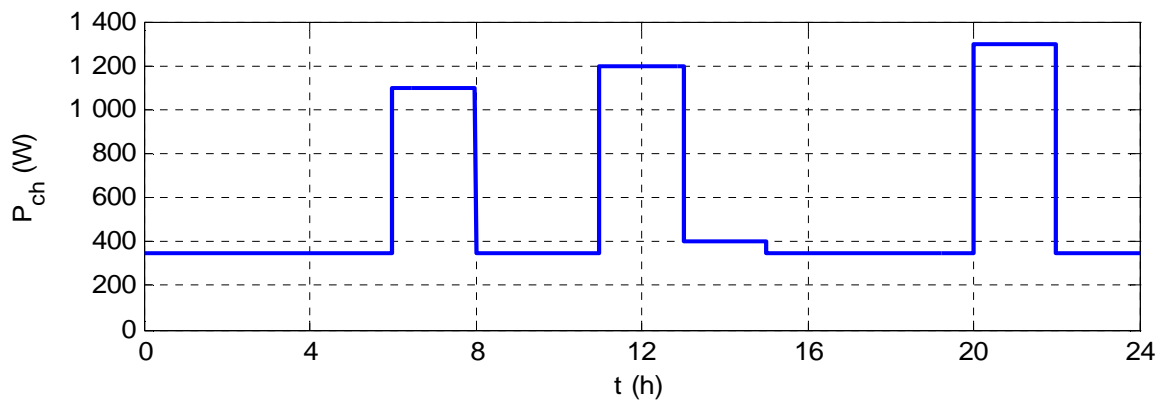


Figure III.6 : la puissance demandée par la charge

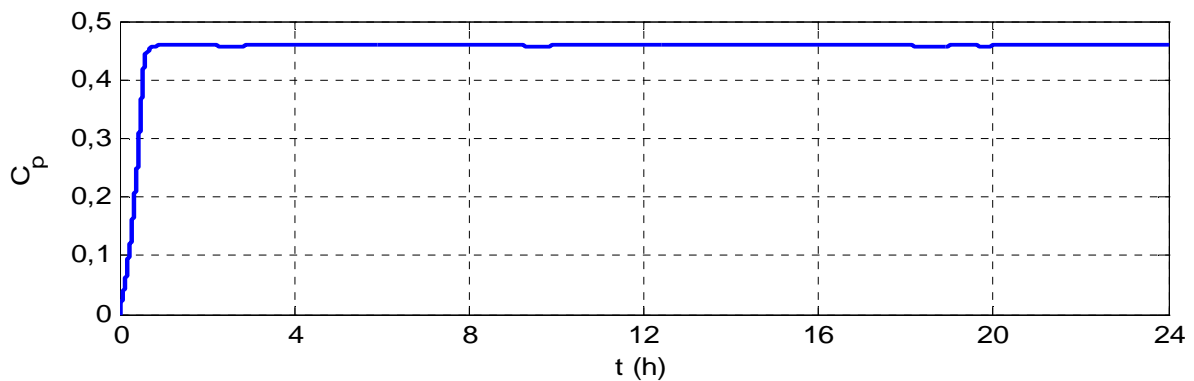


Figure III.7: Allure de coefficient de puissance C_p

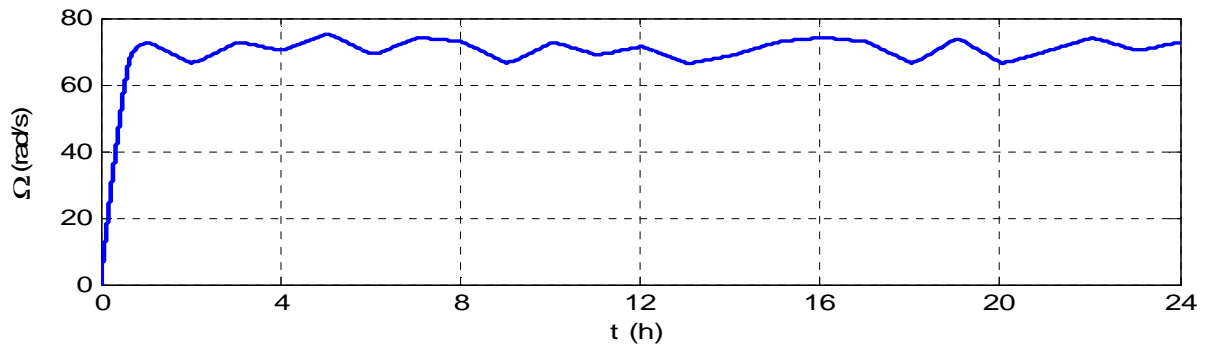


Figure III.8 : Allure de la vitesse de la génératrice

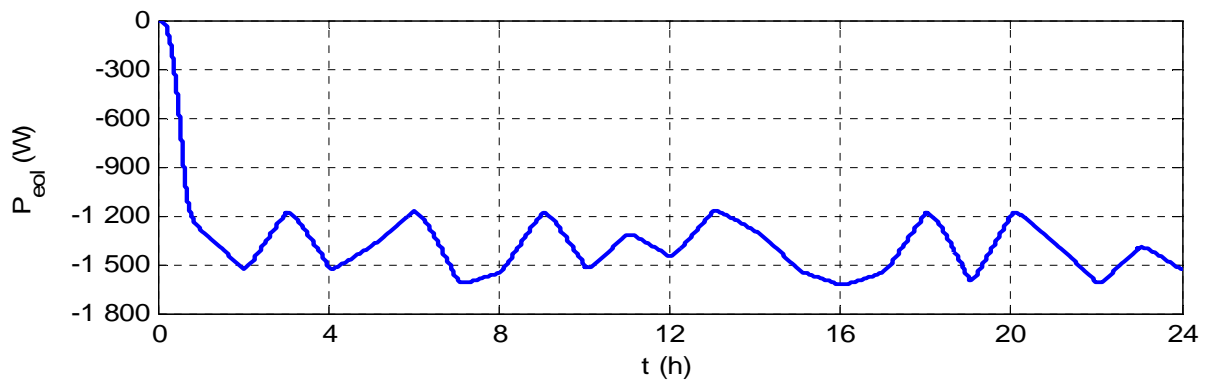


Figure III.9 : puissance générée par l'éolienne

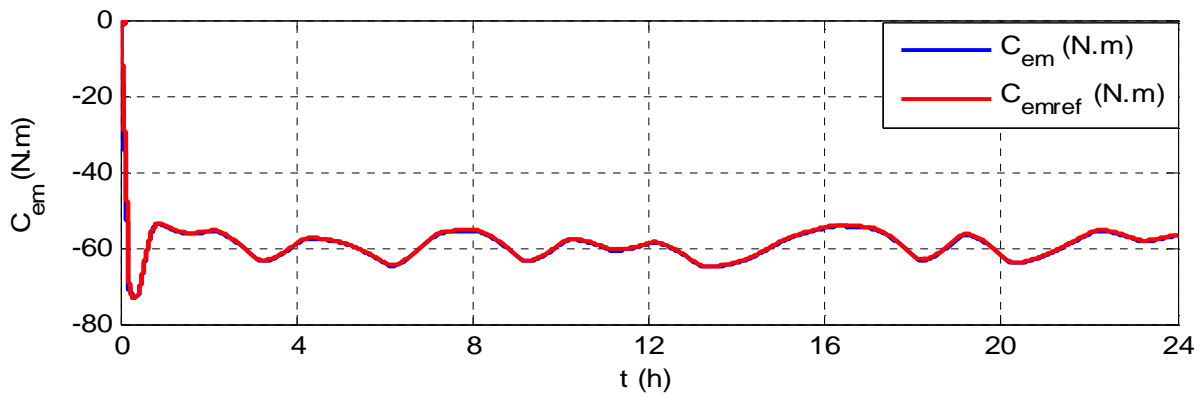


Figure III.10 : Allure du couple électromécanique développé et sa référence

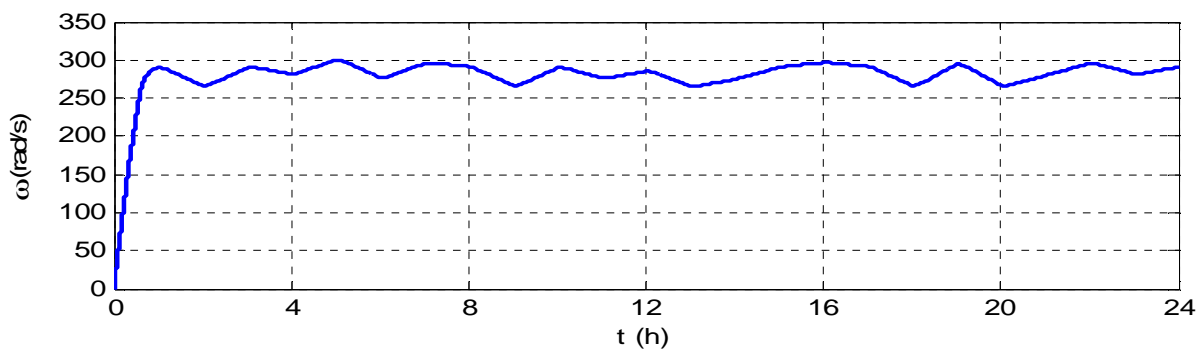


Figure III.11 : Vitesse d'entraînement de la génératrice

Chapitre III : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion éolienne

On remarque que vitesse d'entraînement de la génératrice Figure (III.11) et allure du couple électromécanique développé Figure (III.10) et puissance générée par l'éolienne Figure (III.9) et Allure de la vitesse de la génératrice Figure (III.8) après un régime transitoire tous ces paramètres suivent la variation de profil de vent appliqué Figure (III.5)

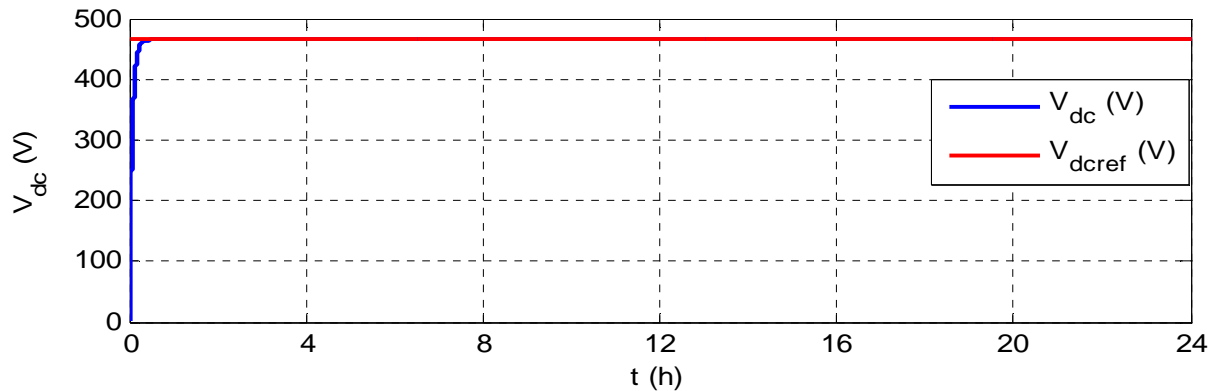


Figure III.12 : Tension de bus continu

La figure (III.12) représente la tension de bus continu, après un régime transitoire on remarque que la tension de bus continu est bien suivie sa référence

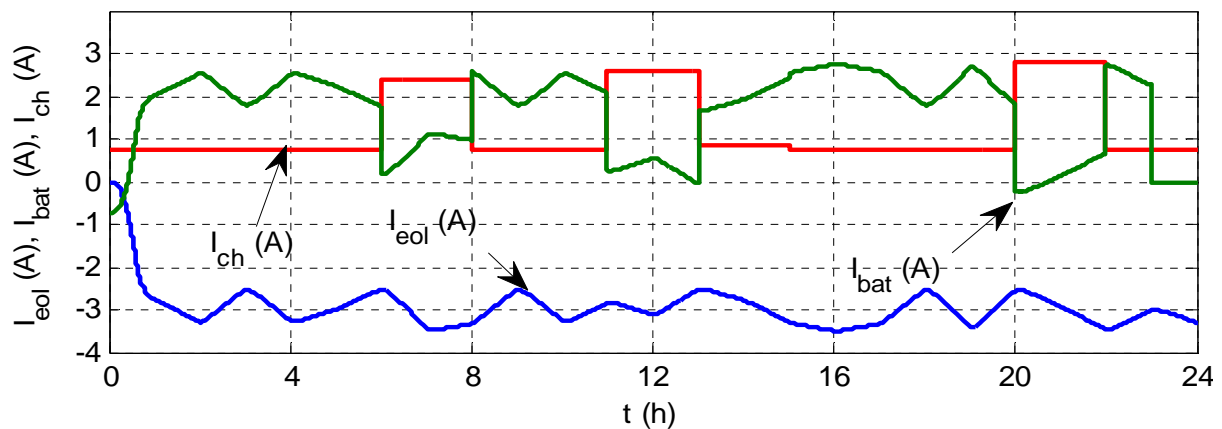


Figure III.13 : Allure des courants

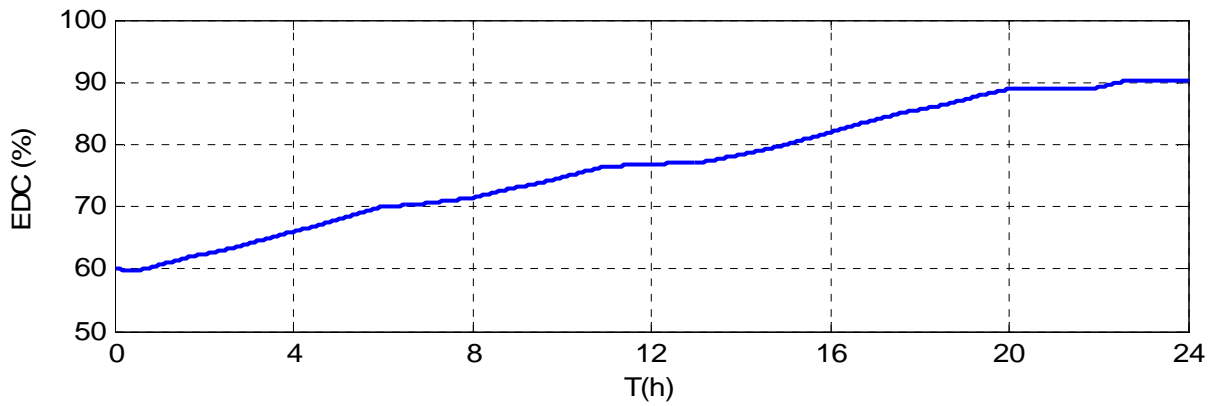


Figure III.14 : état de charge des batteries

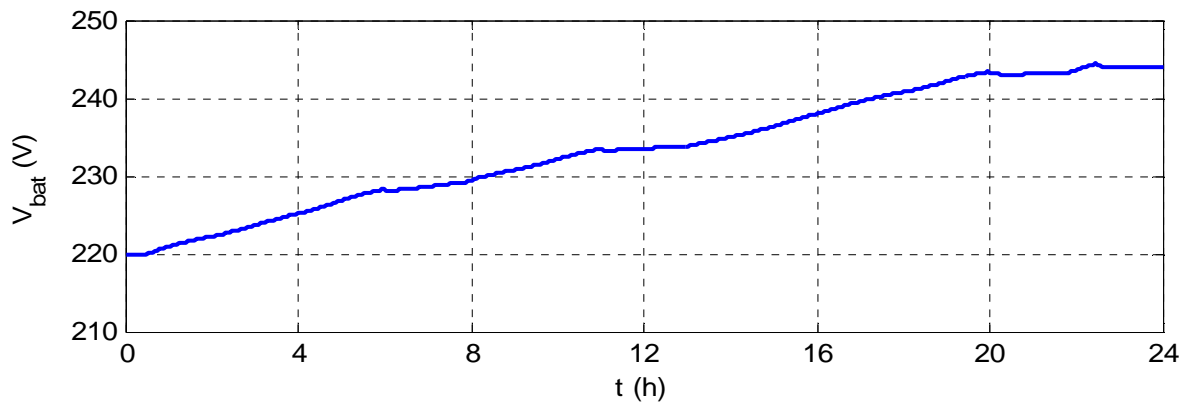


Figure III.15 : Tension aux bornes des batteries de stockage

Les figures(III.14) et (III.15) montrent les allures temporelles de la tension aux bornes de la batterie, ainsi que son état de charge. La batterie est initialement chargée à 60%. On remarque que ces deux allures évoluent de la même façon.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation d'une turbine éolienne, par la suite nous l'avons associé à un système de conversion de l'énergie constitué d'une machine asynchrone à cage et de convertisseur de puissance, donc un modèle du système éolienne global a été présenté.

On a procédé à la simulation de la chaîne de conversion éolienne associée aux batteries de stockage. Le système fonctionne avec un algorithme qui permet la gestion de l'énergie de la chaîne de conversion, leur simulation a révélé un bon comportement.

Chapitre IV

Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion hybride

IV.1. Introduction

Les systèmes Hybrides sont généralement des systèmes PV couplés à d'autres sources comme par exemple une éolienne ou un groupe électrogène. Le rôle du second producteur d'énergie est de palier aux insuffisances éventuelles de la production photovoltaïque.

Dans le cas d'un système hybride avec éolien (voir la Figure IV.1), l'énergie produite par celle-ci vient compléter la charge des batteries. Sa production étant plus aléatoire que celle des panneaux solaires, elle complète efficacement d'un générateur photovoltaïque pour des applications particulièrement gourmandes en électricité [Xua 15]. Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne sont reliées en parallèle au bus continu à travers des convertisseurs statiques (Figure IV.1) le stockage se fait par des batteries électrochimiques [Hac 15].

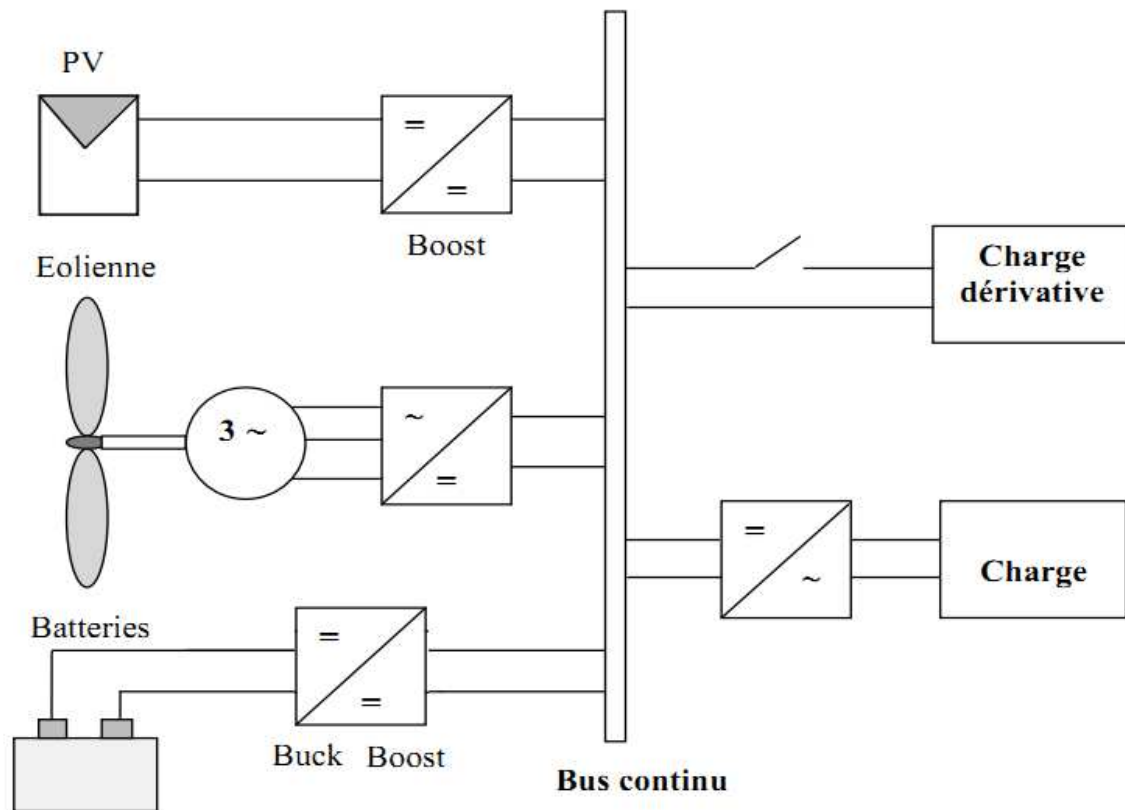


Figure IV.1 : système Hybride (éolienne, photovoltaïque) avec stockage par batteries électrochimiques.

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 des batteries et de prolonger leur durée de vie [Lah 13].

IV.2. Le bus continu

Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et la charge, en modélisant le bus continu comme une capacité, et chaque convertisseur statique qui est reliés avec lui exerce une influence par le courant (figure IV.) [Ato 11].

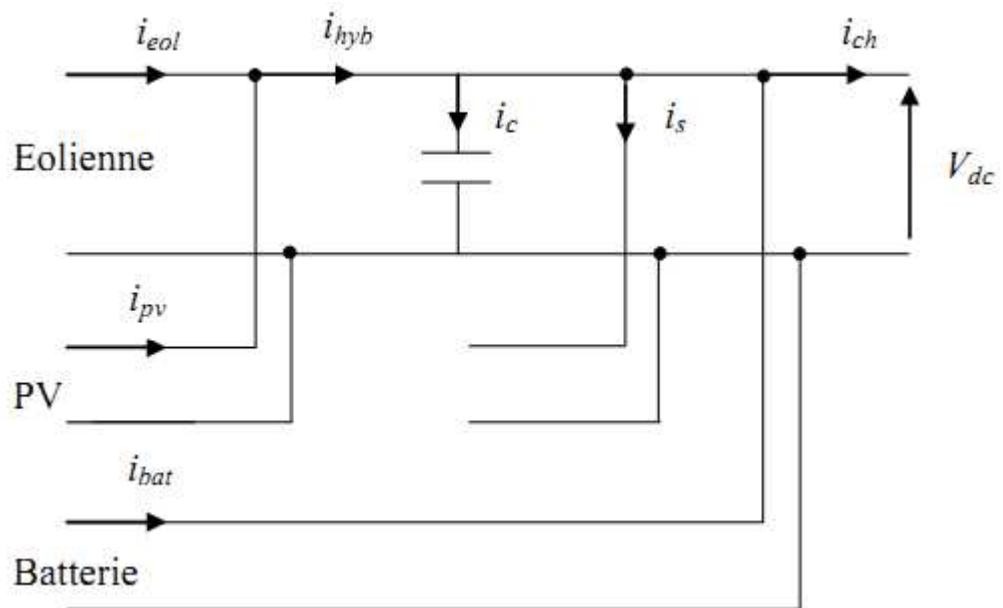


Figure IV.2 : Schéma du bus continu

D'après la figure IV.2 on a :

$$I_{hyb} = I_{eol} + I_{pv} \quad (IV.1)$$

$$I_{ch} = -I_{hyb} - I_c - I_s - I_{bat} \quad (IV.2)$$

$$I_c = \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (IV.3)$$

I_{pv} : Le courant de générateur photovoltaïque

I_{eol} : Le courant de générateur éolienne

I_{bat} : Le courant de charge/décharge de la batterie

I_{ch} : Le courant de la charge

Il est important de fixer la tension de bus continu V_{dc} pour assurer le fonctionnement correcte des organes qui sont attachés à lui [Ato 11].

IV.3. Organigramme de gestion d'énergie

Le chronogramme suivant présenter l'algorithme de gestion d'énergie de système Hybride (éolienne, photovoltaïque) avec stockage.

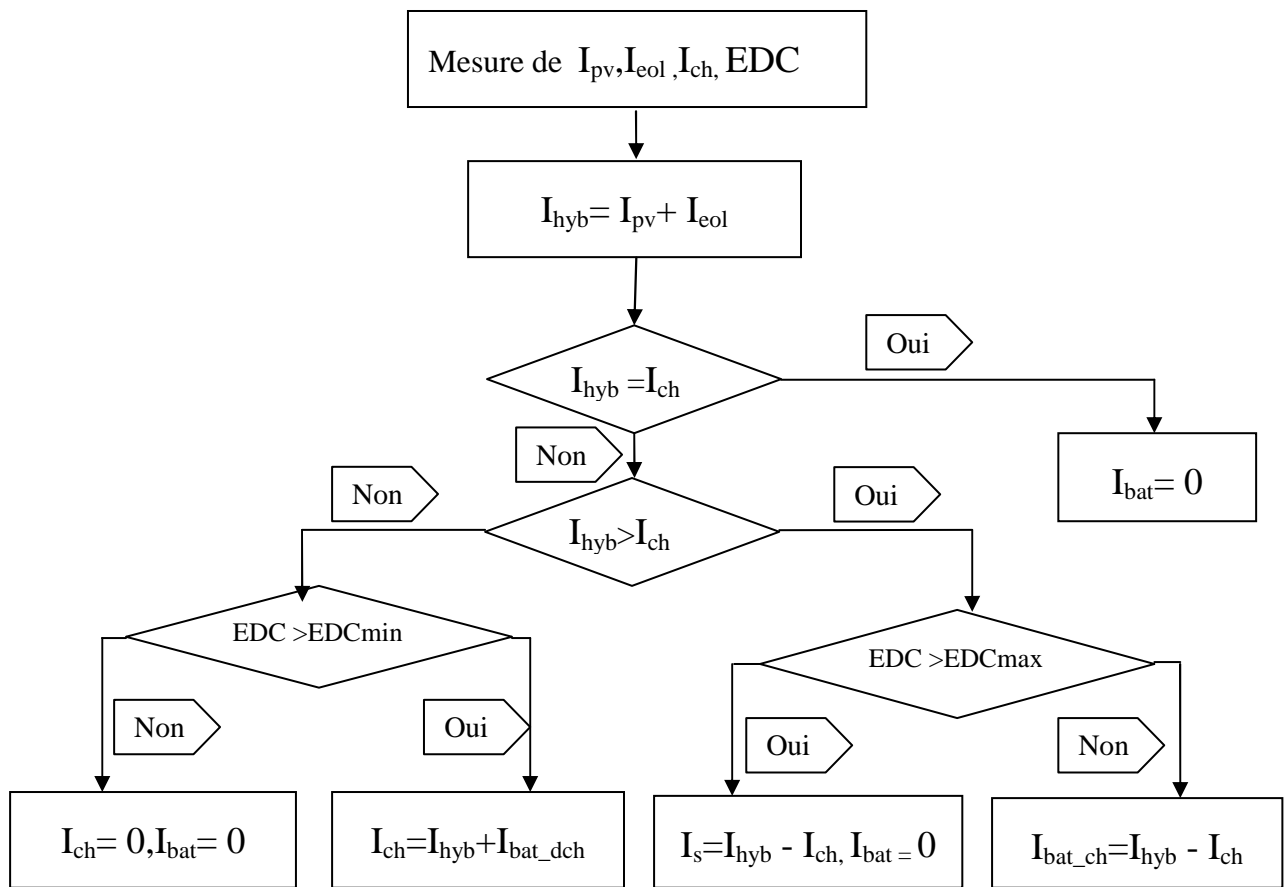


Figure IV.3 : Organigramme d'algorithme de gestion d'énergie du système Hybride avec stockage

L'algorithme de gestion d'énergie de système Hybride (éolienne, photovoltaïque) sera chargé de réguler l'énergie provenant par le système Hybride et de stockage suivant la demande du consommateur. L'algorithme de supervision est basé sur Cinq scénarios :

Chapitre IV : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion hybride

- Alimentation du consommateur uniquement par le système Hybride si l'énergie solaire provenant des panneaux et le vent captée par l'éolienne est égale à la demande de consommateur.
- Alimentation du consommateur par le système Hybride et le stockage si l'énergie solaire et l'énergie de vent sont insuffisantes.
- Déconnecter les batteries et le consommateur si l'énergie de système Hybride insuffisante ($P_{hyb} < P_{ch}$) et $EDC < EDC_{min}$.
- Alimentation du consommateur et du stockage par le système Hybride si l'énergie solaire et l'énergie de vent sont suffisantes.
- Alimentation du consommateur uniquement par le système Hybride si l'énergie solaire et l'énergie de vent sont suffisantes et $EDC = EDC_{max}$ et le surplus d'énergie sera dirigé ver une charge de décharge.

IV.4. Simulation du système globale

Nous avant défini un profil de consommation, ce profil tient compte des périodes d'utilisation d'électricité par des demandes en puissance, ce qui revient à utiliser une charge variable.

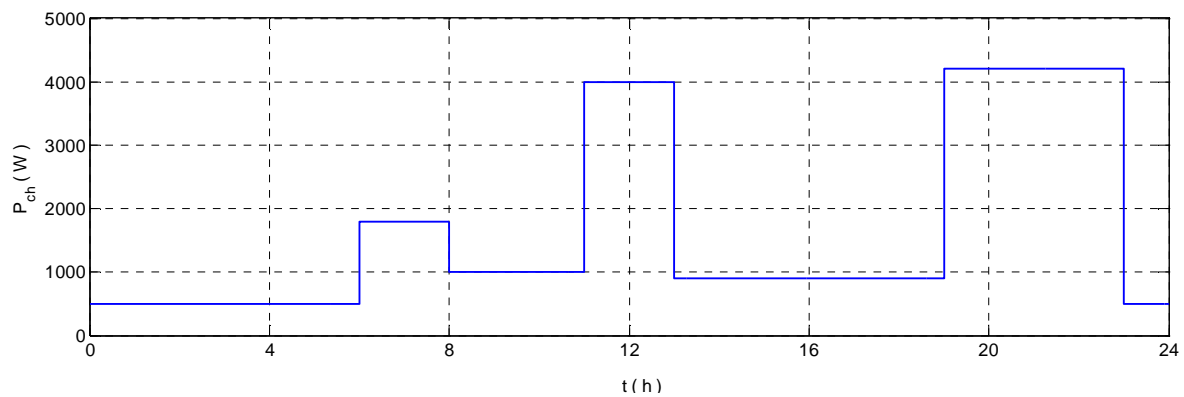


Figure IV.4 : profile de puissance demandée par la charge

On a fait varier le profile de charge, ainsi que l'ensoleillement et la vitesse de vent, mis à part la température à la surface des PV qui est considérée constante ($T = 25^{\circ}\text{C}$). Les profiles utilisés pour la simulation sont défini par les figures (IV.5) (IV.6).

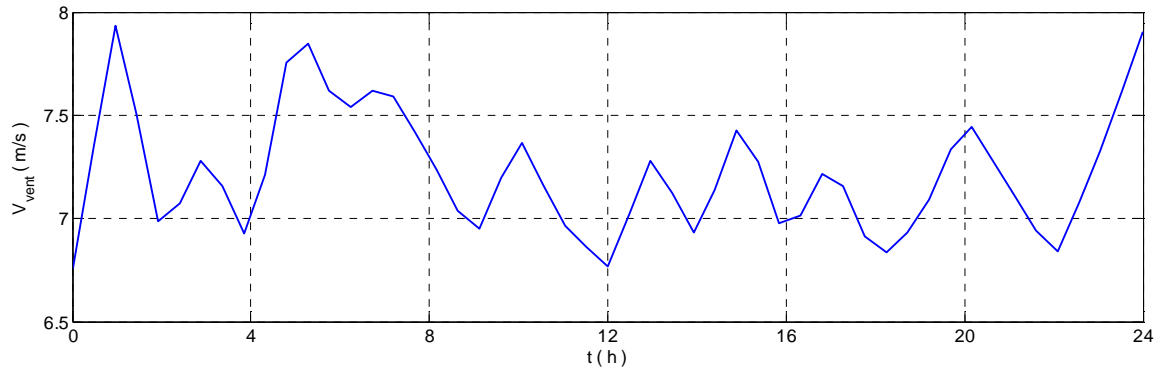


Figure IV.5 : la vitesse du vent

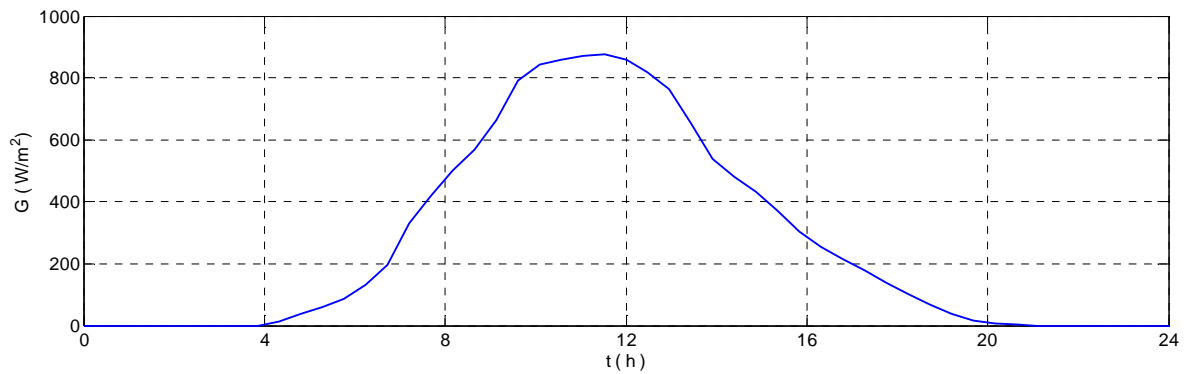


Figure IV.6 : profile de l'ensoleillement

IV.4.1. Interprétation des résultats obtenus par la simulation

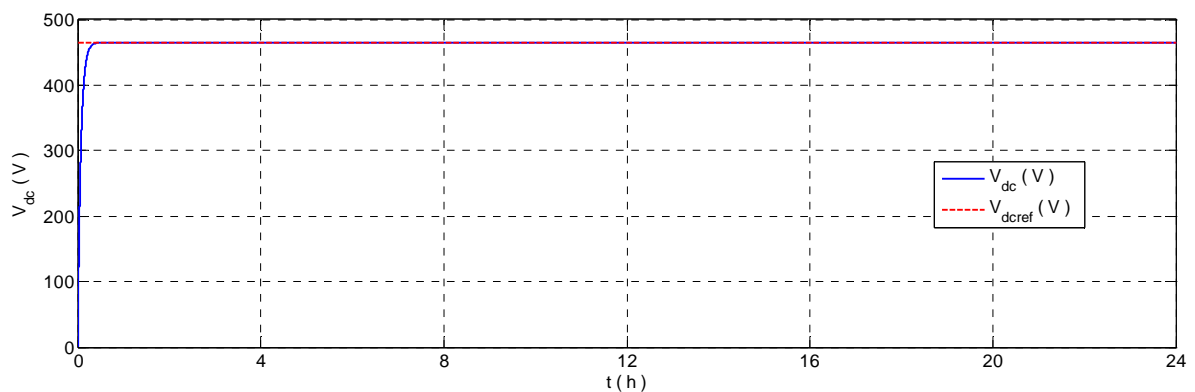


Figure IV.7 : tension de bus continu

La figure IV.7 représente la tension de bus continu, après un régime transitoire on remarque que la tension de bus continu est bien suivie sa référence

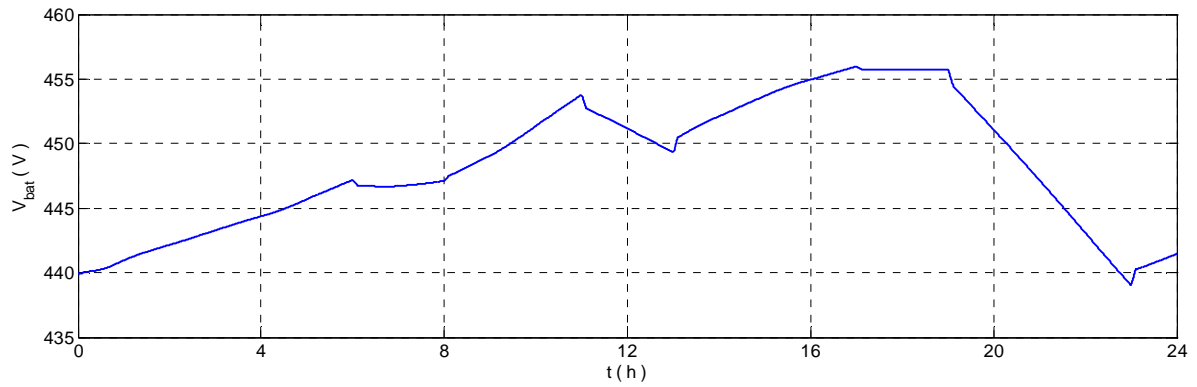


Figure IV.8 : allure de la tension des batteries

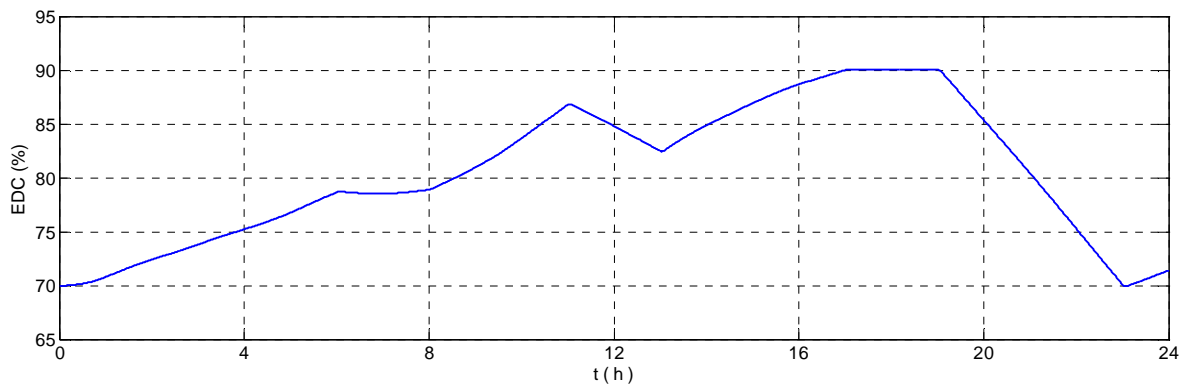


Figure IV.9 : état de charge des batteries

Sur les figures (IV.8) et (IV.9) nous représentons l'évolution de l'EDC et de la tension des batteries 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 l'EDC est l'image de la tension des batteries.

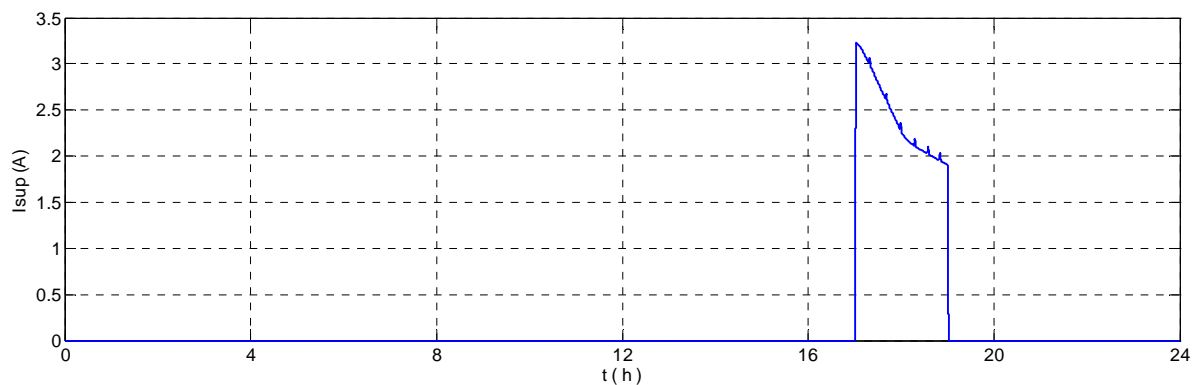


Figure IV.10 : le courant a dissipé dans une charge dérivative

Chapitre IV : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion hybride

La figure (IV.10) 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 $EDC = EDC_{max}$.

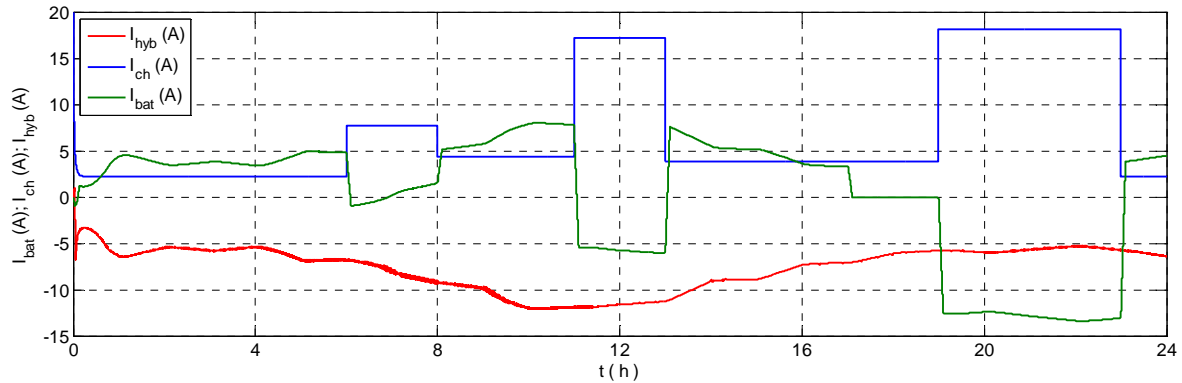


Figure IV.11 : allure des courants

La figure (IV.11) représente le courant total fourni par le système hybride (I_{hyb}), le courant demandé par la charge (I_{ch}) et le courant de la batterie (I_{bat})

D'après ces résultats, on peut déduire les interprétations suivantes sur le fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion :

Phase 1 (t=0-6 h) : On remarque que le courant fourni par le système hybride est supérieur au courant appelé par la charge, on alimente donc la charge et on charge la batterie étant donné le $EDC < EDC_{max}$ (90 %).

Phase 2 (t=6 - 8 h) : le courant fournir par le système hybride augmente figure IV.11 et la puissance de la charge augmente par rapporte à celle du cas précédent figure IV.4 comme le EDC est inferieur au EDC_{max} figure IV.9, la batterie vas continue a se chargée lentement

Phase 3 (t=8 - 11 h) : la puissance fournie par la source photovoltaïque et éolienne est largement supérieur a celle demandé par la charge figure IV.11 se qui implique l'alimentation de la charge, et comme le EDC est inferieur au EDC_{max} la batterie se charge rapidement

Phase 4 (t=11 - 13 h) : le courant fournir par le système hybride augmente et le courant fournir par la charge augmente aussi figure IV.11 comme le courant de charge marque une grande augmentation le courant des batteries renforcé le courant fournir par le système hybride pour assure le bon fonctionnement de système

Phase 5 (t=13 – 17 h) : dans se cas le système hybride assez d'énergie permettent d'alimenter le consommateur et de charger les batteries, la recharge des batteries s'arrête lorsqu'elles sont

Chapitre IV : Gestion d'énergie d'une chaîne de conversion hybride

pleines figure IV.11 $EDC = EDC_{max}$ et le surplus va dissipée dans une charge dérivative figure IV.10

Phase 6 (t=17 – 19 h) : On remarque que le courant fourni par le système hybride est supérieur au courant demandé par la charge pleines figure IV.11 et $EDC = EDC_{max}$ ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge et la déconnection de la batterie et le surplus va dissipée dans une charge dérivative figure IV.10

Phase 7 (t= 19 – 23 h) : la puissance fournie par la source photovoltaïque et éolienne est inférieure de la charge et puisque $EDC > EDC_{min}$ la batterie va se décharger rapidement afin de satisfaire la charge.

Phase 8 (t =23 – 24 h) : On remarque que le courant fourni par le système hybride est supérieur au courant appelé par la charge, donc on alimente la charge et le surplus sert à charger les batteries lentement.

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

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent, d'une façon générale, l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'électricité autonome, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne), avec un système de stockage de batteries.

Notre étude s'est focalisée sur un système hybride photovoltaïque-éolien avec un système de stockage associé, secteur dans lequel la rentabilité est loin d'être acquise et qui nécessite donc un fort degré d'optimisation de l'efficacité énergétique. Ceci impose une adaptation nécessaire pour maximiser le rendement du système hybride (la quantité d'électricité produite par jour) d'une part et d'autre part réduire le coût du système.

Dans le premier chapitre nous avons établi une généralité sur les systèmes d'énergies hybrides et ses différentes structures et les composants de bas, ensuite les différents architectes possibles des systèmes hybrides et une généralité sur les systèmes de stockage.

Dans le deuxième chapitre nous avons développé une modélisation des éléments du Système PV-Batteries avec un algorithme de maximisation de puissance photovoltaïque et une gestion d'interaction du système avec ses membres, ensuite une présentation des résultats de la simulation pour les différents profils de l'ensoleillement (été et hiver).

Dans le troisième chapitre nous avons consacré à l'élaboration des différents modèles qui composent la chaîne de conversion éolienne en tenant compte de tous ses éléments : rotor éolien, l'arbre de transmission, générateur et convertisseur de puissance, on a adopté pour la chaîne de production éolienne une commande vectorielle connectée au stator de la machine asynchrone, ensuite une simulation de la chaîne éolienne associée au stockage par batteries qui fonctionne avec un algorithme qui permet la gestion de l'énergie de la chaîne de conversion, la simulation a révélé un bon comportement.

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 :

Conclusion générale

- 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.

Annexe

Annexe

Annexe

Paramètres de la machine asynchrone [Lah 13]

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

$R_s = 1,07131 \Omega$;

$R_r = 1,29511 \Omega$;

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

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

Paramètres de la turbine [Hac 15]

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

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

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

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 $G = 4.77$;

Paramètres d'un panneau photovoltaïque SHARP NTR5E3E [Lah 13]

Dimension extérieur : 1575*826 mm.

Epaisseur : 40 mm.

Poids : 17.0 kg.

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

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

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

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

Tension en circuit ouvert : $V_{c0} = 44.4 \text{ V}$.

Paramètres de la batterie [Hac 15]

Capacité de la batterie : $C_{bat} = 260 \text{ Ah}$

Tension au borne de la batterie : $V_b = 12 \text{ V}$;

La résistance interne de la batterie : $R_s = 4 \text{ m}\Omega$

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[Abd 12] L. Abdelhamid « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement », These Doctorat de l'Université Hadj Lakhdar de Batna, 2012.

[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.

[Aka 10] S. Akassewa Tchapo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[Ato 11] A. ATOUI « Modélisation Et Commande D'un Système Hybride Éolien-Photovoltaïque Alimentant Un Site Isolé », Mémoire De Magister Ecole Nationale Polytechnique, 2011.

[Bag 11] F. Baghdadi « Modelisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Universite Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2011.

[Ben 14] F. Bendjoudi et F. Lakhdari « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batterie », Mémoire de Master Université Abderahmane Mira de BEJAÏA, 2014.

[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.

[Bel 15] V.BELAID LALOUNI « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Cours Energie Solaire Photovoltaïque Université A.MIRA de BEJAI, 2014/2015.

[Ber 12] B. Multon, Gaél Robin, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed « Le génie électrique dans le vent : recherches dans le domaine de la génération éolienne », HAL Id: hal-00674684 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674684> Submitted on 28 Feb 2012.

Références Bibliographiques

[Bdj 12] V. Bendjamâa « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque », Mémoire De Magister Université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2011-2012.

[Bes 12] W. Bensaci « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », MÉMOIRE DE Master Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2011/2012.

[Dha 12] A Dhaker « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome », Docteur De L'université De Poitiers École nationale supérieure d'ingénieurs (Poitiers) Laboratoire d'automatique et d'informatique industrielle - LAII(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006).

[Fed 14] O. Feddaoui « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables », Mémoire de Magister Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2013-2014.

[Fel 12] F. Boumediene « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Mémoire de Magister Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2011 – 2012.

[Hac 15] I. Hacini « Etude et gestion d'un système d'énergie hybride », Mémoire De Magister Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015

[Had 12] S. Nouali « Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien avec stockage d'énergie pour diverses applications », Mémoire de Magister Ecole Nationale Polytechnique, 2012.

[Ion 05] L. Vechiu « Modelisation et analyse de l'integration des énergie renouvelables dans un reseau autonome », Thèse de Doctorat de l'Université du havre, 2005.

[Khé 09] K. Zaouche « Etude et Développement de Différentes Méthodes MPPT pour un Système Photovoltaïque », Mémoire De Magister Universite Des Sciences Et De La Technologie « HOUARI BOUMEDIENE », 2009.

[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.

Références Bibliographiques

- [Lah 13] K. MAMMERRI et H. Lahcene «Optimisation et gestion d'énergie d'un système hybride (photovoltaïque - éolien) », Mémoire De Master Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2012-2013.
- [Lya 13] L. Boudjenah « Etude d'un système de pompage hybride (éolien, photovoltaïque) », Mémoire de Master Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2013.
- [Mah 14] A. MAHAMMEDI « Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas –Setif1- UFAS (ALGERIE), 2014.
- [Mec 13] M. Mechalikh et C. HAMADA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Magister Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.
- [Min] Ministère de l'Énergie et des Mines (Algérie), « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007.
- [Mod 11] « Modélisation De La Génératrice Asynchrone», www.senegal-energies.com - Systemes hybrides, 18 04 2017.
- [Rev 02] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabeche « Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel) », Rev. Energ. Ren.: Zones Arides (2002) 49-54.
- [Rev 08] D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 623 – 633.
- [Rev 10] L. Stoyanov « Structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Revue de génie industriel 2010, 5, 1-19.
- [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.
- [Tou 13] N. Toumi « etude d'une pompe à eau solaire pour alimenter un chantier petrolier », Mémoire de Magister Université Kasdi Merbah –Ouargla, 2012/2013.

Références Bibliographiques

[Xua 15] D. Xuan-Linh « Contribution à l'étude des systèmes Photovoltaïque (PV)/Stockage distribués. Impact de leur intégration à un réseau fragile », Thèse De Doctorat De L'école Normale Supérieure De Cachan (France), 2014.

[Zid 14] N. Zidane « Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Energies Renouvelables », Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas — Setif1 (ALGERIE), 2014.

[Zig 14] A. Zigha « Etude Et Simulation D'un Systeme Hybride Photovoltaïque-Eolien », Mémoire De Master Université Constantine, 2013/2014.

Résumé

Résumé : Dans la plupart des régions isolées, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Dans ce contexte, l'interconnexion de plusieurs sources d'énergie renouvelable (des éoliennes, des panneaux photovoltaïque, des petites centrales hydroélectriques, etc.) dans un Système d'Energie Hybride (SEH) peut avoir une incidence profitable sur la production d'énergie électrique, en termes de coût et de disponibilité.

Dans les zones où l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont naturellement complémentaire, l'application du système énergétique hybride vent-solaire s'avère très intéressante du fait qu'il ne nécessite aucun carburant et qu'il peut réduire la capacité de stockage des batteries et tout le coût du système. Mais l'efficacité d'un tel système dépend en grande partie des stratégies de commande et d'optimisation ainsi que de l'algorithme de gestion.

Ainsi, le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'analyse du comportement d'un SEH constitué par deux sources d'énergie renouvelable (éolienne et photovoltaïque) et des batteries de stockage. En raison de la réalisation de ce travail, les modèles de simulation pour les sources du SEH, les éléments d'interconnexion et le système de stockage sont développés et réunis sous l'environnement MATLAB/Simulink, les stratégies de commande ainsi que l'algorithme de gestion seront appliqués pour optimiser le système.

Mots clés : système d'énergie hybride, éolien, photovoltaïque, système de stockage, optimisation, gestion d'énergie.

Abstract : In many of the remote areas, the cost of grid extension is and will probably continue to be, prohibitive and the fuel cost increases severely with the remoteness of the location. So, the combination of several energy sources (wind turbines, photovoltaic panels, small hydroelectric power plants etc.) in a Hybrid Power System (HPS) can be very attractive for most of the remote areas, in terms of cost and availability.

In the districts where solar energy and wind energy are naturally complementary, the application of wind-solar hybrid energy system is very interesting owing to the fact that it doesn't needed fuel and can reduce, the storage capacity of batteries and the total cost of the system. But efficient and reliable operation of such system largely depends on control and optimization strategies, as well as management algorithm.

In this context, the work presented in this memory is a contribution to the behaviour analysis of an HPS constituted by two renewable energy sources (wind and photovoltaic energy) and storage batteries. Due to achieving of this work, simulation models for all components of the

HPS are developed and brought together under MATLAB/Simulink environment, the strategy of control and management algorithm will be applied to optimize the system.

Keywords : hybrid power system, wind, photovoltaic, storage system, optimization, energy management.

ملخص : في معظم المناطق النائية، تكون تكلفة تمديد شبكة الكهرباء باهظة، وتزداد التكلفة الإضافية للوقود زيادة كبيرة مع العزلة. وفي هذا السياق، فإن الربط بين عدة مصادر للطاقة المتجددة (توربينات الرياح، والألواح الضوئية، ومحطات الطاقة الكهرومائية الصغيرة، وما إلى ذلك) في نظام الطاقة الهجينة يمكن أن يكون له أثر مريح على إنتاج الطاقة المتجددة، من حيث التكلفة والتوفر.

وفي المناطق التي تكون فيها الطاقة الشمسية وطاقة الرياح مكتملة بشكل طبيعي، فإن تطبيق نظام الطاقة الهجينة (الرياح والضوئية) جذاب جدا لأنه لا يحتاج إلى وقود ويمكن أن يقلل سعة التخزين من البطاريات وجميع تكاليف النظام. ولكن فعالية مثل هذا النظام يعتمد إلى حد كبير على استراتيجيات التحكم والتحسين وكذلك على خوارزمية الإدارة.

وبالتالي، فإن العمل المقدم في هذه المذكرة هو مساهمة في تحليل سلوك أنظمة الطاقة الهجينة تتكون من مصدرين للطاقة المتجددة (الرياح والضوئية) وبطاريات التخزين. ونتيجة لهذا العمل، تم تطوير نماذج المحاكاة لمصادر أنظمة الطاقة الهجينة وعناصر التوصيل البيئي ونظام التخزين وجمعها في إطار بيئة ماتلاب / سيمولينك واستراتيجيات التحكم وكذلك الخوارزمية سيتم تطبيقها لتحسين النظام.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الهجينة، الرياح، الضوئية، نظام التخزين، التحسين، إدارة الطاقة