

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Electrotechnique

Options : Energies Renouvelables & Commande des Systèmes Electriques.

Thème

*Evaluation et Contrôle
d'énergie d'un Système Hybride*

Réalisé par :

ANKIK Karima

BENACER Hamama

Encadré par :

M^r K. IDJDARENE

Année Universitaire : 2013/2014

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Electrotechnique

Options : Energies Renouvelables & Commande des Systèmes Electriques.

Thème

*Evaluation et Contrôle
d'énergie d'un Système Hybride*

Réalisé par :

ANKIK Karima

BENACER Hamama

Encadré par :

M^r K. IDJDARENE

Année Universitaire : 2013/2014



Remerciements

Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers le Bon Dieu, qui nous a donné la patience et le courage pour que nous puissions achever ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères et respectueux remerciements à notre promoteur, Monsieur K. IDJDARENE, Maître de conférences A à l'université de Bejaïa, pour ses orientations, sa disponibilité et ses conseils qui nous à permit d'enrichir nos connaissances, durant la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pendant la réalisation de ce modeste travail.



Avec toute mon affection je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, pour leur soutien constant et leur confiance et qui m'ont apportés assistance, courage et conseils durant mon cycle d'études.

À ma grande mère qui ma soutenue moralement et encouragée dont je serai toujours reconnaissante

À mes sœurs

À mon frère

À tous mes cousins et cousines

À la mémoire de mes grands-parents paternel et maternel

À toute la famille Benacer

À tous mes amis (es)

À toutes les personnes qui m'ont soutenue et participé de près ou loin à l'élaboration à ce mémoire de fin de cycle

B. Hamama



Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents pour leurs sacrifices, patience, leur présence et leur soutien tout au long de mes années d'études, que dieu les garde pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

Mon marie : Kheirddine ;

Mes cher frères et sœurs : Zahir et sa femme, Lounes et sa femme, Sofiane, Halima, Lilia, Katia ;

Mes beaux parents ;

A toute ma grande famille ;

A mes amies : Chafiaa, Salima, Noria, Hamama, Souhila ;

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

****Karima****

Sommaire

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I: Généralités sur le système hybride | |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H) | 3 |
| I.3. Les différentes combinaisons des systèmes hybrides | 3 |
| I.3.1. Système hybride (photovoltaïque- groupe électrogène)..... | 3 |
| I.3.2. Système hybride (éolien- groupe électrogène)..... | 4 |
| I.3.3. Système hybride (photovoltaïque-stockage) | 4 |
| I.3.4. Système hybride (photovoltaïque-éolien-stockage) | 5 |
| I.3.5. Système hybride (photovoltaïque-éolien –groupe électrogène)..... | 5 |
| I.4. Avantage et inconvénients d'un système hybride | 5 |
| I.5. Composant d'un système hybride | 6 |
| I.6. Energie photovoltaïque | 6 |
| I.6.1. Conversion photovoltaïque | 6 |
| I.6.1.1. Rayonnement solaire | 6 |
| I.6.1.2. Le spectre de rayonnement solaire | 7 |
| I.6.2. Les cellules photovoltaïques | 7 |
| I.6.2.1. Technologies des cellules photovoltaïques | 8 |
| I.6.3. Constitution d'un module photovoltaïque..... | 10 |
| I.6.4. Le générateur photovoltaïque..... | 11 |
| I.6.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV | 11 |
| I.7. Energie éoliennes | 12 |

| | |
|--|----|
| I.7.1. Le principe de fonctionnement d'une éolienne | 12 |
| I.7.2. Classification des éoliennes | 13 |
| I.7.2.1. Les éoliennes à axe horizontal | 13 |
| I.7.2.1.1. Les composants d'une éolienne | 14 |
| I.7.2.2. Eolienne à axe vertical | 15 |
| I.7.3. Différentes classes d'un système éolien connectées au réseau | 16 |
| I.7.3.1. Machine asynchrone à double alimentation | 17 |
| I.7.3.2. Machine asynchrone à cage d'écureuil | 18 |
| I.7.3.3. Générateur synchrone..... | 19 |
| I.7.4 . Système éolien autonome..... | 19 |
| I.7.5. Application des éoliennes..... | 20 |
| I.7.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne | 20 |
| I.8. Généralité sur le stockage | 21 |
| I.8.1. Présentation des technologies de stockage de l'énergie électrique..... | 21 |
| I.8.1.1. Technique de stockage à grande échelle | 21 |
| I.8.1.2. Technique de stockage à petite échelle | 22 |
| I.9. La charge | 23 |
| I.9.1. Caractéristiques de la charge pour notre étude..... | 23 |
| I.10. Conclusion..... | 24 |
| Chapitre II : Modélisation des composants du système hybride | |
| II .1. Introduction..... | 25 |
| II.2. Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien | 25 |
| II.2.1. Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de la machine asynchrone à cage d'écureuil | 25 |
| II.2.1.1. Modèle du vent | 25 |

| | |
|--|----|
| II.2.1.2 Modèle de la turbine | 26 |
| II.2.1.2.1. Modèle des pales..... | 26 |
| II.2.1.2.2. Modèle du multiplicateur de vitesse | 27 |
| II.2.1.2.3. Modèle de l'arbre mécanique..... | 27 |
| II.2.1.3. Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire | 28 |
| II.2.1.4. Modèle du redresseur MLI..... | 32 |
| II.2.2. Modèle du photovoltaïque | 33 |
| II.2.2.1. Modèle d'une cellule solaire..... | 33 |
| II.2.2.1.1.Caractéristique d'un panneau photovoltaïque..... | 36 |
| II.2.2.1.2 Facteur influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :..... | 37 |
| II.2.2.1.2.1 Influence de l'éclairement :..... | 37 |
| II.2.2.1.2.2 Influence de la température..... | 38 |
| II.2.2.2. Modèle d'un hacheur survolteur | 39 |
| II.2.3 Modélisation d'un système du stockage | 40 |
| II.2.3.1. Le modèle électrique simple de la batterie | 40 |
| II.2.3.2.Le convertisseur Buck - Boost..... | 41 |
| II.2.4. Modèle de bus continu | 41 |
| II.3. Conclusion | 42 |

Chapitre III : Commande Dimensionnement d'un système hybride

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction | 43 |
| III.2 Dimensionnement d'un système hybride | 43 |
| III.2.1 Présentation du site | 43 |
| III.2.2 Analyse du potentiel énergétique solaire et éolien à Bejaia | 44 |
| III.2.3 Détermination du profil de charge..... | 44 |
| III.2.3.1 Besoins électriques domestique..... | 44 |

| | |
|---|----|
| III.2.4 Dimensionnement d'un système photovoltaïque et éolien | 46 |
| III.2.4.1 Dimensionnement du générateur éolien | 46 |
| III.2.4.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque | 47 |
| III.2.5 Dimensionnement des batteries de stockage | 48 |
| III.3 Les commande applique pour notre système..... | 48 |
| III.3.1 Les MPPT qui s'appliquent pour les systèmes..... | 48 |
| III.3.1.1 Pour système éolien | 48 |
| III.3.1.1 Pour système photovoltaïque | 50 |
| III.4 La commande vectorielle utilisée..... | 51 |
| III.5 Conclusion | 53 |

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

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction : | 54 |
| VI.2 . Organigramme de gestion d'énergie | 54 |
| IV.3. Simulation du système global..... | 55 |
| IV.3.1. Les résultats obtenus par la simulation..... | 58 |
| Conclusion | 74 |
| Conclusion générale | 75 |

Liste des figures

Liste des figures.

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Distance Terre-Soleil | 6 |
| Figure I.2: Spectre du rayonnement solaire | 7 |
| Figure I.3: Détail de la coupe transversale d'une cellule PV | 8 |
| Figure I.4: Groupement des cellules PV en série | 10 |
| Figure I.5: Groupement des cellules en parallèle | 10 |
| Figure I.6: Générateur photovoltaïque | 11 |
| Figure I.7: Conversion de l'énergie cinétique du vent | 13 |
| Figure I.8: Les hélices à différents pales | 13 |
| Figure I.9: Turbines éoliennes en amont et en aval | 14 |
| Figure I.10: Principaux composants d'une éolienne | 14 |
| Figure I.11: éolienne de type Darrieus et Savonius | 16 |
| Figure I.12: Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable | 18 |
| Figure I.13: Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe | 18 |
| Figure I.14: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable | 19 |
| Figure I.15: Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien..... | 24 |
| Figure II.1: Système hybride éolien-photovoltaïque | 25 |
| Figure II.2: Turbine éolienne | 26 |
| Figure II.3: Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne | 28 |
| Figure II.4: Les systèmes d'axe utilisés | 31 |
| Figure II.5: Redresse MLI | 33 |
| Figure II.6: Schéma équivalent d'une module photovoltaïque | 34 |
| Figure II.7: Caractéristique courant-tension $I(v)$ d'une cellule photovoltaïque | 36 |
| Figure II.8: Caractéristique : puissance-tension $P(v)$ d'une cellule photovoltaïque | 36 |
| Figure II.9: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=1000, 800, 600, 400$) et $T_c = 25^\circ c$ | 37 |
| Figure II.10: Caractéristique puissance -tension d'une cellule photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=1000, 800, 600, 400 \text{ W/m}^2$) et $T_c = 25^\circ c$ | 38 |
| Figure II.11: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0.25, 50, 75^\circ c$) et $G=1000 \text{ W/m}^2$ | 38 |

Liste des figures.

| | |
|---|----|
| Figure II.12: Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0.25, 50, 75 \text{ } ^\circ\text{C}$) et $G=1000 \text{ W/m}^2$ | 39 |
| Figure II.13: Hacheur survolteur | 40 |
| Figure II.14: Modèle R-C de la batterie | 40 |
| Figure II.15: Hacheur survolteur-dévolteur | 41 |
| Figure II.16: Bus continue | 41 |
| Figure III.1: Présentation du site de Bejaïa | 44 |
| Figure III.2: le profil de charge pendant l'été | 46 |
| Figure III.3: Le profil de charge pendant hiver | 46 |
| Figure VI.1: Organigramme de gestion d'énergie dans le système global | 54 |
| Figure IV.2: Schéma bloc de simulation global | 55 |
| Figure IV.3: Profil de la vitesse de vent pour une journée d'été | 56 |
| Figure IV.4: Profil de l'ensoleillement pour une journée d'été | 56 |
| Figure IV.5: Profil de charge pour une journée d'été | 57 |
| Figure IV.6: Profil de vent pour une journée d'hiver | 57 |
| Figure IV.7: Profil de l'ensoleillement pour une journée d'hiver | 58 |
| Figure IV.8: Profil de charge pour une journée d'hiver | 58 |
| Figure IV.9: Puissance fournie par le système éolien | 59 |
| Figure IV.10: Courant fournie par le système éolien | 59 |
| Figure IV.11: Flux rotorique | 60 |
| Figure IV.12: Couple électromagnétique | 60 |
| Figure VI.13: Courant I_{sd} et I_{sq} | 61 |
| Figure IV.14: Puissance fournie par le générateur photovoltaïque | 61 |
| Figure IV.15: Courant fournie par le générateur photovoltaïque | 62 |
| Figure IV.16: Puissance demandée par la charge | 62 |
| Figure IV.17: Courant demandée par la charge | 63 |
| Figure IV.18: Courant de la batterie | 63 |
| Figure IV.19: Tension de la batterie | 64 |
| Figure IV.20: Etat de charge de la batterie (SOC) | 64 |
| Figure IV.21: Courant à dissiper dans une charge dérivative | 65 |
| Figure IV.22: Allure des courants i_{hyb} , i_{ch} , i_{bat} | 65 |
| Figure IV.23: Allure de la tension du bus continue | 66 |
| Figure IV.24: Puissance fournie par le système éolien | 67 |

Liste des figures.

| | |
|--|----|
| Figure IV.25: Courant fournie par le système éolien | 68 |
| Figure IV.26: Flux rotorique | 68 |
| Figure IV.27: Couple électromagnétique | 69 |
| Figure IV.28: Courant I_{sd} et I_{sq} | 69 |
| Figure IV.29: Puissance fournie par le générateur photovoltaïque | 70 |
| Figure IV.30: Courant fournie par le générateur photovoltaïque | 70 |
| Figure IV.31: Puissance demandée par la charge | 71 |
| Figure IV.32: Courant demandé par la charge | 71 |
| Figure IV.33: Courant de la batterie | 72 |
| Figure IV.34: Tension de la batterie | 72 |
| Figure IV.35: Etat de charge de la batterie (SOC) | 73 |
| Figure IV.36: Courant à dissiper dans une charge dérivation | 73 |
| Figure IV.37: Allure des courants i_{hyb} , i_{ch} , i_{bat} | 74 |

Liste des tableaux

| | |
|--------------|--|
| Tableau I .1 | Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques |
| Tableau I .1 | Estimation des besoins énergétiques journalier. |

Nomenclature

Nomenclature et Abréviations

Nomenclature

| | |
|------------------|---|
| P_V | La puissance cinétique du vent. |
| T_{aero} | Couple aérodynamique de la turbine. |
| P_{aero} | La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine. |
| Ω_t | La vitesse de la turbine. |
| ρ | La densité de l'air. |
| s | La surface balayée par la turbine. |
| v | La vitesse du vent. |
| C_p | Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. |
| β | L'angle d'orientation de la pôle. |
| λ | Vitesse relative de l'éolienne. |
| Ω | Vitesse mécanique de la génératrice. |
| T_{em} | Le couple électromagnétique du rotor de la génératrice. |
| T_g | Couple du multiplicateur de vitesse. |
| J | L'inertie totale. |
| J_g | L'inertie de la génératrice. |
| J_t | L'inertie de la turbine. |
| T_{mec} | Couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice. |
| T_{vis} | Couple de frottement visqueux. |
| f | Le coefficient de frottement visqueux. |
| Ω_s | La vitesse statorique. |
| w_s | Pulsation des grandeurs électriques statoriques. |
| p | Nombre de paires de pôles. |
| R_s | La résistance statorique par phase. |
| R_r | La résistance rotorique par phase. |
| v_{sabc} | Les tensions simples triphasées au stator de la machine. |
| i_{sabc} | Les courants au stator de la machine. |
| φ_{sabc} | Les flux propres circulants au stator de la machine. |
| v_{rabc} | Les tensions simples triphasées au rotor de la machine. |
| i_{rabc} | Les courants au rotor de la machine. |

Nomenclature et Abréviations

| | |
|------------------|--|
| φ_{rabc} | Les flux propres circulants au rotor de la machine. |
| L_s | Inductances cyclique statorique. |
| L_r | Inductances cyclique rotorique. |
| m_s | Inductance mutuelle entre les phases statoriques. |
| m_r | Inductance mutuelle entre les phases rotoriques. |
| M_{sr} | Inductance mutuelle entre les phases statoriques et les phases rotoriques. |
| M_{rs} | Inductance mutuelle entre les phases rotoriques et les phases statoriques. |
| M_0 | Maximum de la mutuelle inductance stator rotor quand leur axes coïncident. |
| 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. |
| ω | La pulsation mécanique. |
| ω_s | La pulsation statorique. |
| ω_r | La pulsation rotorique. |
| V_{ds} | Tension statorique d'axe direct. |
| V_{qs} | Tension statorique d'axe quadratique. |
| V_{dr} | Tension rotorique d'axe direct. |
| V_{qr} | Tension rotorique d'axe quadratique. |
| I_{ds} | Courant statorique d'axe direct. |
| I_{qs} | Courant statorique d'axe quadratique. |

Nomenclature et Abréviations

| | |
|-----------------|---|
| I_{dr} | Courant rotorique d'axe direct. |
| I_{qr} | Courant rotorique d'axe quadratique. |
| φ_{ds} | Flux statorique d'axe direct. |
| φ_{qs} | Flux statorique d'axe quadratique. |
| φ_{dr} | Flux rotorique d'axe direct. |
| φ_{qr} | Flux rotorique d'axe quadratique. |
| V_{dc} | Tension redressée & Tension du bus continue. |
| I_{dc} | Courant redressé. |
| s_a, s_b, s_c | Fonction de connexion de l'interrupteur. |
| R_s | Résistance série. |
| R_{sh} | Résistance shunt. |
| I_{pv} | Le courant de la cellule photovoltaïque. |
| I_{ph} | Le photo-courant. |
| I_d | Courant de polarisation de la jonction PN. |
| I_{Rsh} | Courant traversant la résistance shunt. |
| I_{mpp} | Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum(I_{opt}). |
| V_{mpp} | Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimum(I_{opt}). |
| I_{sc} | Courant en court-circuit. |
| V_{oc} | Tension en circuit ouvert. |
| G_{stc} | Le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement. |
| G | Le niveau d'insolation dans les conditions quelconques. |

Nomenclature et Abréviations

| | |
|-----------------------------|--|
| ΔG | Représente la variation de l'insolation. |
| T_{stc} | La température dans les conditions standards de fonctionnement. |
| T_c | La température dans les conditions quelconques. |
| ΔT_c | Représente la variation de la température. |
| ΔI | Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et la température. |
| ΔV | Représente la variation de tension par rapport à l'insolation et la température. |
| α_{sc} | Représente un coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc} . |
| β_{oc} | Représente un coefficient d'incrémentatation de tension V_{sc} . |
| V_{pv} | Tension photovoltaïque. |
| α | Rapport cyclique d'un hacheur. |
| I_{Lmoy} | La valeur moyenne du courant dans l'inductance d'un hacheur. |
| $V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$ | Tension simple à la sortie de l'onduleur. |
| C_b | Capacité nominale des batteries [Ah]. |
| EDC | Etat de Charge. |
| Q_d | Quantité de charge manquante par rapport a C_{batt} . |
| V_{batt} | Tension aux bornes des batteries. |
| R_s | Résistance interne de la batterie. |
| I_c | Courant circulant dans la capacité C. |
| I_{ch} | Courant de la charge. |
| C_{ch} | Capacité du bus continue. |
| N_{pv} | Nombre des panneaux photovoltaïques. |
| P_{pv} | Puissance du générateur photovoltaïque. |

Nomenclature et Abréviations

| | |
|----------------|--|
| $P_{pv,u}$ | Puissance unitaire d'un module photovoltaïque. |
| V_L | La tension nominale de la charge. |
| V_m | La tension nominale du module. |
| $N_{pv\ s}$ | Nombre de modules en série. |
| N_j | Le nombre de jour d'autonomie des batteries. |
| U_{batt} | La tension nominale de la batterie. |
| R_C | Le rendement de la batterie. |
| $C_{batt,tot}$ | La capacité de la batterie totale. |
| C_{batt} | La capacité de la batterie unitaire. |
| $E_{l,m,Max}$ | La charge mensuelle maximale. |

Abréviation

| | |
|------|---|
| STC | Standard Test Condition |
| MADA | La machine asynchrone à double alimentation |
| SMES | Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs |
| SEH | Système d'énergie hybride |
| CA | Courant alternatif |
| CC | Courant continue |

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, on utilisait les moulins à eau, à vent, feu de bois, traction animale, bateau à voile qui ont largement contribué au développement de l'humanité. Ces énergies constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Avec la crise mondiale marquée par la hausse du prix du pétrole et le protocole de Kyoto pour la réduction des gaz à effet de serre, ont conduit à un développement des énergies renouvelables, cela provoque une décentralisation de la production d'énergie électrique, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, nous retenons le système d'énergie hybride(SEH) qui combine deux sources à énergie renouvelable (éolienne et photovoltaïque) avec des batteries de stockage qui résout les problèmes de la disponibilité de l'énergie. Cette méthode de production d'électricité est rentable dans les régions isolées. Ainsi, ce système est destiné à alimenter des foyers à usage domestique et assuré satisfaction des besoins énergétiques avec une certaine garantie en matière d'autonomie.

Notre travail est réparti en quatre chapitres :

Le premier chapitre, porte sur une description générale, et le principe de fonctionnement des systèmes éolien et photovoltaïque avec stockage.

Le second chapitre est consacré à la modélisation et au dimensionnement de chaque élément qui constitue le système hybride

Le troisième chapitre est consacré on dimensionnement d'un système hybride éolien - photovoltaïque avec stockage.

Dans le dernies chapitre nous allons faire une gestion d'énergie du système hybride dans le but de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale qui résume notre travail sur SEH.

Chapitre I

Généralités sur systèmes hybride

I.1. Introduction

Le territoire national est immense. Les habitations ne sont pas couvertes par le réseau électrique ou se trouvent à des distances significatives de celui-ci. Les coûts de raccordement au réseau sont importants et parfois le raccordement est tout simplement impossible [1]. Pour ce type d'habitations l'approvisionnement en électricité se fait avec des génératrices à partir d'énergies fossiles, propane, diésel ou mazout. L'utilisation de ces carburants a de nombreux inconvénients, leur prix ne cesse de s'accroître étant donné que la ressource est portée à disparaître et les coûts de transport et d'entretien sont élevés. Ces carburants sont aussi une source de gaz à effet de serre, en plus de présenter des risques pour la sécurité, la santé publique et sur les écosystèmes. La manutention et transport engendrent des accidents au cours de leur utilisation (fuite de gaz, incendie, ventilation inadéquate, etc.).

La production d'électricité décentralisée par des sources d'énergies renouvelables, (photovoltaïque-éolien) offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [2].

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se compléter mutuellement. C'est pourquoi on propose ici ce système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles [3].

I.2. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)

Le système hybride de production de l'énergie, est celui qui combine et exploite deux sources différentes ou plus. Le système (SEH) qui nous intéresse, regroupe l'éolienne et le photovoltaïque, qui sont disponibles et facilement modélisables. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique.

Notre étude portera sur l'alimentation d'une maison à partir de ce type d'énergie (solaire, éolienne associé aux batteries de stockage).

I.3. Les différentes combinaisons des systèmes hybrides

Le système hybride de production d'énergie, de façon générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Dans ce qui suit nous allons présenter quelques différentes combinaisons de système hybride.

I.3.1. Système hybride (photovoltaïque- groupe électrogène)

Les panneaux photovoltaïques et les groupes électrogènes se comportent très bien les uns avec les autres. Les systèmes photovoltaïques n'entraînent aucune consommation de combustible et leur frais d'entretien sont généralement bas, mais les frais d'immobilisation sont un peu plus élevés et la production d'énergie est de façon intermittente. Par contre les groupes électrogènes entraînent des coûts d'entretien et d'exploitation élevée, mais peuvent produire de l'énergie à la demande. La combinaison de ces deux sources permet la production continue de l'énergie, cependant elle n'est pas entièrement renouvelable [4].

I.3.2. Système hybride (éolien- groupe électrogène)

Ces types de systèmes produisent de l'énergie afin de réduire la consommation en carburant du groupe électrogène, tout en gardant une qualité d'énergie acceptable. Pour être économiquement justifié, l'investissement en équipement nécessaire pour profiter de l'énergie du vent, doit se récupérer à travers les économies réalisées sur le carburant. A cause de la grande quantité de mini réseaux isolés dont l'énergie primaire est le pétrole.

Dans les pays développés ou dans les pays en voie de développement, le marché pour réadapter ces systèmes en sous-système hybrides avec des sources renouvelables de faible coût, comme l'éolien, est substantiel [5].

I.3.3. Système hybride (photovoltaïque-stockage) [6]

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Différents types de stockage existent comme un banc de batterie, un électrolyseur d'hydrogène et les super condensateurs.

L'utilisation de super condensateur est une conception très récente qui est utilisée pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent et aussi se sont des dispositifs très chers, pour un banc de batteries est un dispositif de stockage qui est largement disponible dans le marché et elle est la plus intéressante car elle peut alimenter une charge pour une durée plus importante mais parfois elle ne peut pas satisfaire la charge en cas d'absence d'énergie photovoltaïque. Alors parfois on fait appel à d'autres sources d'énergie conventionnelles.

I.3.4. Système hybride (photovoltaïque-éolien-stockage) [6]

Ce type de système hybride se base sur des ressources purement renouvelable et c'est le plus grand avantage, par contre l'inconvénient majeur est le manque de diversité de l'alimentation parce que les ressources primaire utilisées sont unique. Cela induit plusieurs désavantage comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes et une augmentation du prix de kilowattheure produit). Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie conventionnelle.

I.3.5. Système hybride (photovoltaïque-éolien –groupe électrogène)

Ce type de système est bien adapte à une production décentralisée d'électricité, peut contribuer à résoudre le problème de raccordement aux réseaux électricité. La donnée initiale dans la mise en œuvre d'un tel système de production à partir de sources d'énergies renouvelables comme pour tous autres systèmes énergétiques est la demande, qui va être déterminée par rapport à la charge à alimenter. Cette demande doit être estimée aussi précisément que possible tant d'un point de vue des puissances appelées que de sa répartition temporelle, même si son caractère souvent aléatoire rend cette tâche bien difficile. L'ajout d'un groupe électrogène à un système de production d'énergie renouvelable, peut d'une part augmenter la fiabilité du système à alimenter des charges et d'autre part diminuer de manière importante de la taille du système de stockage [4].

I.4. Avantage et inconvénients d'un système hybride [7]

Avantage

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Faible coûts liés au cycle de vie de l'électricité pour des applications.
- Exploitation simple.

Inconvénients

- coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes électrique isolés, nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité.

I.5. Composant d'un système hybride

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués :

- une source d'énergie classique (groupe électrogène),
- des sources d'énergie renouvelable (éolienne, photovoltaïque, hydroélectrique).
- des convertisseurs statiques.
- des systèmes de stockage (batterie).
- des charges principales et de délestages.
- un système de surveillance (contrôle d'arrivée et consommation d'énergie).

I.6. Energie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement (solaire) en énergie électrique [8], Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [9].

I.6.1. Conversion photovoltaïque

I.6.1.1. Rayonnement solaire

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par une masse, de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et autres (2%). Il a un diamètre de 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la terre.

L'énergie du Soleil est transmise sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque l'énergie a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à $1\,367\text{ W/m}^2$. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire [10].

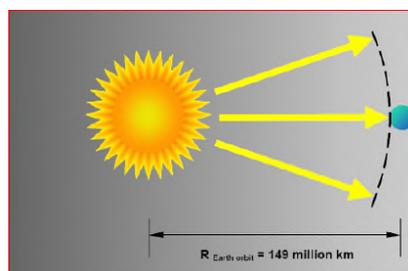


Figure I.1 : Distance Terre-Soleil

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [11].

I.6.1.2. Le spectre de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique décomposé de grains de lumière appelés photons, l'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde dont 98% d'énergie est comprise entre $\lambda = 0.25\mu\text{m}$ et $\lambda = 4\mu\text{m}$ le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle.

Le spectre de rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K [12].

La répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde comprise entre l'intervalle $\lambda = 0.25$ et $\lambda = 4$ comprennent 98% de énergie totale se décompose aussi à [13] :

Pour $0.25\mu\text{m} < \lambda < 0.4\mu\text{m}$: c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour $0.4\mu\text{m} < \lambda < 0.8\mu\text{m}$: c'est le domaine du visible, il représente 47.5% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour $0.8\mu\text{m} < \lambda < 4\mu\text{m}$: c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45.5% de l'énergie totale émise par le soleil.

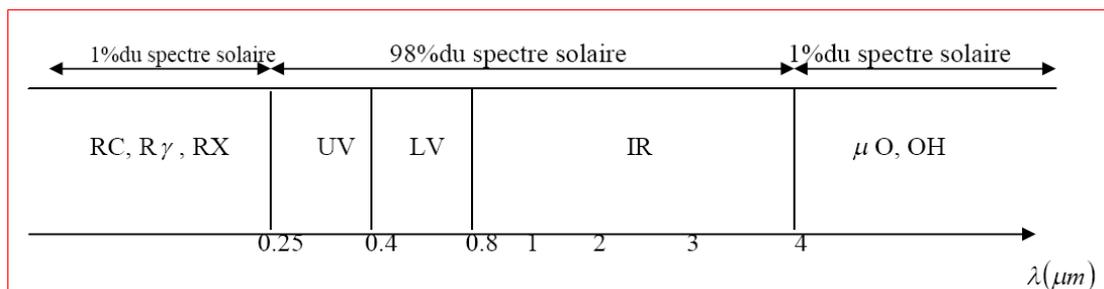


Figure I.2 : spectre du rayonnement solaire

I.6.2. Les cellules photovoltaïques

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé « effet

photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V à 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de la cellule [10].

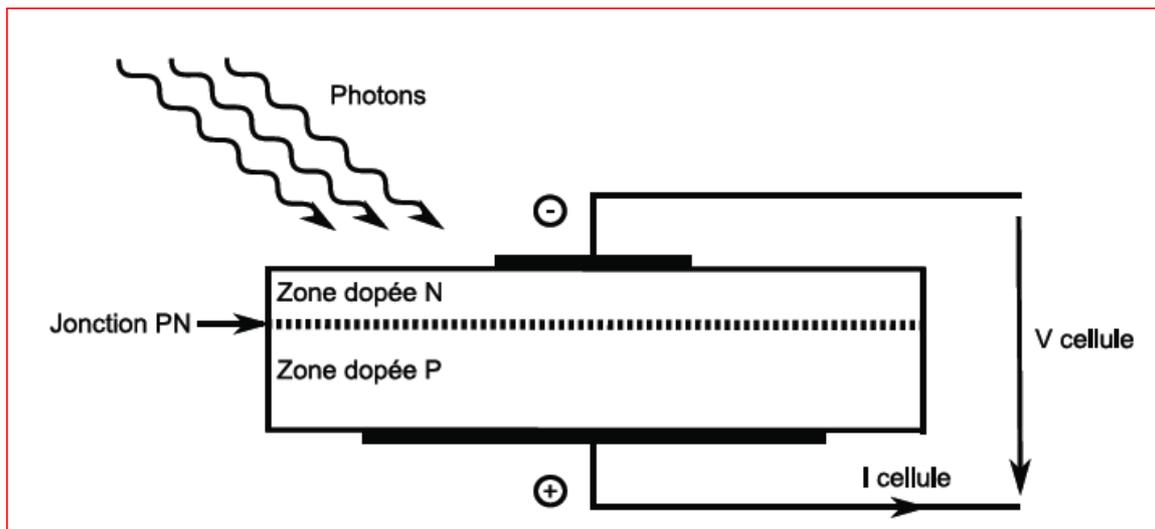


Figure I.3 : Détail de la coupe transversale d'une cellule PV

Elle est réalisée à partir de deux couches de Semi conducteur, une dopée (P) et l'autre couche dopée(N) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [14].

I.6.2.1. Technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants **optoélectroniques** qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou polycristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité et de 12 à 15 %.

- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe. Son efficacité est moindre, variant de 6 à 10 % , de durée de vie généralement inférieure à 20 ans.
- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes [15].

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant :

Tableau 01 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [15].

| Type de cellules | Rendements des cellules (%) | | | Domaines d'application |
|---------------------------|-------------------------------|----------------|------------|--|
| | Théorique | En laboratoire | Disponible | |
| Silicium monocristallin | 27 | 24.7 | 14 -16 | modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances. |
| Silicium poly cristallin | 27 | 19.8 | 12 -14 | modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés) |
| Silicium amorphe | 25 | 13 | 6-8 | appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) |
| Arséniure de Gallium GaAs | 29 | 27.5 | 18-20 | systèmes de concentrateur, espace (satellites). |
| CIS | 27.5 | 18.2 | 9-11 | appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) |
| Tellurure de Gadmuim CdTe | 28.5 | 16 | 9-11 | modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment) |

I.6.3. Constitution d'un module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque seule est souvent peu utilisable, son faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins de 1V. Ainsi pour accroître la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle.

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant figure (I.7).

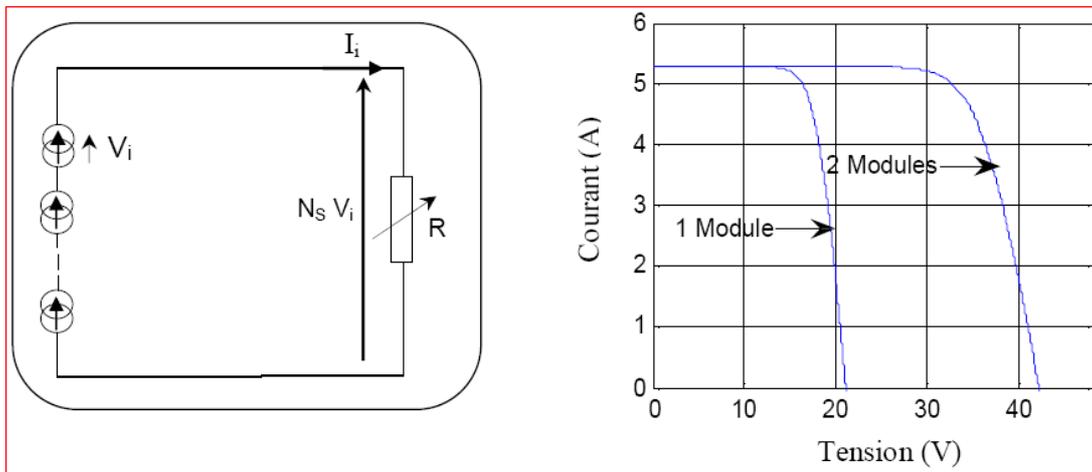


Figure I.4 : Groupement des cellules PV en série.

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension figure (I.8) [16].

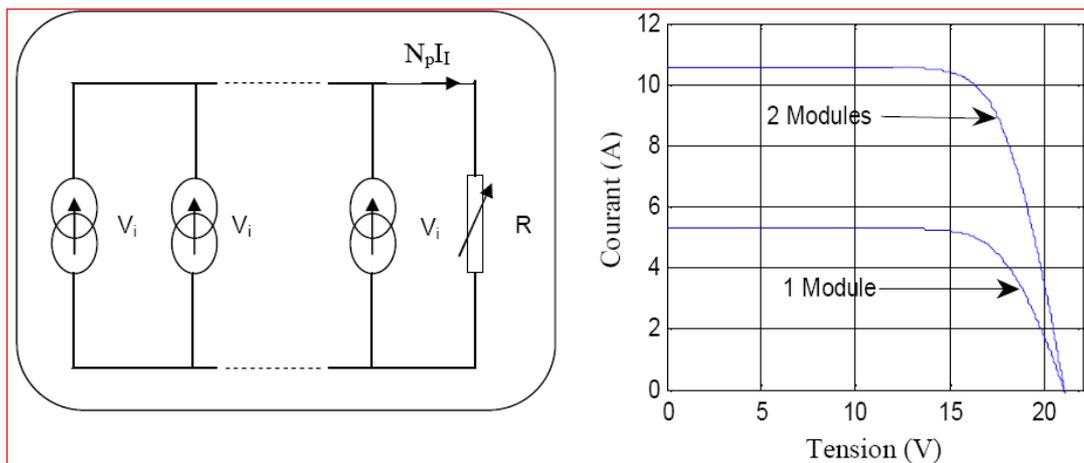


Figure I.5 : Groupement des cellules en parallèle.

I.6.4. Le générateur photovoltaïque

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.



Figure 06 : Générateur photovoltaïque.

I.6.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV

a. Avantage

- L'énergie primaire est gratuite.
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants
- Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.

b. Inconvénients

- Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de chose dans le bilan énergétique mondial.
- L'ensemble des modules existant actuellement produit autant d'énergie que 20 % d'une

tranche nucléaire. Ce n'est pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux internationaux actuels.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût de l'installation photovoltaïque est élevé [17].
- Tributaire des conditions météorologiques.

I.7. Energie éoliennes

Le vent est une source d'énergie renouvelable, économique, exploitable avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement.

La ressource d'énergie éolienne provient du vent. Lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète en fonction de réchauffement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement [13].

L'énergie éolienne maintient une croissance mondiale de 30 % par an depuis une dizaine d'années. LEWEA estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040 [18].

I.7.1. Le principe de fonctionnement d'une éolienne

On utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de

raccordement au réseau électrique public [19]. La figure (I.10) illustre les différentes étapes de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

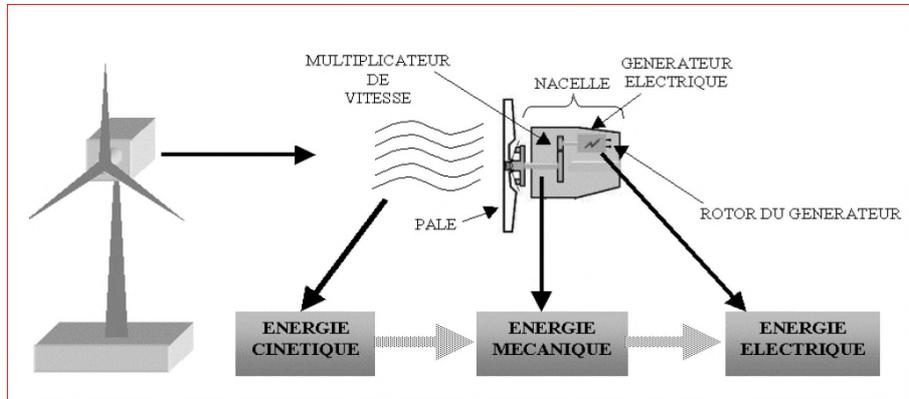


Figure I.7 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.7.2. Classification des éoliennes

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique. Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître des groupes, des noms et des formes de ces éoliennes. Généralement, on les classe selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière [20] :

- les éoliennes à axe horizontal
- les éoliennes à axe vertical

I.7.2.1. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont des machines actuellement les plus répandues à cause de leur bon rendement. Elles comportent généralement des hélices à différentes pales (figure (I.11)).

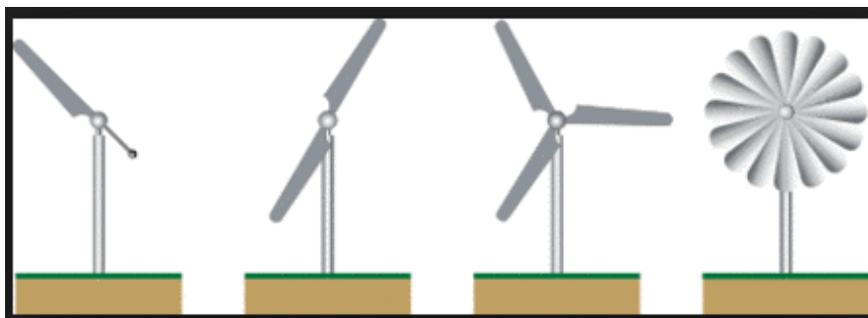


Figure I.8 : Les hélices à différents pales.

Les aérogénérateurs ont plus ou moins de pales ; plus le nombre de pales est grand, plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les aérogénérateurs modernes ont 1, 2 ou 3 pales. Les machines uni pale et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » voir figure (I.12).

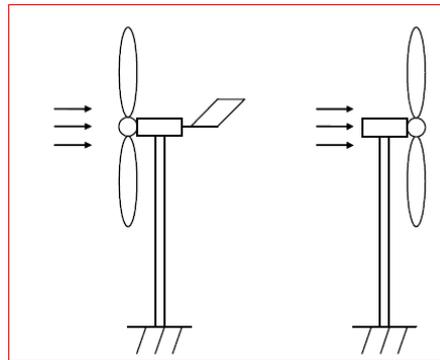


Figure I. 9: Turbines éoliennes en amont et en aval.

I.7.2.1.1. Les composants d'une éolienne

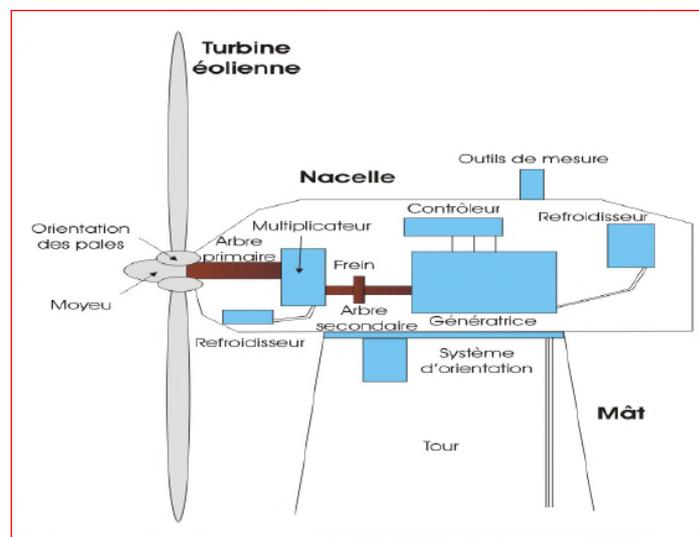


Figure I.10 : Principaux composants d'une éolienne [3].

Une éolienne à axe horizontale (les plus courantes) se compose de trois parties principales.

Le rotor avec les pales, c'est la zone qui captera l'énergie cinétique du vent et la transformera en énergie mécanique [21].

La nacelle, c'est la partie où l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Il y a aussi dans la nacelle des systèmes de contrôle et de freinage dans le cas où le vent serait trop fort [22], elle compose de :

Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.

L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

Le mât (tour) et les fondations, qui supportent la nacelle et le rotor, ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes qu'il peut y avoir. Le mât est plus ou moins haut (dépend de la machine et de la vitesse du vent qui cherche à être récupérée). Il peut faire en général de 10 à 100 m de hauteur [22].

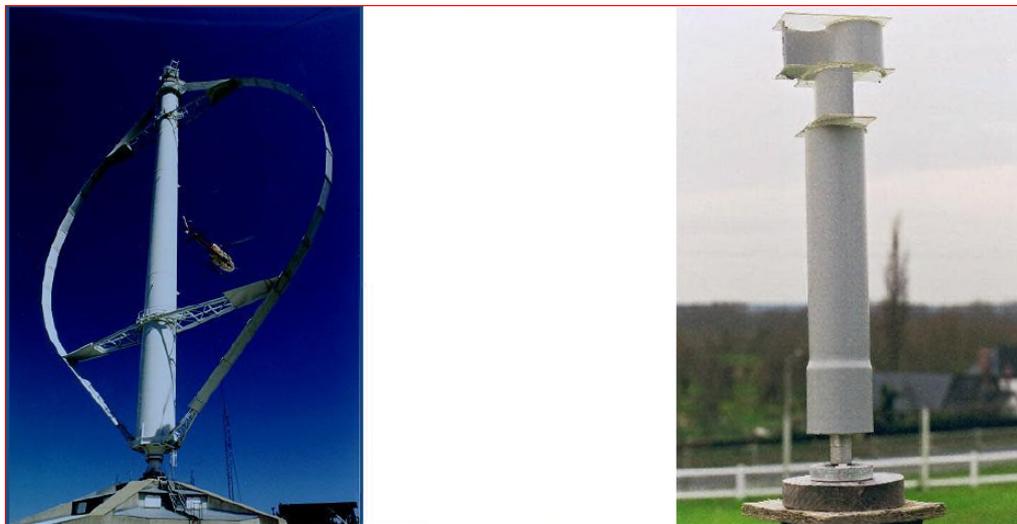
I.7.2.2. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

- **L'éolienne Savonius** comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre.
- **L'éolienne Darrieus** est un rotor dont la forme la plus courante. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisé [23].



Éolienne de type darrieus.

Éolienne de type savonius

Figure I.11 : éolienne de type Darrieus et Savonius

I.7.3. Différentes classes d'un système éolien connectées au réseau [24]

On peut classifier les systèmes éoliens à axe horizontal en deux différentes classes :

- **Système éolien à vitesse fixe** : Ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses égales à la vitesse nominale et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz.
- **Système éolien à vitesse variable** : Ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes des vitesses nominales. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement :

- **Technique mécanique** : C'est une technique qui utilise les paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens là on distingue deux modes : le « stall control » (basé sur l'accrochage et l'écoulement décrochage de la génératrice à la turbine), robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive, et le « pitch control » (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.
- **Technique électrique** : C'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse.
- **Technique hybride** : C'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du système.

Dans ce que suit, nous exposons brièvement les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.

I.7.3.1. Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance.

Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [21].

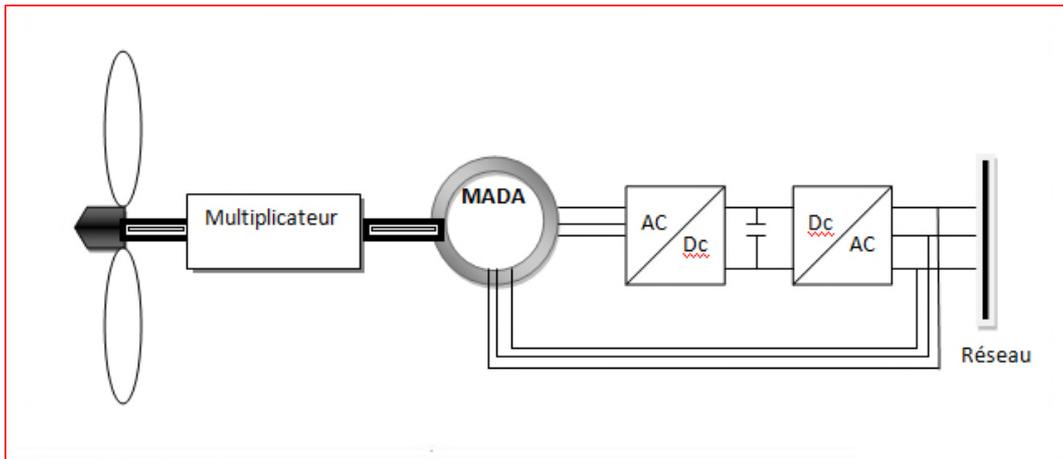


Figure I.12 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable

I.7.3.2. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les éoliennes de grande puissance mise en service reposent sur l'utilisation des machines asynchrones à cage directement couplée au réseau électrique. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales. La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse $\Omega_s(1-g)$ avec Ω_s est la vitesse de synchronisme (souvent $\Omega_s = 1500$ tr/mn) et g est le glissement, avec $g < 0$ pour un fonctionnement en génératrice avec une convention moteur ($|g| \leq 1\%$).

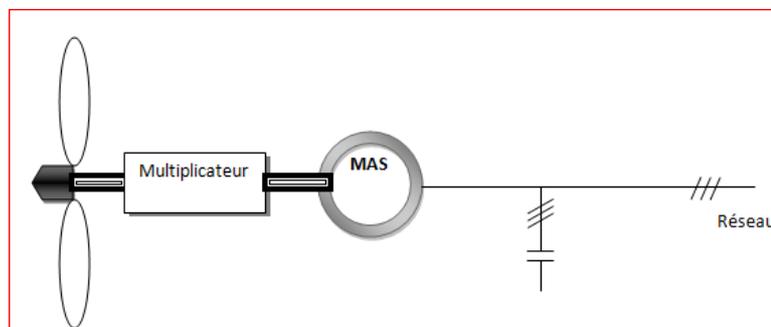


Figure I.13 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.

I.7.3.3. Générateur synchrone

La génératrice synchrone ou alternateur n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite.

La régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur. Elle permet un fonctionnement à vitesse variable, donc à rapport d'avance constant et rendement optimal. Elle permet aussi de limiter les efforts dynamiques en autorisant le rotor à accélérer en cas de forte rafale (stockage d'une partie de l'énergie cinétique du vent dans l'inertie du rotor). Plus complexe à construire et plus chère (aimants permanents, convertisseur), la génératrice synchrone est relativement peu utilisée [21].

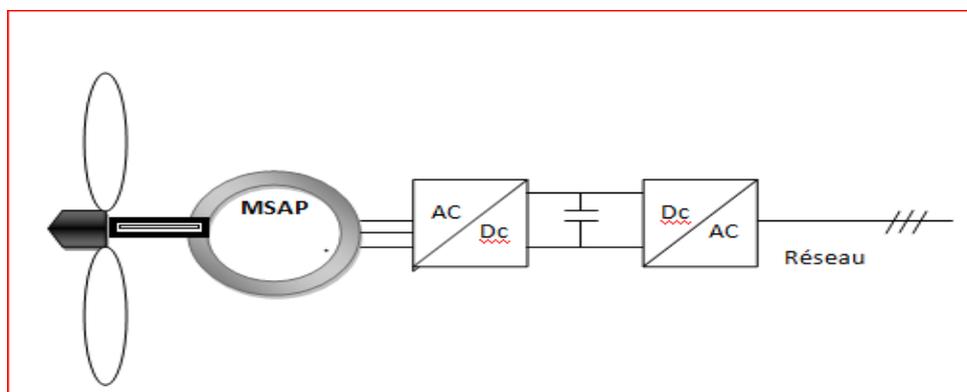


Figure I.14 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.

I.7.4 . Système éolien autonome

L'énergie éolienne autonome est aussi utilisée pour fournir de l'énergie électrique à des sites isolés, à relief accidenté qui sont inaccessibles au réseau électrique, et alimenter des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés. Ces aérogénérateurs sont plus petits et ne représentent que 0,8 % de la puissance électrique générée à partir du vent dans le monde. Dans ce mode on

peut utilisée des générateurs synchrones (à rotor bobine ou à aimant permanent), ou des générateurs asynchrones à cage d'écurueil pour convertir l'énergie mécanique fourni par la turbine en énergie électrique. Pour notre étude on a choisie la machine asynchrone à cage d'écurueil.

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

Démunie du circuit d'excitation autonome comme les alternateurs, la magnétisation de la génératrice asynchrone (à cage d'écurueil) lui est fournie par une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'autoamorçage et enfin les entretenir. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour son auto-amorçage. Il est possible, dans ces conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau pour un fonctionnement dit autonome pour pouvoir alimenter une charge isolée.

I.7.5. Application des éoliennes

L'éolien transforme l'énergie cinétique des masses d'air en énergie mécanique de rotation qui peut être exploitée soit :

- Directement pour entrainer une pompe de relevage
- Pour entrainer une génératrice électrique, Dans ce cas on distingue deux configurations :
 - Stockage de l'énergie dans des batteries d'accumulation en vue de son utilisation ultérieurement
 - Injection directe de l'énergie sur réseau de distribution [25].

I.7.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

Avantage [26]

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.

- L'énergie éolienne est une énergie propre.

Inconvénients [18]

- La nature du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pâles en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger.

I.8. Généralité sur le stockage

Le stockage d'électricité présente plusieurs attraits importants pour la généralisation, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Pour le réseau public, par exemple, une installation de stockage d'énergie est utile pour conserver l'électricité générée durant les périodes creuses de consommation afin de la restituer lors des fortes demandes. Le stockage d'énergie permet de fournir de l'énergie de soutien en cas de panne de réseau ; le stockage d'énergie est la seule réponse possible à une perte du réseau d'alimentation électrique. Le stockage d'énergie joue aussi un rôle important dans la généralisation d'électricité à partir de sources renouvelables. La nature intermittente des sources renouvelables comme le solaire, l'éolien et les marées rendent nécessaire une forme de stockage [27].

I.8.1. Présentation des technologies de stockage de l'énergie électrique

Le stockage de l'énergie électrique se réfère à un processus de sa conversion à partir d'un réseau d'alimentation électrique en une autre forme d'énergie qui peut être stockée pour effectuer la transformation inverse en cas de besoin. Les différentes technologies sont présentées une par le stockage à grande échelle et à petite échelle [28].

I.8.1.1. Technique de stockage à grande échelle

- **Stockage d'énergie sous forme d'énergie chimique**

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans la batterie électrochimique est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique.

En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité. Le premier et le plus utilisé sur le marché a été l'accumulateur au plomb dont plusieurs améliorations le rendent encore compétitif sur le marché. Etant disponibles sur une plage de puissance très étendue (quelques watts jusqu'aux quelque MW), les batteries électrochimiques peuvent être utilisées dans une large variété d'applications [29].

- **Principe de fonctionnement des batteries**

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire [27].

I.8.1.2. Technique de stockage à petite échelle

- **Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES)**

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, il faut l'introduire dans un cryostat rempli d'hélium liquide. Ces systèmes ont l'avantage d'une dynamique et d'une cyclabilité très élevées. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il en a très peu de SMES en fonction. Même si les recherches envisagent des SMES de l'ordre de 10 – 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW [29].

- **Stockage d'énergie électrique dans les super-condensateurs**

C'est la seule technologie où l'on peut parler vraiment du stockage d'électricité. Cependant, c'est une technique bien nouvelle qui se trouve encore en phase de recherche. A présent, on trouve fréquemment des super-condensateurs dans les produits électroménagers. Mais leurs puissances ne dépassent pas les 7-10 w. les recherches actuelles ont pour but

l'obtention de super-condensateurs dont la puissance soit de l'ordre de dizaine ou même de centaines de KW, afin d'être utilisés dans des véhicules électriques [29] .

I.9. La charge

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à courant continue peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets inductifs par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système [26].

I.9.1. Caractéristiques de la charge pour notre étude

Dans cette étude, le choix est porté sur une maison type non raccordée au réseau de distribution d'énergie classique et équipée de l'ensemble des appareils permettant de fournir le confort aux occupants. Par ailleurs, il a été supposé que l'habitation est occupée en permanence durant toute l'année et que les équipements électroménagers fonctionnent sous une tension standard 220 V - 50 Hz (tension secteur).



Figure I.15 : Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.

A : Panneau Photovoltaïque ; a : Parafoudre ; B : Éolienne ; m : Moniteur de batterie ;

R : Chargeur de batterie ; S : Sectionneur ;

1 : Disjoncteur de protection ; 2 : Régulateur charge/décharge ; 3 : Disjoncteur CC ;

4 : Batterie ; 5 : Onduleur ; 6 : Coffret de branchement électrique ;

7 : Charge électrique.

I.10. Conclusion

Une brève description dans ce chapitre, est donnée sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine à la fois deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, le système photovoltaïque et le système éolien. Ainsi d'autres composants ont été introduits à fin de permettre une bonne complémentarité du fonctionnement de ce système hybride. Enfin un choix d'une charge à été faite pour notre application.

Chapitre II

Modélisation des composants du système hybride

II .1. Introduction

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système hybride éolien –photovoltaïque et la demande de l'utilisateur.

Dans ce cadre, nous présenterons dans ce chapitre, la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, en se proposant l'élaboration des modèles mathématiques pour les deux systèmes de productions, afin de renforcer la maîtrise de leur exploitation, surtout du point de vue des écoulements des puissances de production en fonction des conditions météorologiques données ou estimées. Puis nous passons au dimensionnement des différents constituants de ce système hybride afin d'obtenir sa taille optimale.

II.2. Modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien

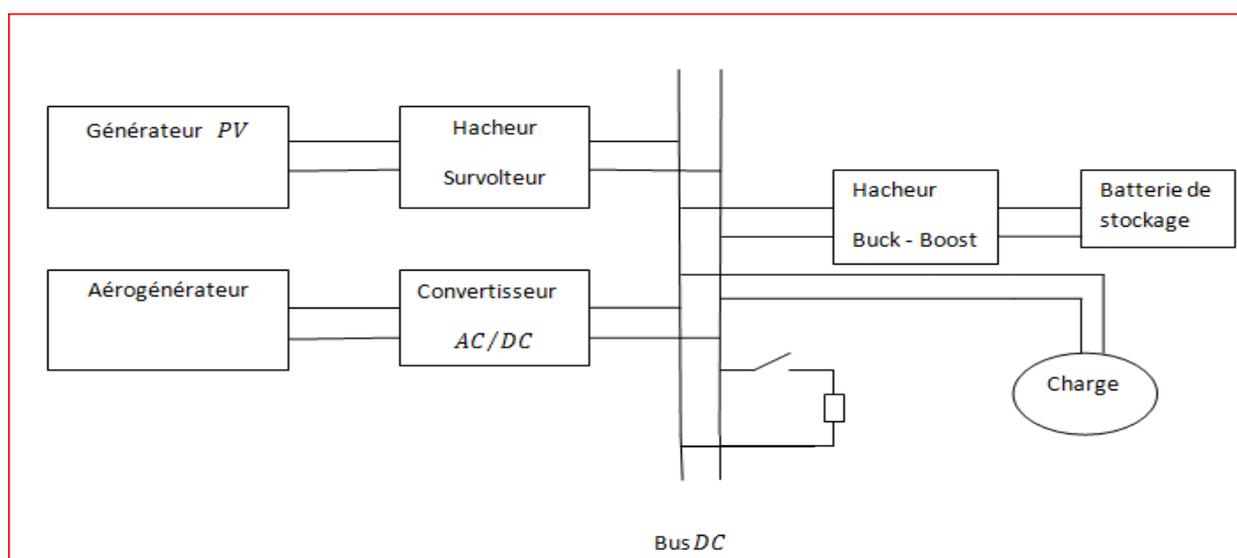


Figure (II.1) : Système hybride éolien –photovoltaïque.

II.2.1. Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de la machine asynchrone à cage d'écureuil

II.2.1.1. Modèle du vent

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterminées. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois.

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

II.2.1.2 Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G Figure (II.2).

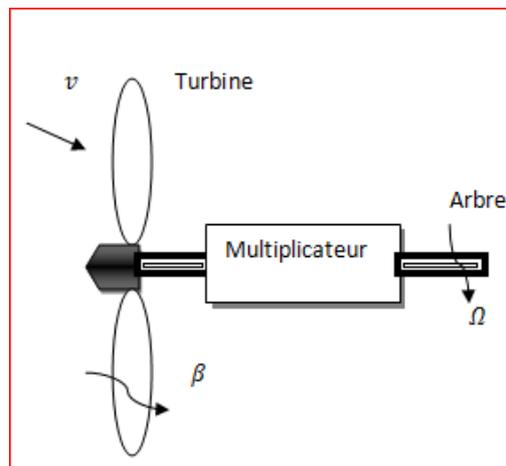


Figure (II. 2) : Turbine éolienne.

II.2.1.2.1. Modèle des pâles

La puissance cinétique du vent est donnée par [30] :

$$P_V = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple aérodynamique T_{aero} est donné par l'expression suivante :

$$T_{aero} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} C_p \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{II.3})$$

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

$$P_{aero} = C_p \cdot P_V = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{II.4})$$

➤ Ω_t est la vitesse de la turbine,

- ρ est la densité de l'air.
- s est l'aire balayée par la turbine, $s = \pi \cdot R^2$
- v est la vitesse du vent.
- C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des dimensions de la pôle, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pôle β .

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine $\Omega_t R$ et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.5})$$

II.2.1.2.2. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω . Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$T_g = \frac{1}{G} T_{aero} \quad (\text{II.7})$$

T_{em} est le couple électromagnétique du rotor de la génératrice.

II.2.1.2.3. Modèle de l'arbre mécanique

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pôles, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice.

$$J = J_g + J_t G^2 \quad (\text{II.8})$$

L'évolution de la vitesse mécanique Ω dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice T_{mec} qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice T_{em} , d'un couple de frottement visqueux T_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse T_g .

$$T_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.9})$$

$$T_{mec} = T_g - T_{em} - T_{vis} \quad (\text{II.10})$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f

$$T_{VIS} = f\Omega \tag{II.11}$$

En remplaçant (II-9) et (II-11) dans (II-10), nous aurons :

$$T_g - T_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \tag{II.12}$$

A partir des équations précédentes on obtient le schéma bloc de toute la turbine qui est représenté comme suit :

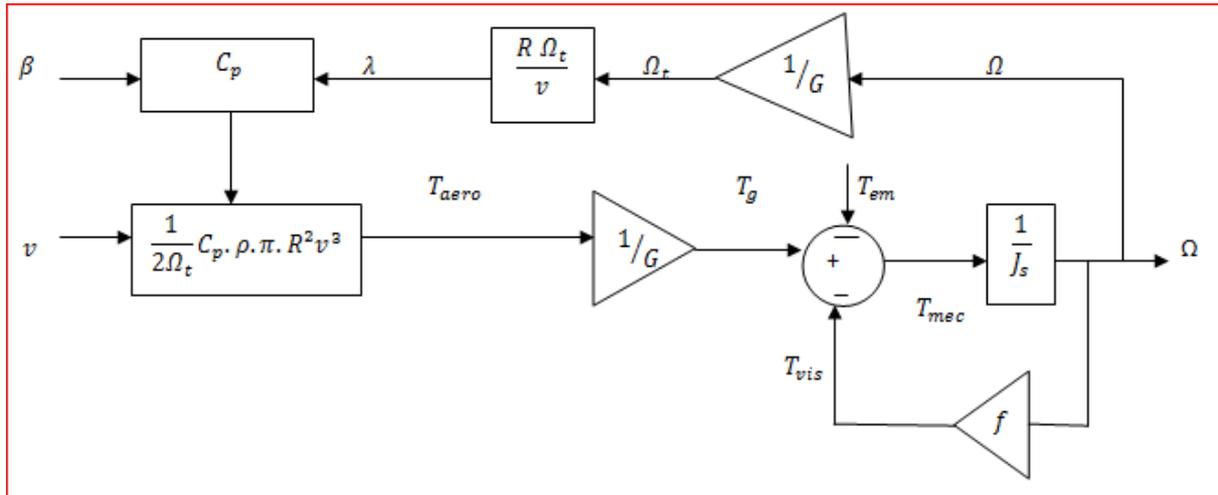


Figure II. 3 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique T_{aero} à partir de la puissance cinétique P_V du vent et par action de l'angle d'orientation des pales β .

Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique T_{aero} de la turbine en couple du multiplicateur T_g , et en même temps, il transforme la vitesse mécanique Ω en vitesse de la turbine Ω_t .

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice Ω résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur T_g auquel s'oppose le couple électromagnétique T_{em} . Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

II .2.1.3. Modèle linéaire mathématique de la machine asynchrone

A. Présentation de la machine asynchrone

La machine asynchrone triphasée est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cylindrique mobile. Les trois enroulements statoriques, couplés en étoile ou en triangle, sont alimentés par un système triphasé de tensions. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant

dans l'entrefer de la machine. La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est donnée par la formule suivante.

$$\Omega_s = \frac{w_s}{p} \quad (\text{II.13})$$

w_s : Pulsation des grandeurs électriques statoriques ;

p : Nombre de paires de pôles.

B. Hypothèse de travail

La modélisation mathématique d'un système complexe, telle la machine, est éventuellement bâtie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices soigneusement formulées.

- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.
- Entrefer constant ;
- Effet des encoches négligé ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte ;
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- Pertes ferromagnétiques négligeables.

C. Equations générales de la machine

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écuréuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielles :

Les six enroulements obéissent aux équations électriques suivantes :

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d\varphi_s}{dt} + R_s i_s = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$v_r = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d\varphi_r}{dt} + R_r i_r = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$[R_s]$ et $[R_r]$: Sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase.

$[v_{sa}]$, $[v_{sb}]$, $[v_{sc}]$: Sont les tensions simples triphasées au stator de la machine.

$[i_{sa}]$, $[i_{sb}]$, $[i_{sc}]$: Sont les courants au stator de la machine.

$[\varphi_{sa}]$, $[\varphi_{sb}]$, $[\varphi_{sc}]$: Sont les flux propres circulants au stator de la machine.

$[v_{ra}]$, $[v_{rb}]$, $[v_{rc}]$: Sont les tensions simples triphasées au rotor de la machine.

$[i_{ra}]$, $[i_{rb}]$, $[i_{rc}]$: Sont les courants au rotor de la machine.

$[\varphi_{ra}]$, $[\varphi_{rb}]$, $[\varphi_{rc}]$: Sont les flux propres circulants au rotor de la machine.

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II .16})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II .17})$$

Avec :

$[L_s]$ et $[L_r]$ représentent respectivement les matrices inductances statoriques et rotoriques exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & m_s & m_s \\ m_s & L_s & m_s \\ m_s & m_s & L_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & m_r & m_r \\ m_r & L_r & m_r \\ m_r & m_r & L_r \end{bmatrix}$$

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

$[m_s]$: Inductance mutuelle entre les phases statoriques.

$[m_r]$: Inductance mutuelle entre les phases rotoriques.

$[M_{sr}]$, $[M_{rs}]$: Inductance mutuelle entre les phases statoriques et les phases rotoriques.

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

D. Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la $[dq]$ transformation de Park est alors utilisé [2]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

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

Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation :

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

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 ;

p : Nombre de paires de pôles.

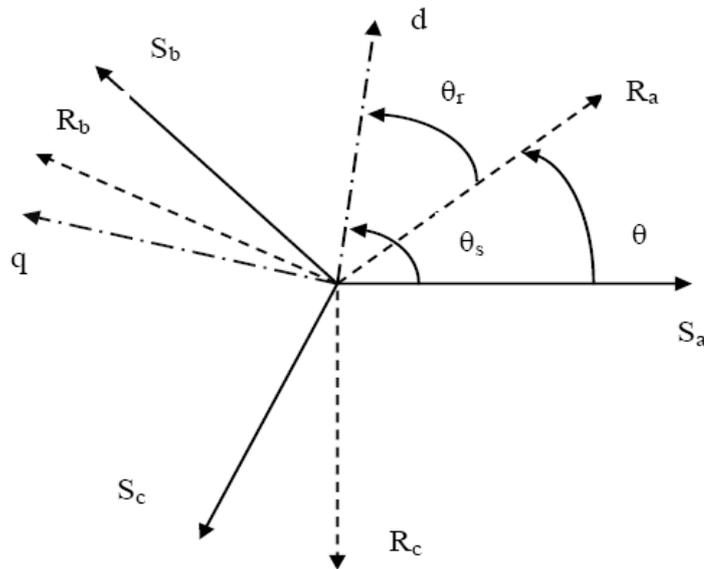


Figure II.4 : Les systèmes d'axe utilisés.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$\begin{cases} [V_{dq s}] = [p(\theta_s)] \cdot [V_{abc s}] \\ [V_{dq r}] = [p(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{abc r}] \\ [I_{dq s}] = [p(\theta_s)] \cdot [I_{abc s}] \\ [I_{dq r}] = [p(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{abc r}] \\ [\varphi_{dq s}] = [p(\theta_s)] \cdot [\varphi_{abc s}] \\ [\varphi_{dq r}] = [p(\theta_s - \theta)] \cdot [\varphi_{abc r}] \end{cases}$$

Ainsi, en multipliant les systèmes d'équations par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_S I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_S I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_{dqs} = L_S I_{dqs} + M_{sr} I_{dqr} \\ \varphi_{dqr} = M_{sr} I_{dqs} + L_r I_{dqr} \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s \\ \omega = \frac{d}{dt} \theta = \omega_s - \omega_r = p\Omega \\ \theta_s = \theta + \theta_r \end{cases}$$

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.

p : Nombre de paires de pôles.

Ω : vitesse mécanique [rd /s].

ω : La pulsation mécanique [rd /s].

Le couple électromécanique synchrone est donné par la formule :

$$T_{em} = \frac{p.M}{L_r} \cdot (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II 18})$$

II.2 .1.4. Modèle du redresseur MLI

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (IGBT) antiparallèle avec des diodes (figure (II.5)). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '0' et en fermeture '1'. La tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs.

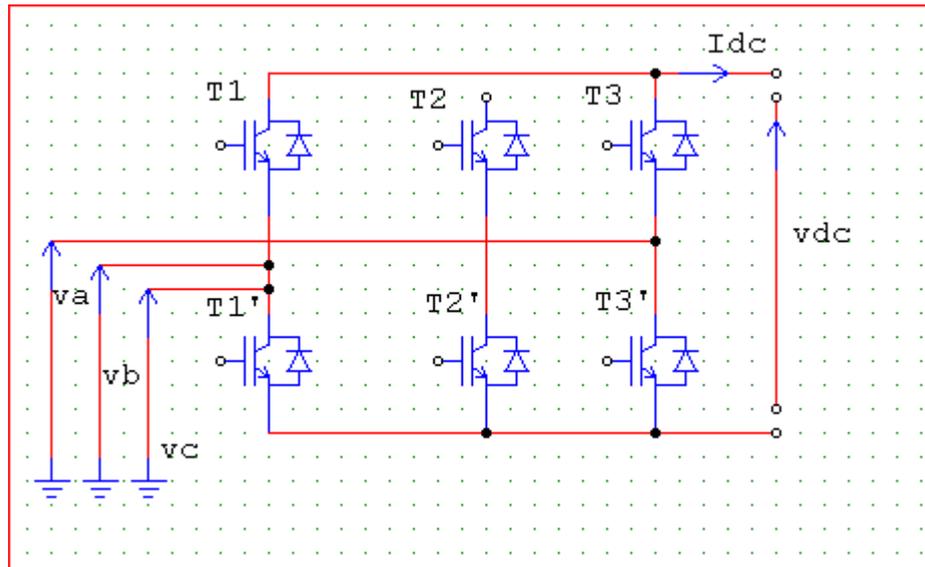


Figure (II.5): Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée.

I_{dc} : Courant redressé.

s_a, s_b, s_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.2.2. Modèle du photovoltaïque

II.2.2.1. Modèle d'un module solaire

Les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque représenté sur la figure (II.6). C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN.

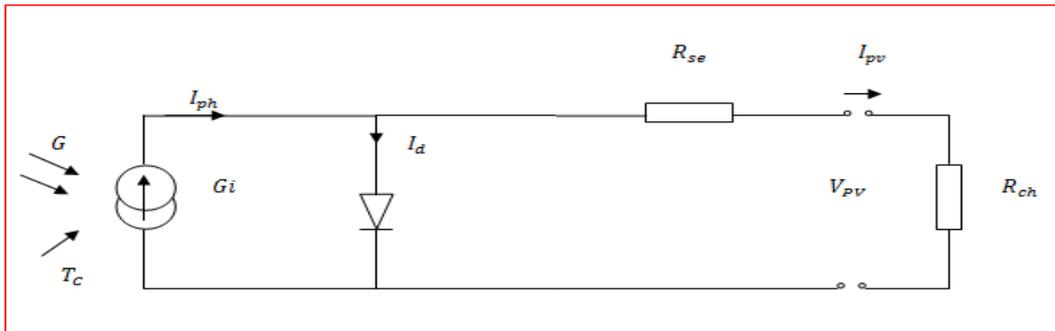


Figure (II.6) : Schéma équivalent d'un module photovoltaïque.

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

Le courant (I_{pv}) de la cellule photovoltaïque sous les conditions standard de fonctionnement est donné par la formule suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad \text{(II .20)}$$

Avec :

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

I_d : Courant de polarisation de la jonction PN.

I_{Rsh} : Courant traversant la résistance shunt.

L'expression du courant de la module solaire est donne par :

$$I_{pv} = I_{sc}\{1 - K_1[\exp K_2V_{pv}^m - 1]\} \quad \text{(II .21)}$$

Ou les coefficients K_1, K_2 et m sont donnes par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad \text{(II .22)}$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \quad \text{(II .23)}$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad \text{(II .24)}$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{K_3}{K_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}}\right]} \quad (\text{II. 25})$$

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

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi Tension optimum (I_{opt}).

I_{sc} : Courant en court-circuit.

V_{oc} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.21) n'est applicable que pour un niveau d'insolation G et de température particuliers ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$), relatif aux conditions standards de transformation. Quand l'insolation et la température varient, le courant et la tension photovoltaïque changent selon les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II. 26})$$

$$\Delta I = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}}\right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1\right) I_{sc,stc} \quad (\text{II. 27})$$

$$\Delta V = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_{se} \Delta I \quad (\text{II. 28})$$

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔG : Représente la variation de l'insolation.

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

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et la température.

ΔV : Représente la variation de tension par rapport à l'insolation et la température.

α_{sc} : Représente un coefficient d'incrément de courant I_{sc} ($\text{A}/^\circ\text{C}$).

β_{oc} : Représente un coefficient d'incrément de tension V_{sc} ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

II.2.2.1.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque

La figure (II.7) représente l'allure de la variation du courant en fonction de la tension aux bornes du panneau photovoltaïque depuis le courant de court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum aux bornes du panneau PV) jusqu'au courant à circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes du panneau PV). Cette courbe est établie dans des conditions standards de fonctionnement (température = 25° C, ensoleillement = 1000 W/m²).

La figure (II.8) représente l'allure de la variation de la puissance en fonction de la tension aux bornes du panneau photovoltaïque. On peut constater sur cette allure qu'elle présente un maximum pour un courant et une tension donnée.

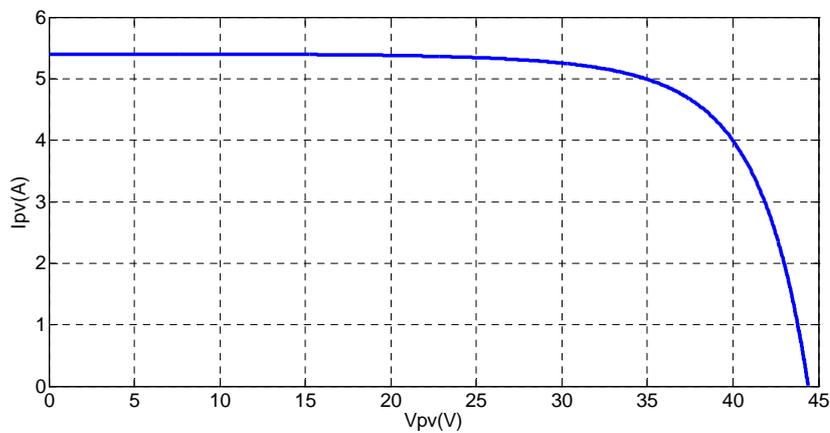


Figure (II.7) : Caractéristique courant – tension I(V) d'un panneau photovoltaïque

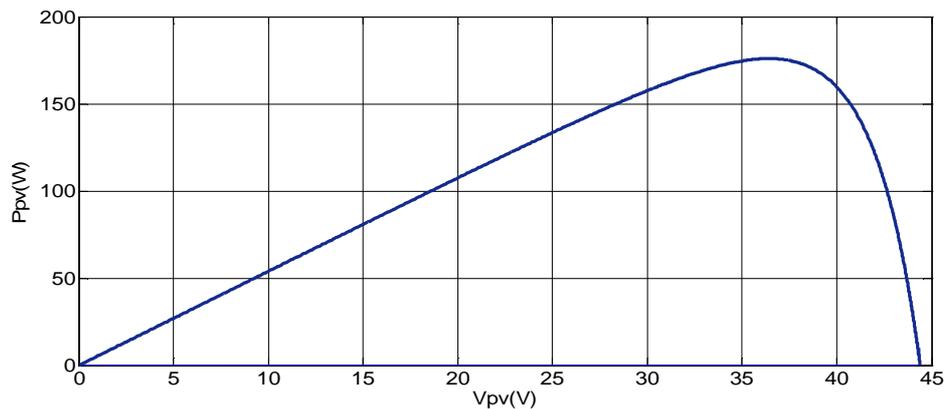


Figure (II.8) : Caractéristique : puissance – tension P(V) d'un panneau photovoltaïque.

II.2.2.1.2 Facteur influençant le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque :

II.2.2.1.2.1 Influence de l'éclairement :

Les résultats de simulation de la caractéristique (I-V) du générateur PV sont représentés sur la figure (II.9) pour différentes valeurs d'éclairement (400, 600, 800, 1000) à une température constant de 25° C.

Ces résultats, obtenus pour le modèle présenté ci-dessus, montrent que la caractéristique (I-V) dépend de l'éclairement. Il est à noter que la tension en circuit ouvert est peu influencée par la variation de l'éclairement, contrairement au courant du court-circuit qui augmente de manière consistante.

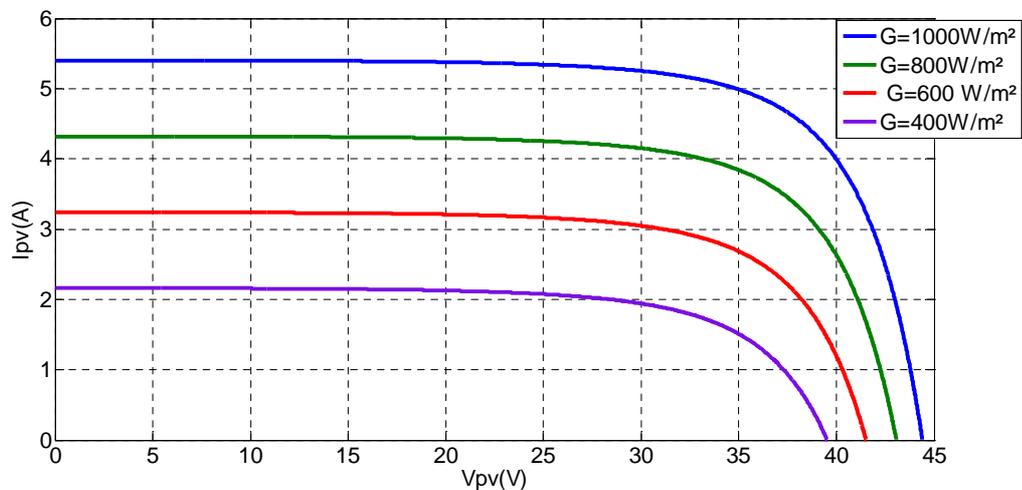


Figure (II.9) : Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G = 1000, 800, 600, 400$) et $T_c = 25^\circ\text{C}$.

La figure (II.10) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension qui montre que la puissance maximale que peut produire un générateur PV correspond généralement à une tension plus au moins constante qui représente la tension au point de la puissance maximale.

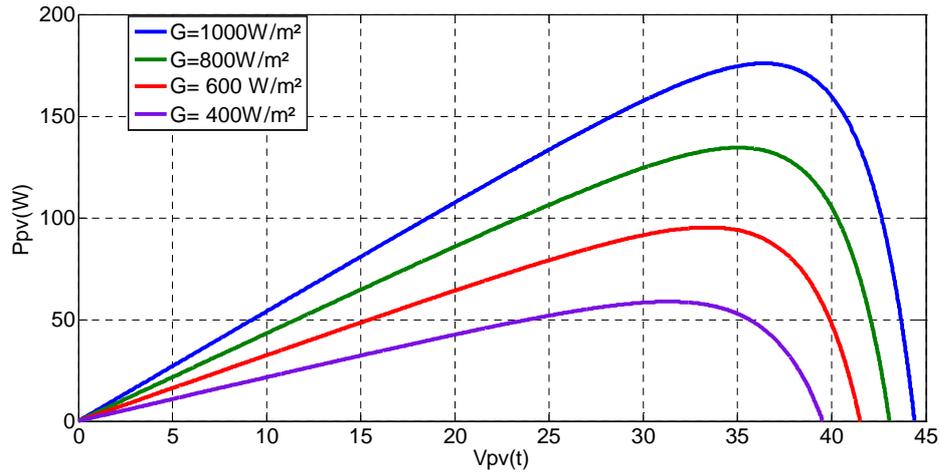


Figure (II.10) : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G= 1000, 800, 600, 400 \text{ W/m}^2$) et $T_c= 25^\circ\text{c}$.

II.2.2.1.2.2 Influence de la température

Le deuxième paramètre qui a une influence directe sur la caractéristique (I-V) est la température, les résultats obtenus par simulation sont présentés sur la figure (II.11). Il est à noter que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée.

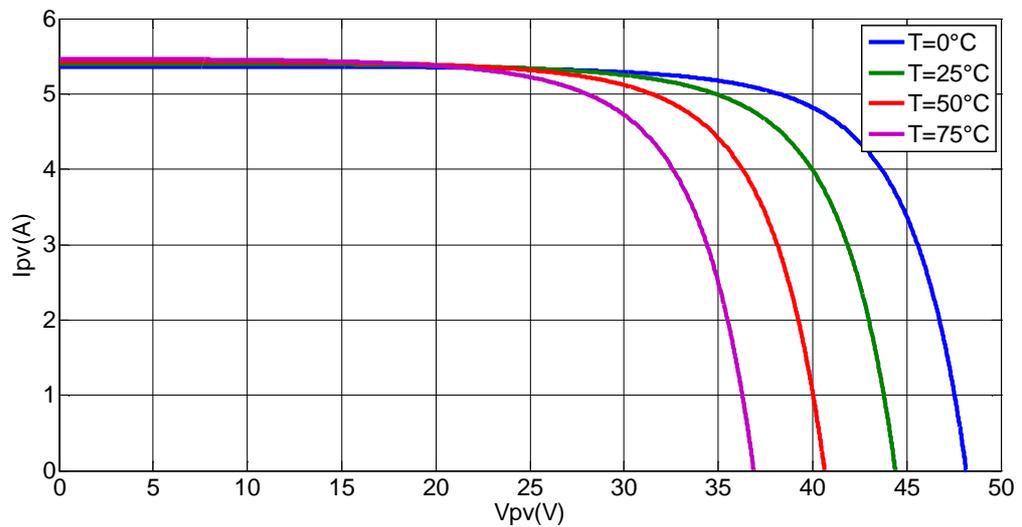


Figure (II.11) : Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque pour une variation de température ($T_c= 0, 25, 50, 75^\circ\text{c}$) et $G= 1000 \text{ W/m}^2$

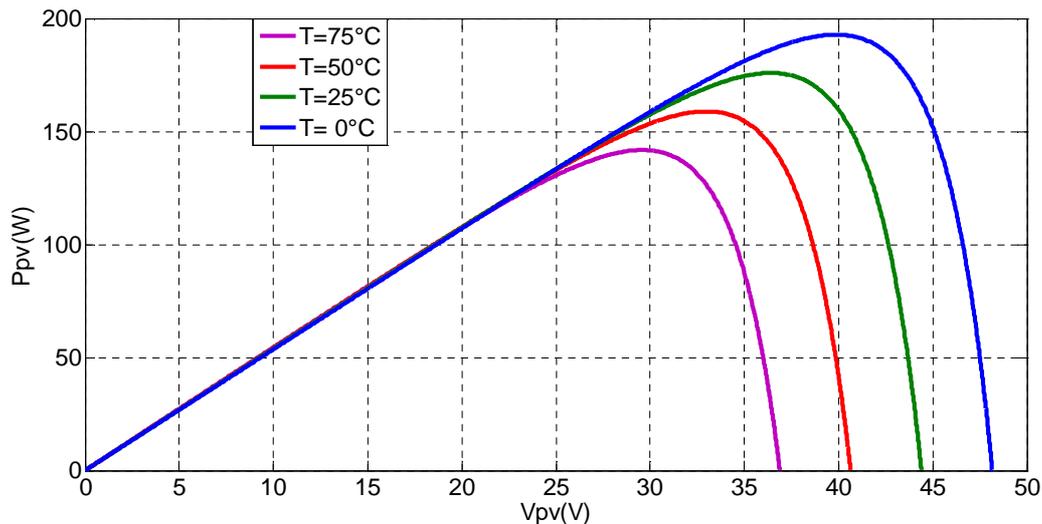


Figure (II.12) : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0, 25, 50, 75^\circ\text{c}$) et $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$.

La température a donc une influence non négligeable sur la puissance du générateur PV. Une diminution de la puissance peut être remarquée quand la température augmente. La figure (II.12) montre la caractéristique puissance-tension pour différentes température

II.2.2.2. Modèle d'un hacheur survolteur

Un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle.

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est par nature difficile. En effet, coté source, pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Coté charge, que ce soit de nature continue (DC). Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source - charge. Le convertisseur utilisé est un hacheur survolteur, son schéma électrique est présenté dans la figure (II.13) [25].

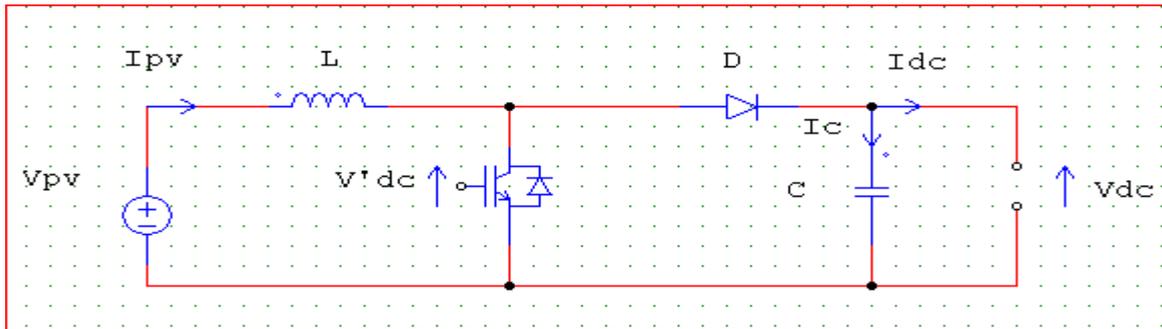


Figure (II.13): hacheur survolteur

Les relations utilisées pour le dimensionnement sont les relations classiques entre la tension de sortie et celle d'entrée et le rapport cyclique :

$$V_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} V'_{pv} \tag{II .29}$$

Une relation analogue lie la valeur moyenne du courant dans l'inductance au courant de sortie:

$$I_{Lmoy} = I_{pv} = \frac{I_{dc}}{1-\alpha} \tag{II .30}$$

II.2.3 Modélisation d'un système du stockage

II.2.3.1. Le modèle électrique simple de la batterie

Le modèle électrique simple comprend une *fem* E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s) [31].

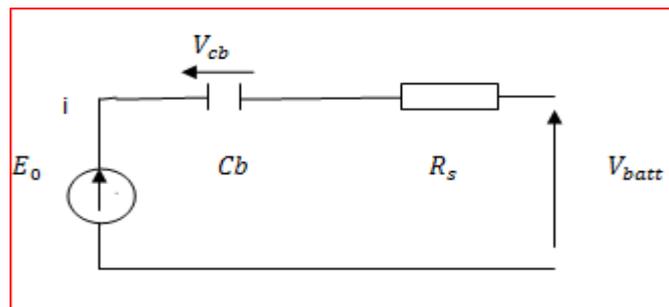


Figure (II.14) : Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{cb} \tag{II .31}$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \tag{II .32}$$

Avec (C_{batt}) la capacité (Ah) nominale de la batterie et (Q_d) la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} .

II.2.3.2. Le convertisseur Buck - Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (3.12). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \tag{II.33}$$

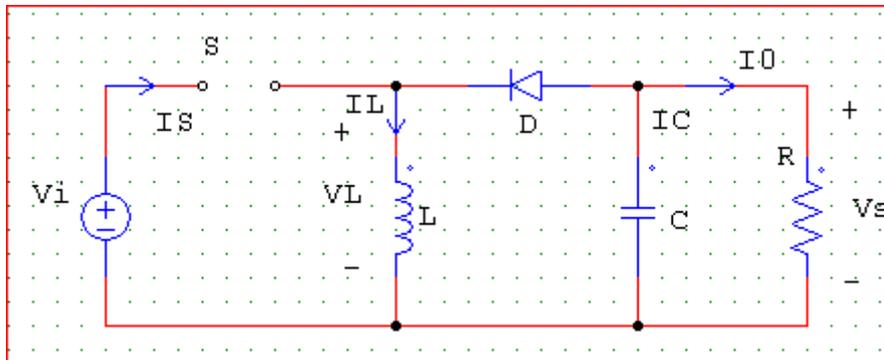


Figure (II.15) : Hacheur survolteur-dévolteur

II.2.4. Modèle de bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

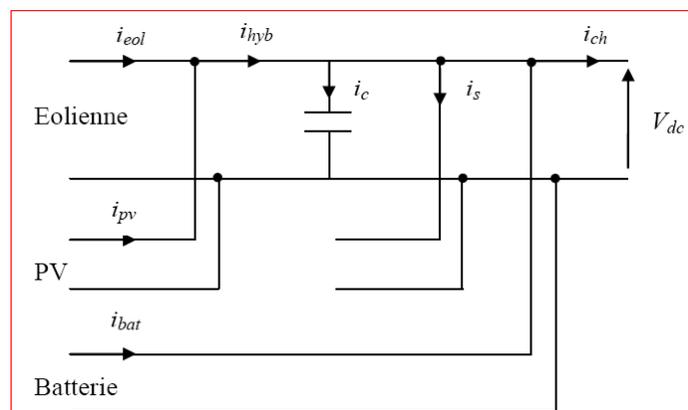


Figure (II.16): Bus continue

Avec :

$$i_{hyb} = i_{eol} + i_{pv} \quad (\text{II.34})$$

$$i_{ch} = i_{hyb} + i_c - i_s \pm i_{bat} \quad (\text{II.35})$$

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.36})$$

i_{pv} : Courant fournie par le générateur photovoltaïque.

i_{eol} : Courant fournie par le système éolien.

i_c : Courant qui traverse la capacité.

i_{hyb} : Courant produit par le système hybride éolien- photovoltaïque.

i_s : Courant de délestage.

i_{bat} : Courant de la batterie

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne (génératrice et redresseur commandé), et de la chaîne de conversion photovoltaïque (panneau photovoltaïque, le hacheur parallèle) et on a présenté les différentes caractéristiques du module solaire lors des variations des conditions météorologique ainsi la modélisation de la batterie en plomb acide.

Chapitre III

Commande et dimensionnement d'un système hybride

III.1 Introduction

Les méthodes d'évaluation des systèmes hybrides éolien/photovoltaïque autonomes et leurs avantages se sont beaucoup développées ces dernières années

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs primordiaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique.

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes, le coût de stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances. Minimiser le coût de stockage et réduire sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éoliens et photovoltaïque [28].

Dans ce chapitre, on définit les différents besoins de la maison dans le but de faire le dimensionnement et l'optimisation du système hybride (photovoltaïque –éolien)

III.2 Dimensionnement d'un système hybride

Le dimensionnement d'un système hybride s'effectue comme suit :

- Le choix d'un profil de consommation d'énergie électrique représentatif du site (besoins de la maison).
- Choix de l'éolienne.
- Détermination de la taille du générateur photovoltaïque.
- Dimensionnement du système de stockage.

III.2.1 Présentation du site : [7]

Pour cette étude, une localisation géographique est considérée : Bejaia, située au nord de l'Algérie.

Coordonnées du site :

- Latitude : 36 .45 Nord.
- Longitude : 005.04 Est
- Altitude : 2m
- Temps : GMT + 01 :00



Figure (III.1) : Présentation du site de Bejaia.

III.2.2 Analyse du potentiel énergétique solaire et éolien à Bejaia

L'irradiation solaire moyenne journalière de la région de Bejaia est de $2.2 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{jour}$. Ce potentiel est assez important et il est pratiquement exploitable durant toute l'année.

Les performances des panneaux photovoltaïques sont directement liées aux données climatiques qu'est en principe l'irradiation solaire. Pour un profil de charge donné, la taille du système augmente quand la ressource climatique est faible.

De même pour le gisement éolien, On peut constater que notre site est soumis à une vitesse de moyenne de vent de l'ordre 3.97 m/s .

Vu la complémentarité de ces ressources, on peut dire que le couplage d'un système photovoltaïque et éolien s'avère très intéressant pour assurer la production d'énergie électrique durant toute l'année. [7]

III.2.3 Détermination du profil de charge

La maison fait partie d'une région rurale isolée non raccordée au réseau de distribution d'énergie classique qui est occupée en permanence durant toute l'année.

III.2.3.1 Besoins électriques domestique

La maison est équipée de l'ensemble des appareils permettant de fournir le confort aux occupants. Le nombre d'heures de consommation est déterminé en fonction de l'heure du lever et du coucher du soleil. Le nombre d'heures d'éclairages dépend des heures du lever et du coucher des membres de la famille. Par ailleurs, on suppose que le lever et le coucher respectifs des occupants de la maison s'effectuent en moyenne à 6 h du matin et à 23h du soir.

Afin de consommer le minimum d'énergie et de réduire autant que possible la taille du système photovoltaïque et éolien, on choisit les appareils de faibles consommation. L'estimation de l'énergie journalière consommée par les différents équipements électroménagers et l'éclairage sont présentes sur le tableau suivant :

Tableau 01 : Estimation des besoins énergétiques journalier.

| | | Puissance (W) | Durée d'utilisation (h /j) | Consommation journalière (Wh) |
|--|------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Éclairage (fluorescence Compacte à 15W) | Chambre d'adulte | 15 | 3 (été) /4(hiver) | 45/60 |
| | Chambres d'enfants | 30 | 3 (été) /5(hiver) | 90/150 |
| | Salle de séjour | 15 | 4 (été) /8(hiver) | 60/120 |
| | Couloir | 30 | 2 (été) /3(hiver) | 60/90 |
| | Salle de bain | 15 | 1 (été) /1(hiver) | 15/15 |
| | Toilette | 15 | 1/2 (été) /1/2(hiver) | 7.5/7.5 |
| | Cuisine | 15 | 5 (été) /9(hiver) | 75/135 |
| Équipements | Réfrigérateur (69L-111L) | 70 | 10 (été) /8(hiver) | 700/560 |
| | Téléviseur (LCD 32 pouce) | 50 | 5 (été) /6(hiver) | 250/300 |
| | Climatiseur (9000 Btu) | 980/1190 | 8 (été) /3(hiver) | 7840/3570 |
| | Lave-linge | 180 | 1 (été) /1(hiver) | 360/360 |
| | Divers | 70 | 2(été) /2(hiver) | 140/140 |
| | | | Total E_{CJ} | 9642.5/5507.5 |

L'énergie est le produit de la puissance par le temps ;

$$E \left(\frac{Wh}{j} \right) = P(W) \cdot t \left(\frac{h}{j} \right) \quad \text{(III.1)}$$

E : C'est la consommation journalière en $\left(\frac{Wh}{j} \right)$

t : C'est la durée d'utilisation par jour en heure $\left(\frac{h}{j} \right)$

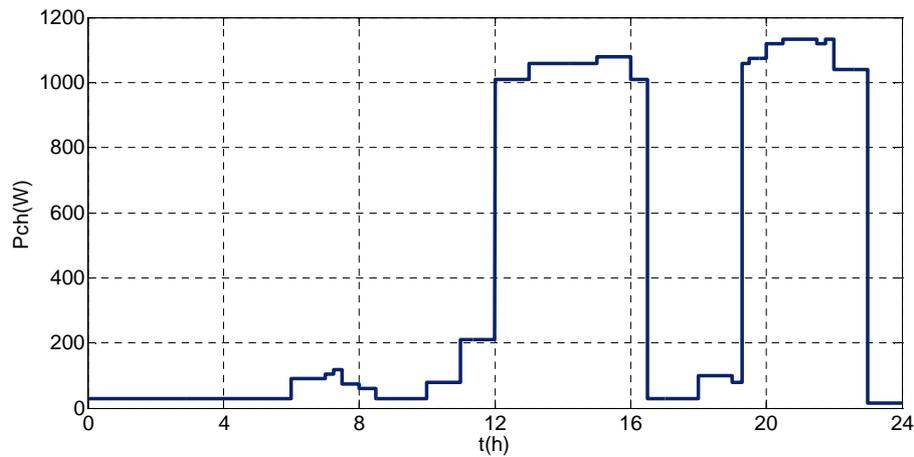


Figure (III.2) : Le profil de charge pendant l'été.

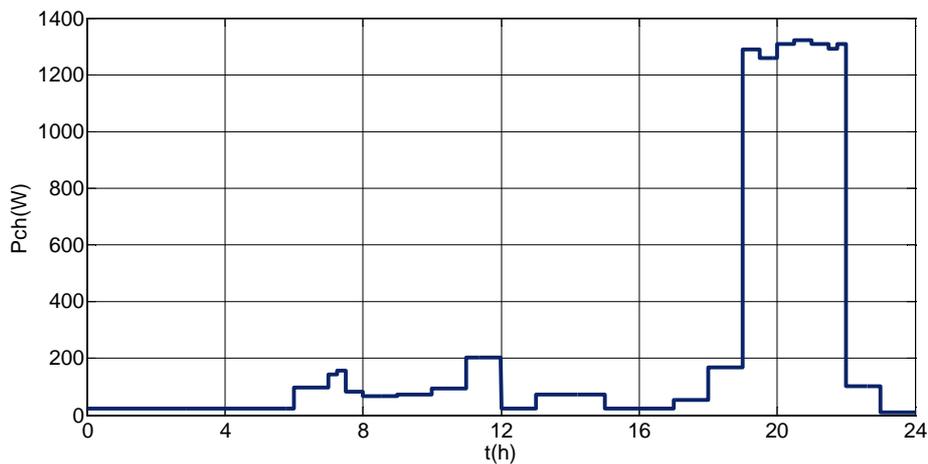


Figure (III.3) : Le profil de charge pendant hiver.

III.2.4 Dimensionnement d'un système photovoltaïque et éolien

III.2.4.1 Dimensionnement du générateur éolien

Pour dimensionnement d'une éolienne, on fait notre choix à partir de la vitesse du vent sur notre site, ainsi les caractéristiques des éoliennes sur le catalogue donné par les constructeurs.

Pour le dimensionnement de la central hybride ; on s'est basé sur la vitesse critique du vent dans le site étudié et on a calculé la puissance récupérée à partir de cette vitesse vaut $4742.5 W$, ce qui représente 49.2% de la demande journalière de notre consommateur et le reste sera assuré par le générateur photovoltaïque qui représente la puissance de l'ordre $4900W$.

III.2.4.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

- **Nombre des panneaux photovoltaïques**

$$N_{pv} = \frac{P_{pv}}{P_{pv,u}} \tag{III.2}$$

Avec :

N_{pv} : Nombre des panneaux photovoltaïques

P_{pv} : Puissance du générateur photovoltaïque.

$P_{pv,u}$: Puissance unitaire d'un module photovoltaïque,

- **Détermination du nombre de modules en série**

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivante :

Avec :

$$N_{PV.s} = \frac{V_L}{V_m} \tag{III.3}$$

Avec :

V_L : La tension nominale de la charge.

V_m : La tension nominale du module.

$N_{pv s}$: Nombre de modules en série.

- **Détermination du nombre de modules en parallèle :**

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante :

$$N_{PV,p} = \frac{I_L}{I_m} \tag{III.4}$$

$N_{PV,p}$: Nombre de modules en parallèle.

I_L : Le courant nominal de la charge.

I_m : La tension nominale du module.

D'après ces calcul on trouve que le générateur photovoltaïque est composé de quatre branches en parallèles dont chacune contient sept panneaux en séries.

III.2.5 Dimensionnement des batteries de stockage

Le dimensionnement de la batterie consiste à calculer le nombre de batteries nécessaires pour un système d'énergie hybride permettant de s'affranchir des variations climatiques temporaires. Cela dépend principalement des jours d'autonomie souhaitée, de la profondeur maximale de décharge de la batterie et la température atmosphérique. Pour calculer la capacité des batteries de stockage on la détermine à partir de la charge demandée maximale, $E_{l,m,Max}$ (charge mensuelle maximale). Elle est exprimée par [7] :

$$C_{batt,tot} = \frac{E_{ch}}{R_c \cdot u_{batt} \cdot PDD \cdot N_m} N_j \quad (III.5)$$

N_j : Le nombre de jour d'autonomie des batteries (02 jour).

R_c : Le rendement de la batterie égal 0.9.

U_{batt} : La tension nominale de la batterie est égale à 12v.

PDD : La profondeur de décharge des batteries 0.8.

Le nombre de batteries à retenir est déterminé à partir de la capacité d'une unité de batterie C_{batt} , en prenant la valeur entière du rapport par excès.

$$N_{batt} = ENT \left[\frac{C_{batt,tot}}{C_{batt}} \right] \quad (III.6)$$

D'après les calculs de la capacité des batteries de stockage on trouve que :

$C_{batt,tot} = 2231.929 \text{ Ah}$ donc on va utiliser 9 batteries de capacité 256 Ah chacune mise en parallèle.

III.3 Les commande applique pour notre système

III.3.1 Les MPPT qui s'appliquent pour les systèmes

III.3.1.1 Pour système éolien

Commande MPPT avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

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

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

$$\lambda = \frac{R.\Omega_t}{V_v} \quad (III.7)$$

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot s \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \quad (III.8)$$

$$T_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} \implies T_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^2 \quad (III.9)$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (III.9) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$T_{t-ref} = K_{opt1} \cdot \Omega_t^2 \implies T_{em-ref} = \frac{T_{t-ref}}{G_m} = \frac{K_{OPT1} \cdot \Omega_t^2}{G_m} \cdot \frac{G_m^2}{G_m^2} = \frac{K_{opt1}}{G_m^3} \cdot \Omega^2 \quad (III.10)$$

$$T_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega^2 \quad (III.11)$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{pmax} \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3 \cdot G_m^3} \quad (III.12)$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple , à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape k, détermine le couple de référence dans l'étape k+1 de la façon montrée sur la figure (III.4)

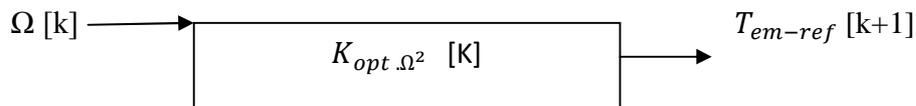


Figure (III.4) : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

A chaque pas de calcul cette opération permet de converger vers le point optimal. La mesure de la vitesse de rotation Ω_1 engendre le calcul du couple $T_{em-ref1}$. Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromécanique de la génératrice ;

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = T_{em} - T_t \quad (III.13)$$

Par l'action de ce couple la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique (III.13) pour atteindre au pas de calcul suivant la vitesse Ω_1 ou de nouvelle consigne du couple sera calculée. Après quelques itérations $T_{em-ref} [k+1] = T_{opt}$ et Ω_{opt} est alors atteint et correspond à la puissance optimale P_{opt} .

II.3.1.1 Pour système photovoltaïque

Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} volontairement (augmenter ou diminuer) avec une constante C et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. Si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé . Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{pv-PPM} ceci cause alors une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémention de la perturbation. Si ce pas d'incrémention est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

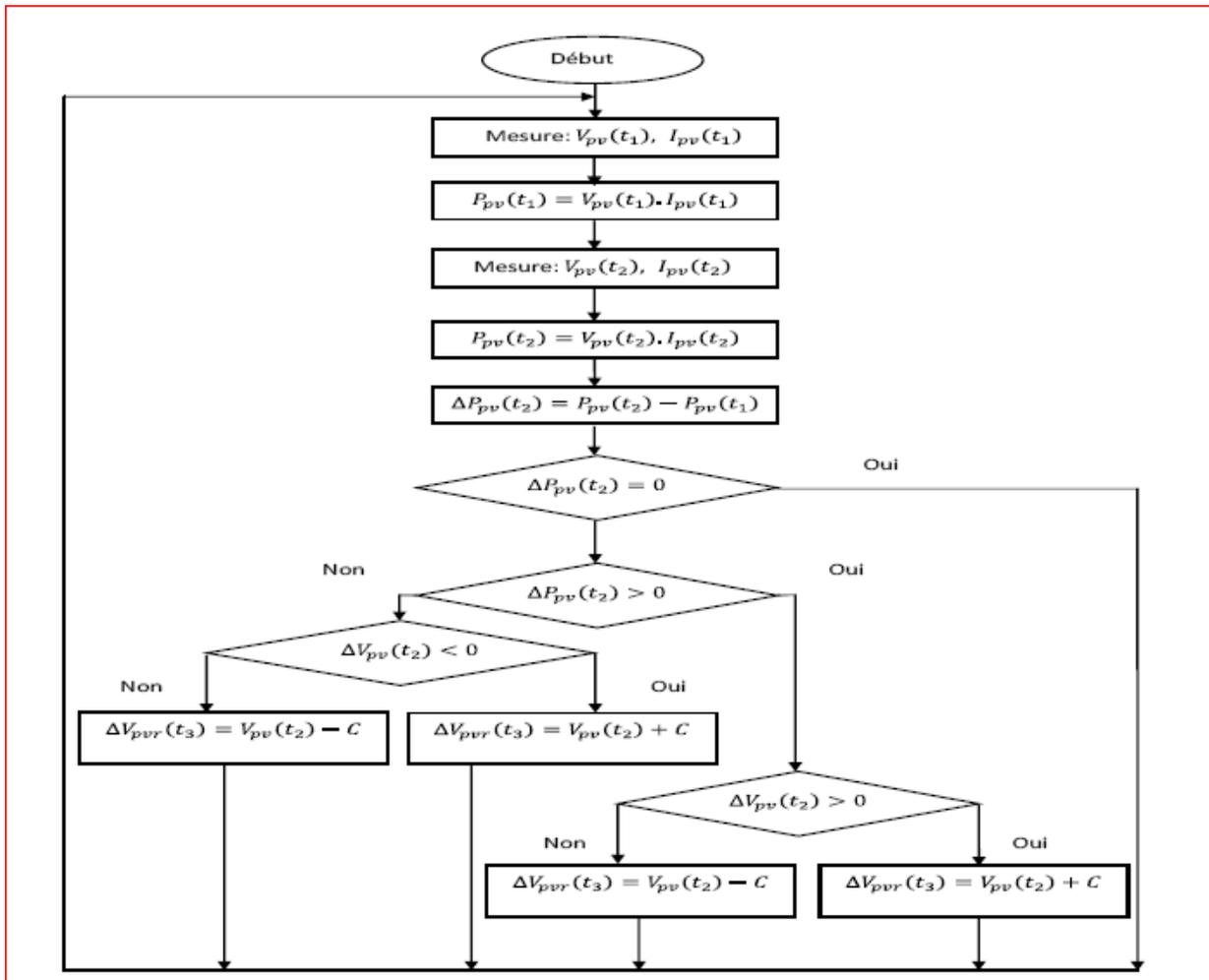


Figure (III.5) : Organigramme de la méthode de perturbation et d’observation (p&o).

III.4 La commande vectorielle utilisée

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

$$T_{em} = p \cdot M \cdot (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \tag{III.14}$$

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

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

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

Nous avons prie que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère d-q comme suit :

$$T_{em} = \frac{P.M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{III.15})$$

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

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

$$T_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot i_{qs} \quad (\text{III.16})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (\text{III.17})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \cdot \Phi_r \quad (\text{III.18})$$

A partir de la relation (III.17), on obtient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = - R_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.19})$$

A partir de la relation (III.18), on obtient :

$$\Phi_r = - \frac{R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \quad (\text{III.20})$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer Φ_r mesure le couple électromagnétique et calculer la pulsation statorique ω_s .

On a:

$$\phi_{rd} = M. i_{ds} + L_r . i_{rd} = \phi_r \implies i_{rd} = \frac{\phi_r - M.i_{ds}}{L_r} \quad (\text{III.21})$$

$$\phi_{rq} = M. i_{sq} + L_r . i_{rq} = 0 \implies i_{rq} = \frac{-M . i_{qs}}{L_r} \quad (\text{III.22})$$

On remplace (III.21) dans (III.22) on obtient:

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r \left(\frac{\phi_r - M . i_{ds}}{L_r} \right) \implies \frac{L_r}{R_r} . \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r = M. i_{ds} \quad (\text{III.23})$$

Donc :

$$\phi_r = \frac{M . i_{ds}}{1 + T_r . s} \quad (\text{III.24})$$

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

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

T_r : Constante de temps rotorique ;

S : opérateur de dérivation ;

Dans l'équation (III.20), on remplace i_{rq} par sa valeur en (III.22). Ce qui donne :

$$w_r = \frac{M . i_{sq}}{\phi_r . T_r} + p . \Omega \quad (\text{III.26})$$

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné les différents composants du système hybride pour alimenter une charge à usage domestique, et cela en se basant sur les paramètres de notre panneau photovoltaïque et de la turbine étudiée et on a donné quelque notion sur les commandes utilisées dans le système.

Chapitre IV

Gestion de l'énergie du système hydride (photovoltaïque –éolien) avec stockage

IV.1. Introduction :

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

Pour ce faire nous avons conçu un algorithme qu' on a implanté sous Matlab-Simulink qui trait les différentes situations possible auxquelles nous sommes appelés à être confrontés.

VI.2 . Organigramme de gestion d'énergie

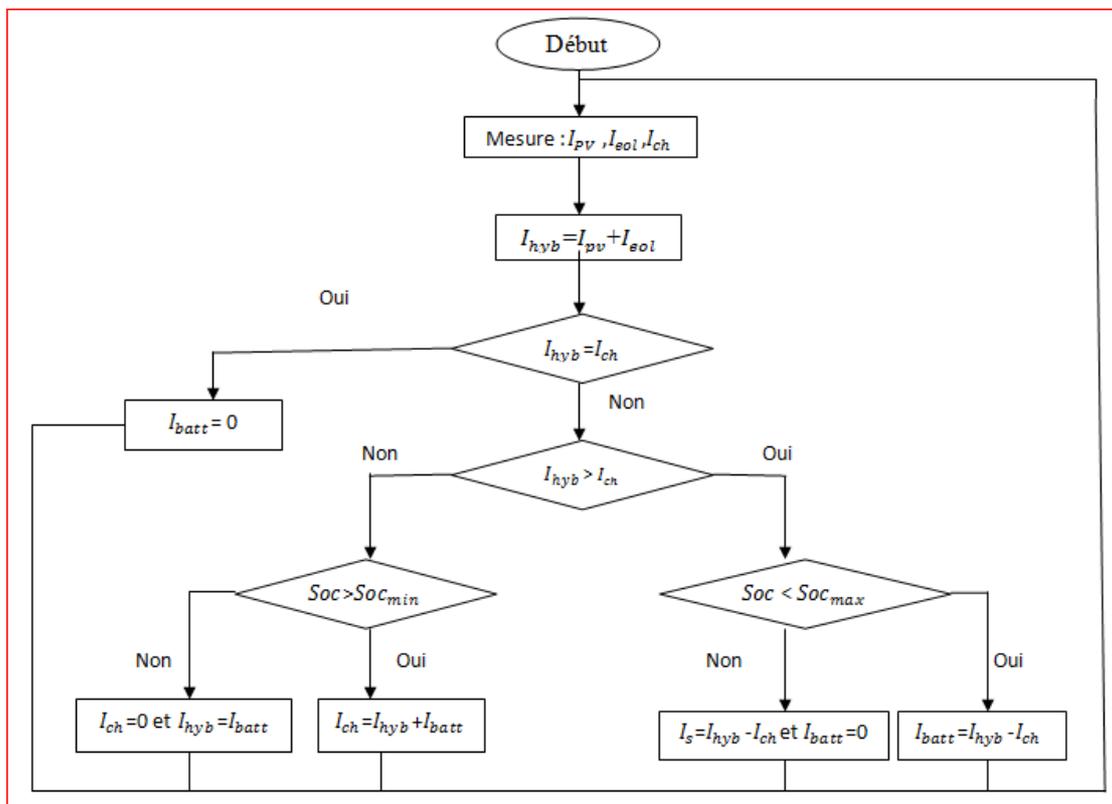


Figure (VI.1) : Organigramme de gestion d'énergie dans le système global.

IV.3. Simulation du système global

On a réalisés une simulation pendant une journée d’été et d’une journée d’hiver, afin de montrer l’efficacité de l’algorithme de gestion dans les différents cas possible ; on fait varier le profil de la charge qui combine 05 maisons identique, ainsi que la vitesse de vent et de l’ensoleillement dans les conditions atmosphérique variable.

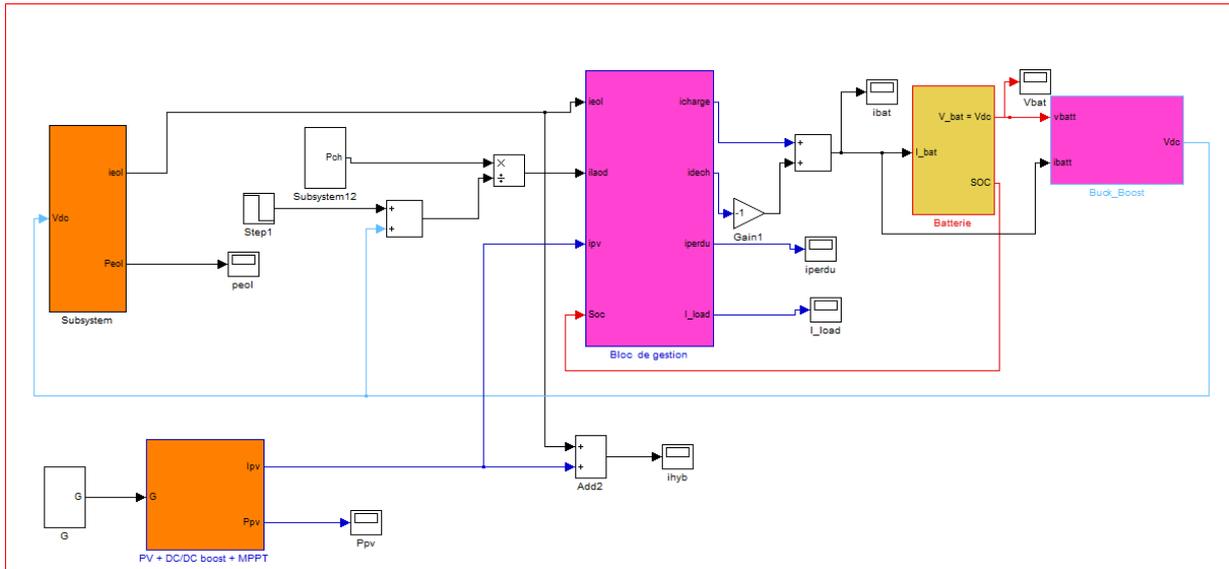


Figure (IV.2) : Schéma bloc de simulation global.

Les profils du vent, d’ensoleillement et de la charge utilisés pour la simulation pour les deux journées (journée d’été – journée d’hiver) sont comme suit :

Pour une journée d'été :

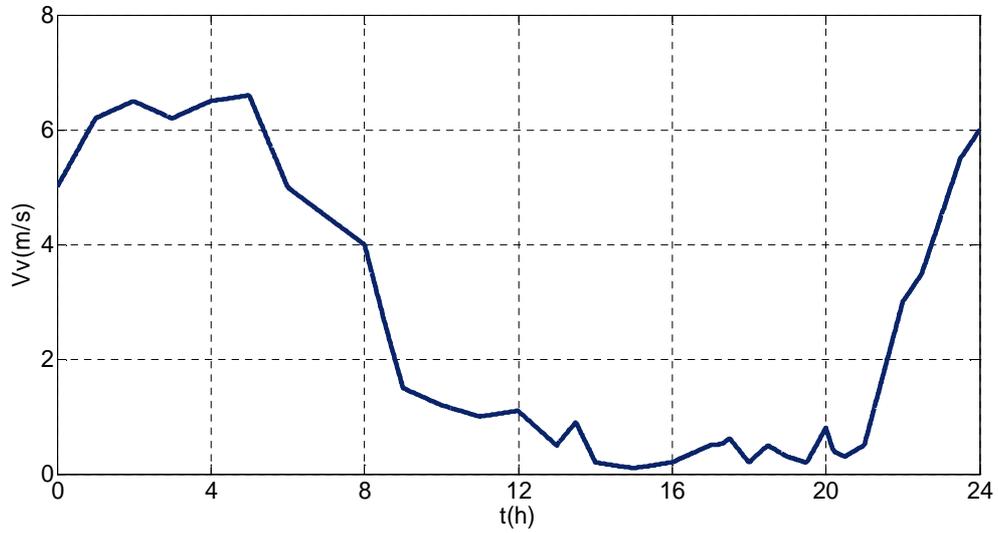


Figure (IV.3) : Profil de la vitesse de vent pour une journée d'été.

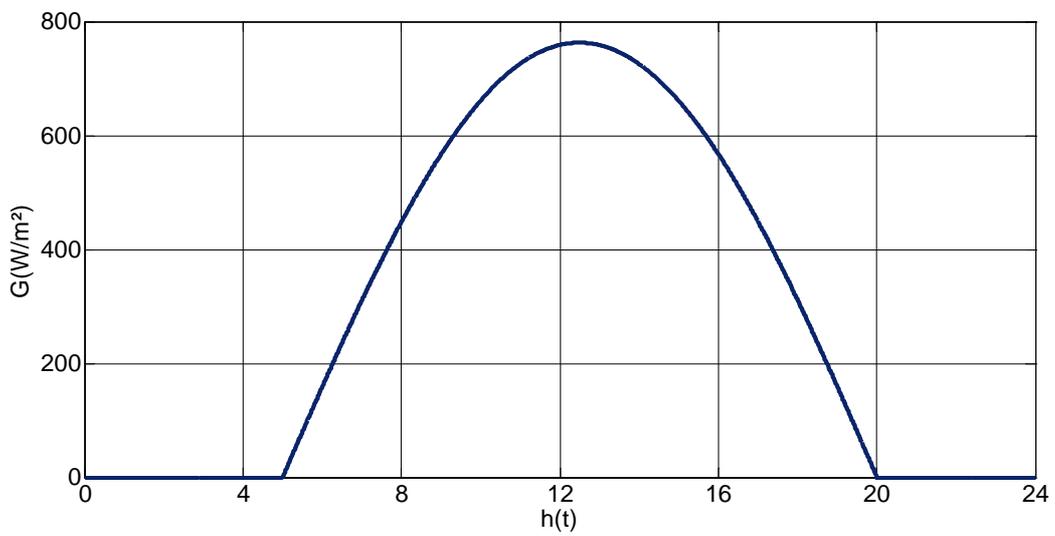


Figure (IV.3) : Profil de l'ensoleillement pour une journée d'été.

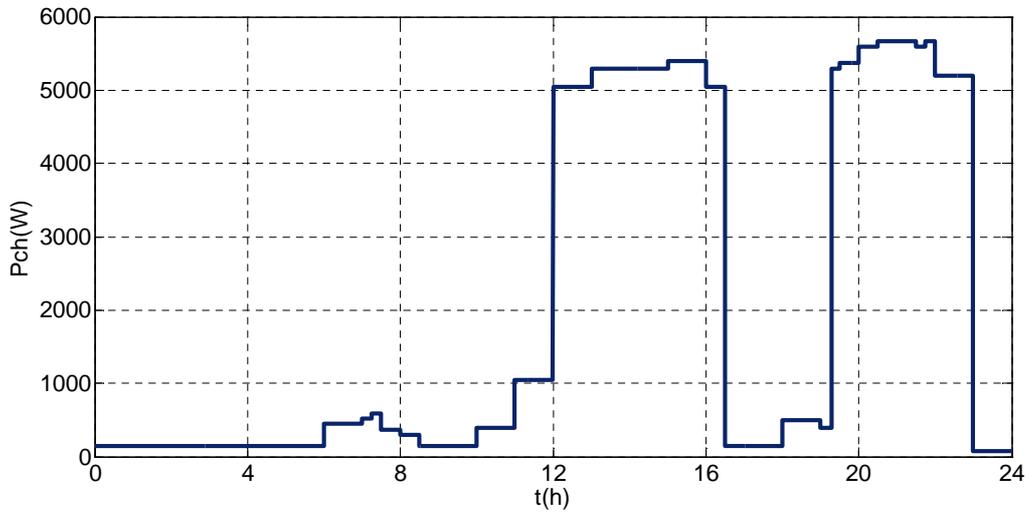


Figure (IV.3) : Profil de charge pour une journée estival.

Pour une journée d'hiver :

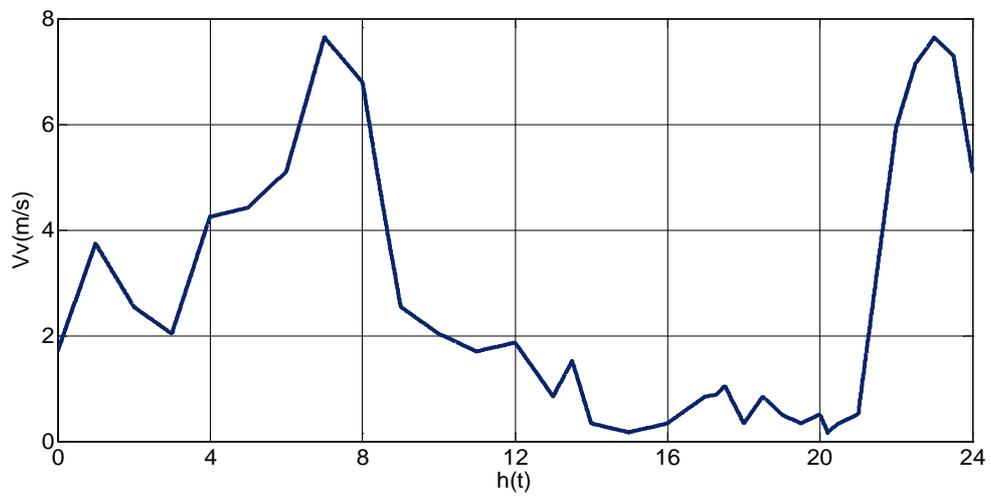
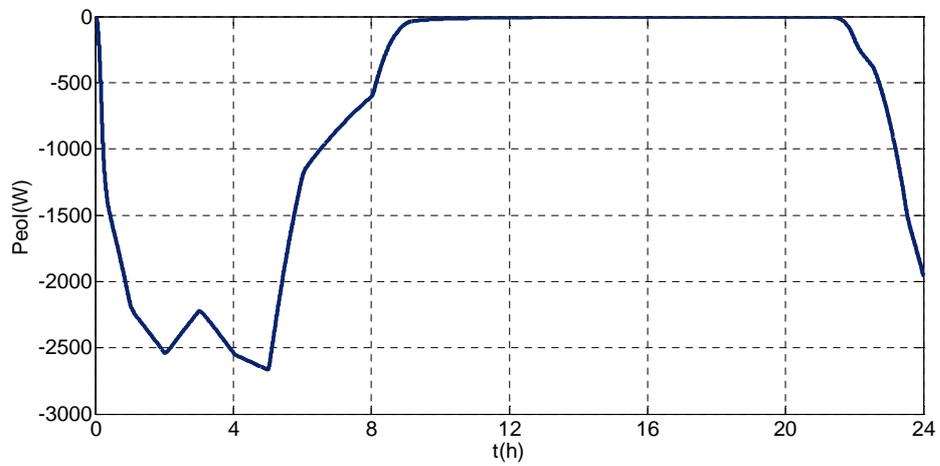
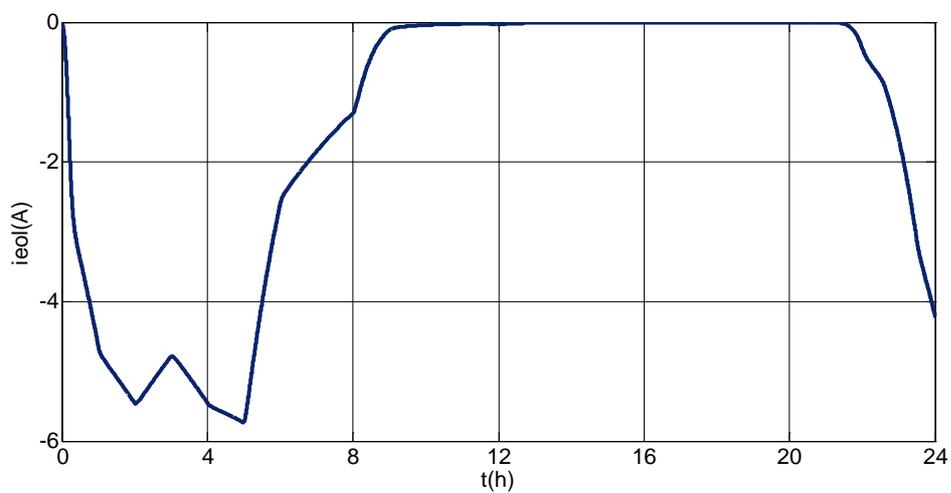


Figure (IV.6) : Profil de vent pour une journée d'hiver.



Figure(IV.9) : Puissance fournie par le système éolien.



Figure(IV.10) : Courant fournie par le système éolien

La figure (IV.11) montre que le flux rotorique est bien régulé et elle reste insensible aux variations de la vitesse du vent.

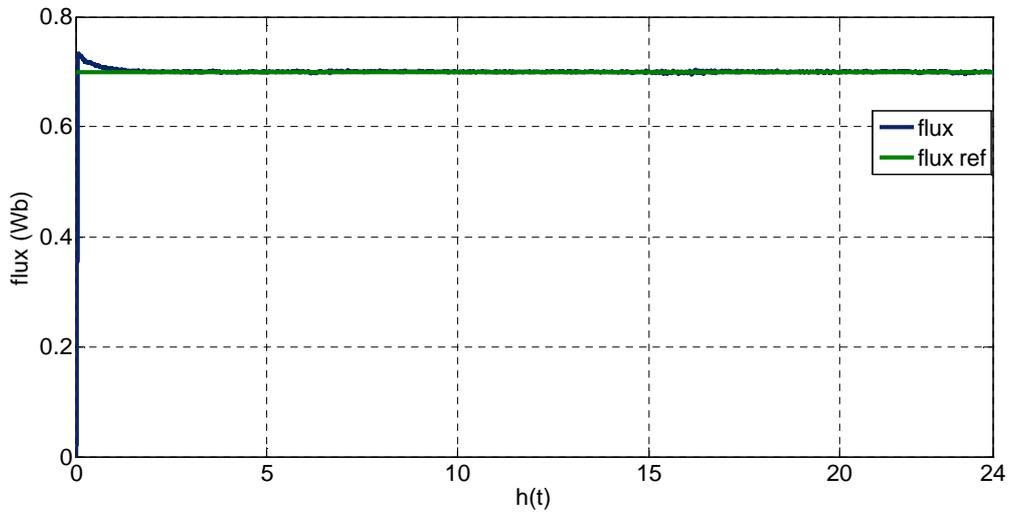


Figure (IV.11) : Flux rotorique.

La figure (IV.12) montre que le couple électromagnétique est négatif et cela indique que le fonctionnement est en mode génératrice et le couple s'adapte avec les variations de la vitesse selon la puissance fournie.

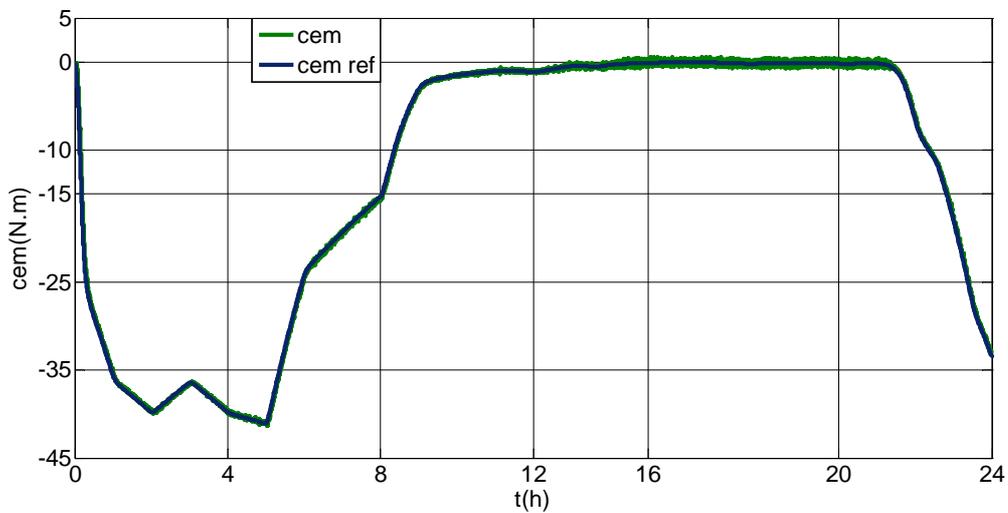


Figure (IV.12): Couple électromagnétique.

La figure (IV.13) montre l'évolution des courants I_{sd} et I_{sq} . On remarque que le courant I_{sd} est bien régulé et insensible aux variations de la vitesse. Le courant I_{sq} suit dans son évolution l'allure du couple électromagnétique.

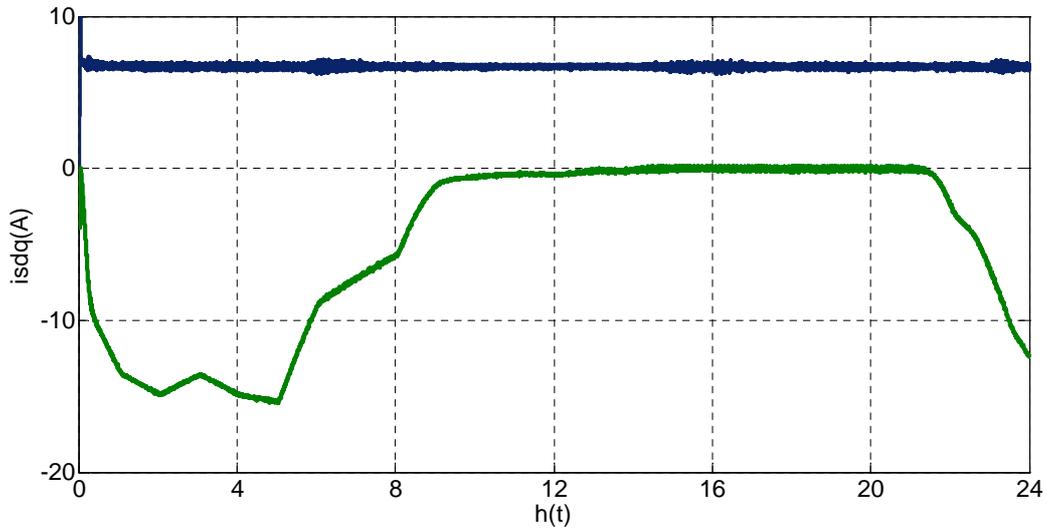


Figure (IV.13) : Courant I_{sd} et I_{sq} .

Les figures (IV.14), (IV.15) représentent la puissance et le courant débité par le générateur photovoltaïque.

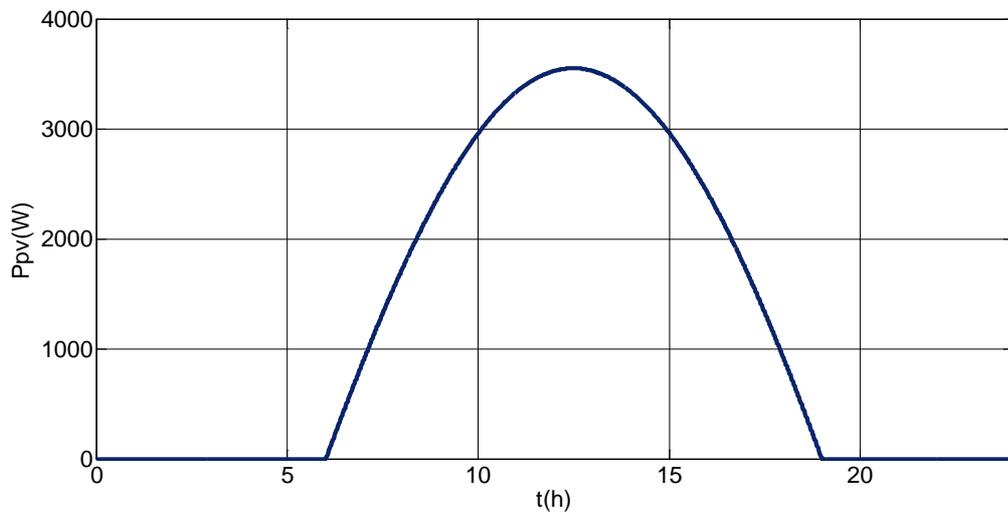


Figure (IV.13) : Puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

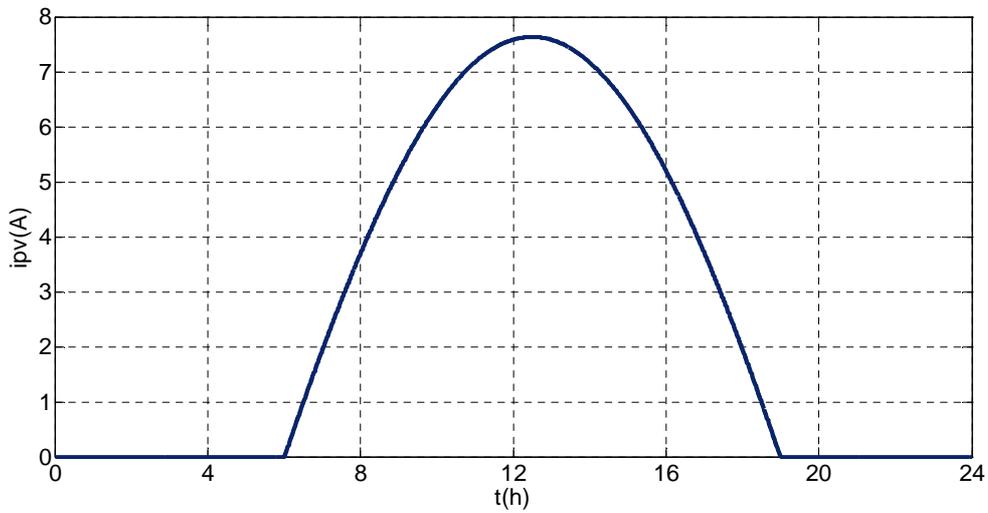


Figure (IV.15) : Courant fournie par le générateur photovoltaïque

Les figures (IV.16), (IV.17) représentent le la puissance et le courant de la charge (i_{ch}). On remarque que l'évolution de la puissance de la charge suit celle du courant étant donné la tension du bus continu est gardée constante.

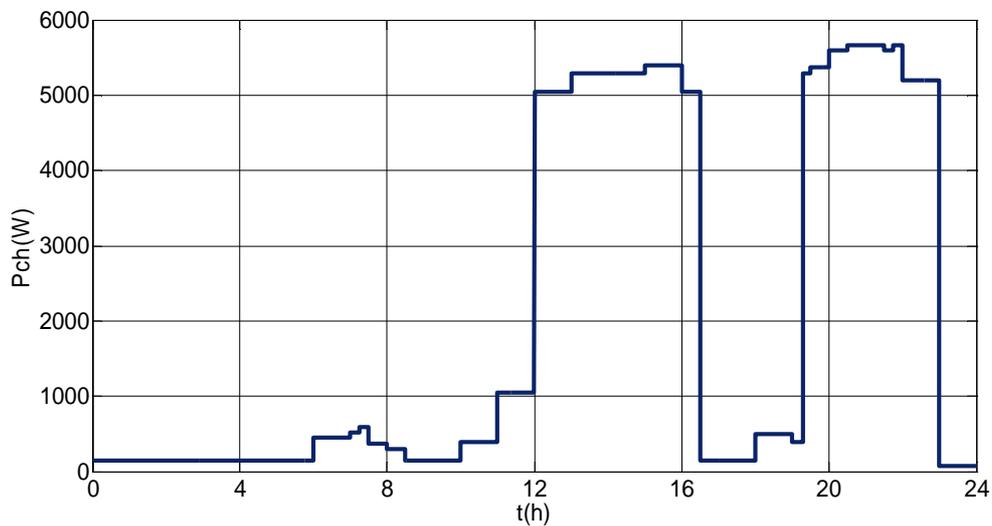


Figure (IV.16) : Puissance demandée par la charge.

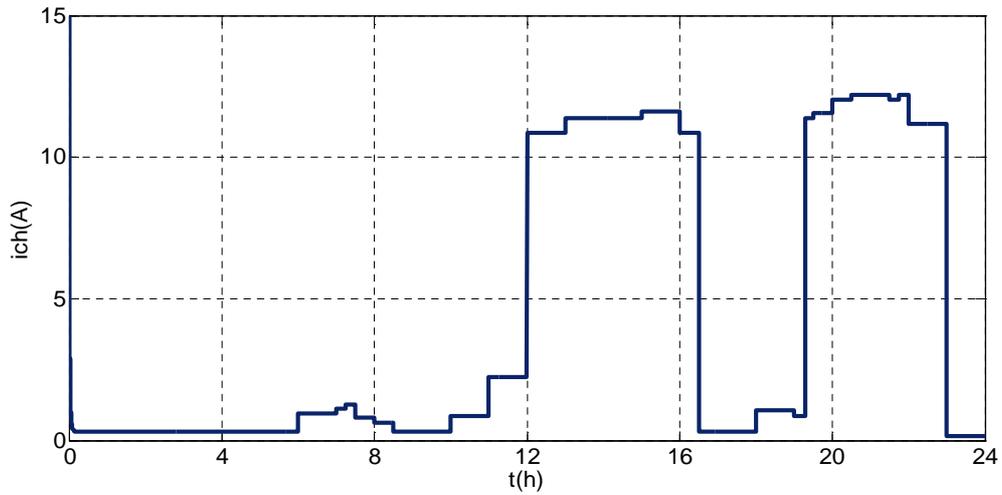


Figure (IV.17) : Courant demandée par la charge.

On remarque dans la figure (IV.18) que l'évolution de courant de la batterie suit l'état de charge. Il est positif lors de la phase de la charge (stockage) et négative lors de la phase de décharge.

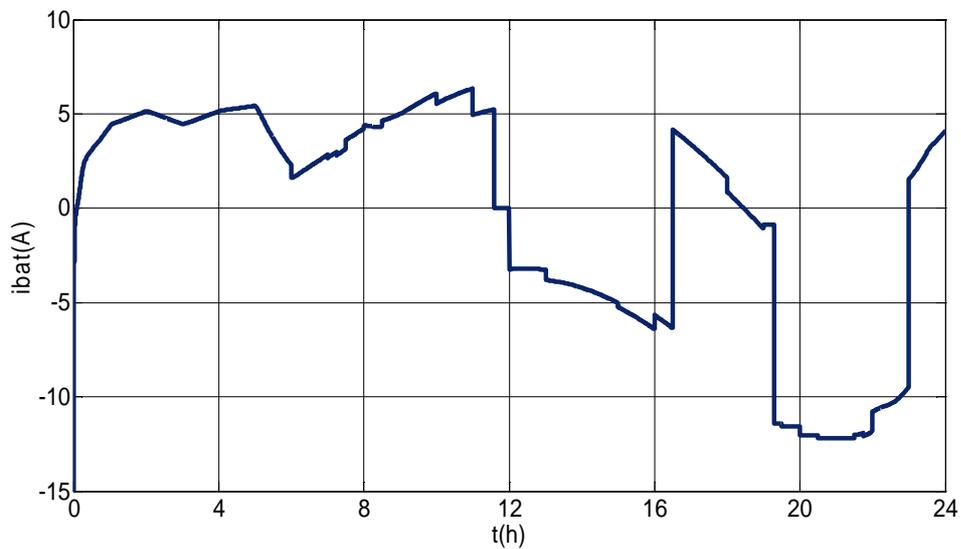


Figure (IV.18) : Courant de la batterie

Les figures (IV.19) et (IV.20) nous représentent l'évolution du SOC et de la tension de la batterie. On remarque que l'évolution de l'état de charge de la batterie est similaire à celle de la tension.

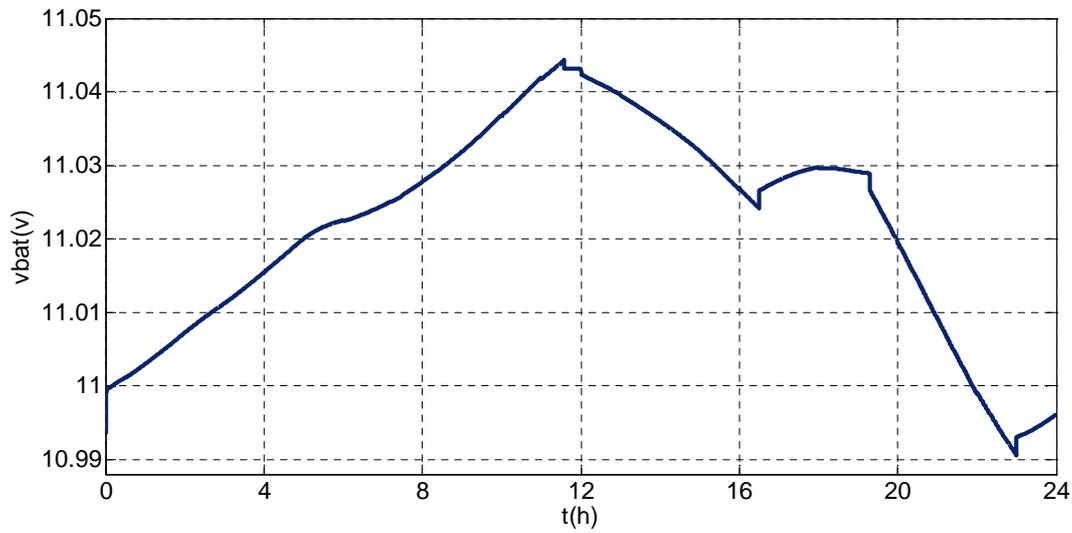


Figure (IV.19) : Tension de la batterie.

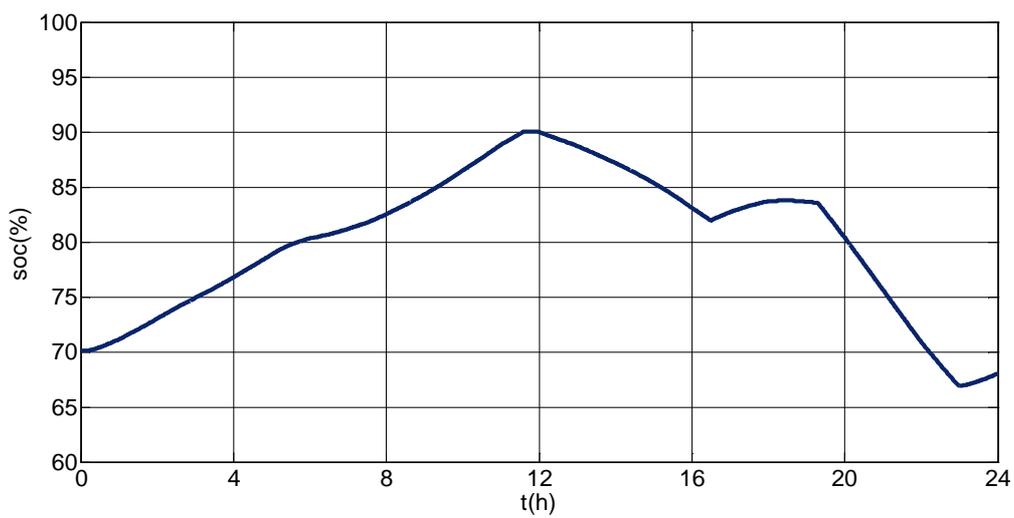


Figure (IV.20) : Etat de charge de la batterie (SOC).

La figure (IV.21) montre le courant de délestage. On remarque que ce courant existe si le courant généré par le système hybride est supérieure à celui demandé par la charge et le $SOC \geq SOC_{max}$.

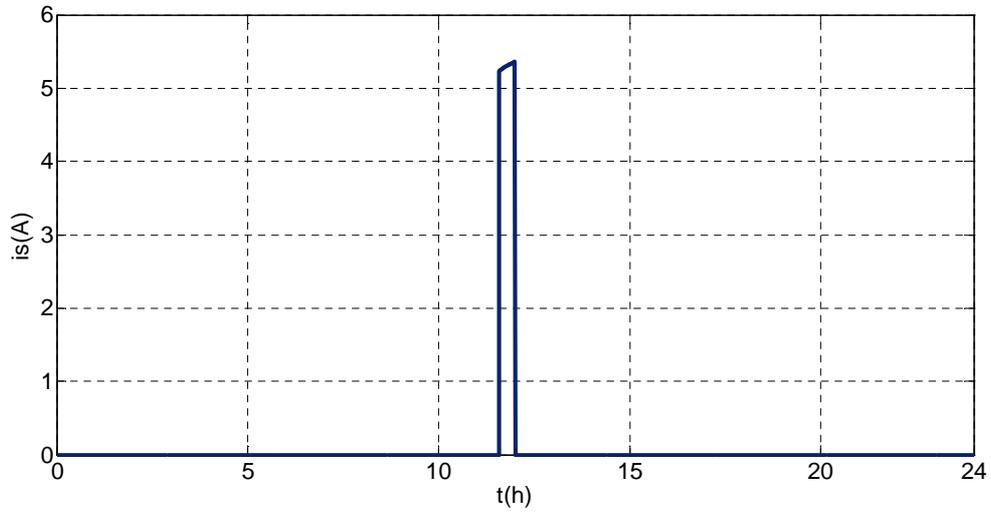


Figure (IV.21) : Courant à dissiper dans une charge dérivative

La figure (IV.22), montre le courant total fourni par le système hybride (i_{hyb}), le courant de la batterie (i_b) et le courant de la charge (i_{ch}).

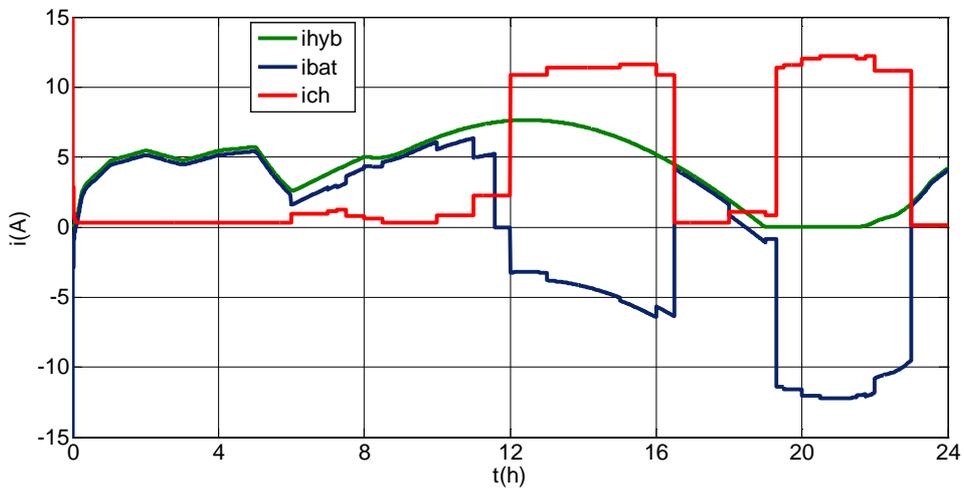


Figure (IV.22): Allure des courants i_{hyb} , i_{ch} i_{bat} .

La figure (IV.23), montre la tension au niveau du bus continue qui gardé constante à sa valeur de référence.

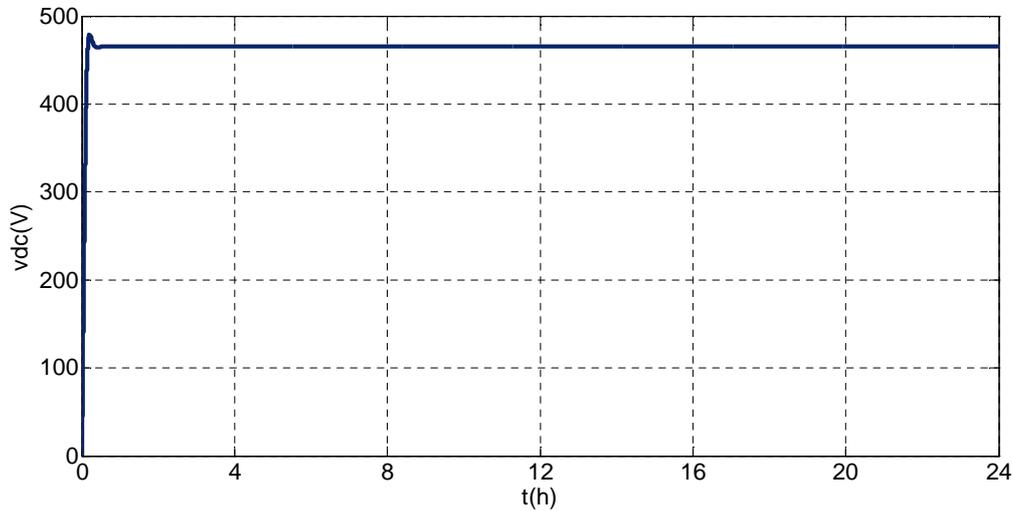


Figure (IV.23): Allure de la tension du bus continue

Synthèse sur fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion :

D'après les figures (IV.21) et (IV.22) des courant et (IV.20) du SOC, (IV.9), (IV.14), (IV.16) de puissance, on peut déduire les interprétations suivantes sur le fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion.

Phase 1 : ($0 < t < 11h\ 50mn$) : on remarque courant fournie par le système hybride est supérieur au courant appelé par charge, on alimente donc le charge et on charge la batterie étant donné le $soc < soc_{max}$

Phase 2 : ($11h\ 50mn < t < 12h$) : on voit que le $soc = soc_{max}$ (Figure IV.20), on considère donc que la batterie est complètement rechargée, et on la déconnecte. La charge est alimentée par le système hybride (Figure IV.22) et le surplus d'énergie (Figure IV.21) est dirigé vers une charge dérivative (délestage)

Phase 3 : ($12h < t < 16h\ 30\ mn$) : courant fourni par le système hybride est insuffisant pour alimenter la charge et puisque le soc est supérieur au soc_{min} donc la batterie va se décharger rapidement (Figure IV.20) et (Figure IV.22) afin de satisfaire la charge.

Phase 4 : ($16h :30 mn < t < 18h : 58mn$) : on remarque courant fournie par le système hybride est supérieur au courant appelé par charge, on alimente donc le charge et on charge la batterie étant donné le $soc < soc_{max}$

Phase 5 : ($18h : 58mn < t < 22h$) : pas de production d'énergie par système et pour cela la batterie va se décharger rapidement afin de satisfaire la charge.

Phase 6 : ($22h < t < 23h$) : système hybride fourni due courant et la puissance de la charge diminue par rapport aux cas précédent, comme le soc est supérieure au soc_{min} la batterie va continue à se

($23h < t < 24h$) : On remarque courant fournie par le système hybride est supérieur au courant appelé décharge lentement pour pouvoir satisfaire la charge

Phase 7 : par charge, on alimente donc le charge et on charge la batterie étant donné le $soc < soc_{max}$.

- **Pour une journée d'hiver**

Les figures (IV.24) et (IV.25) représentent la puissance et le courant générés par le système éolien. On remarque que le courant suit l'évolution de la puissance éolienne et celle de la vitesse du vent.

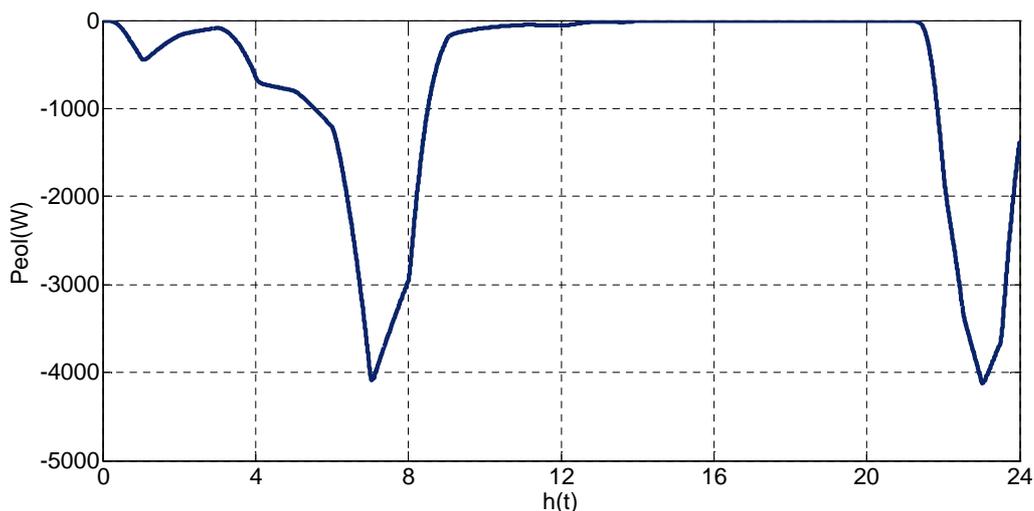


Figure (IV.24): Puissance fournie par le système éolien.

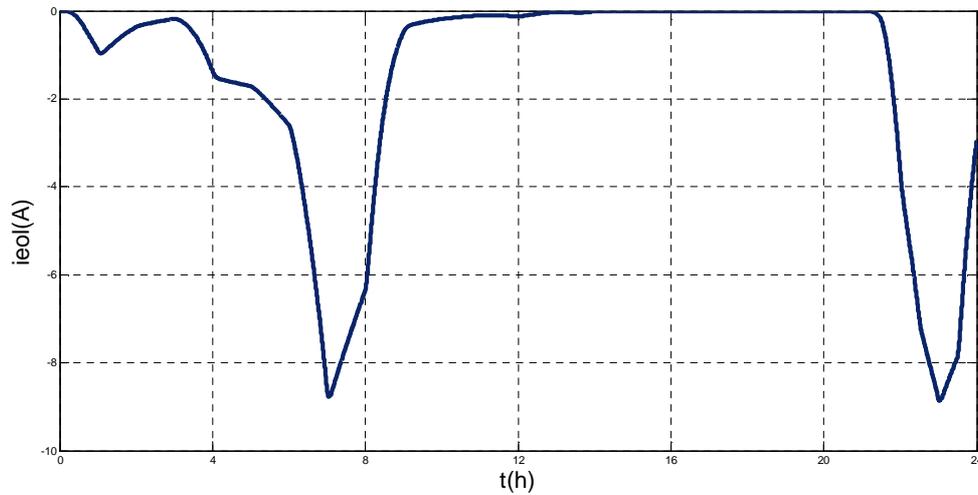


Figure (IV.24): Courant fournie par le système éolien

La figure (IV.26) montre que la grandeur rotorique est bien régulée et elle reste insensible aux variations de la vitesse.

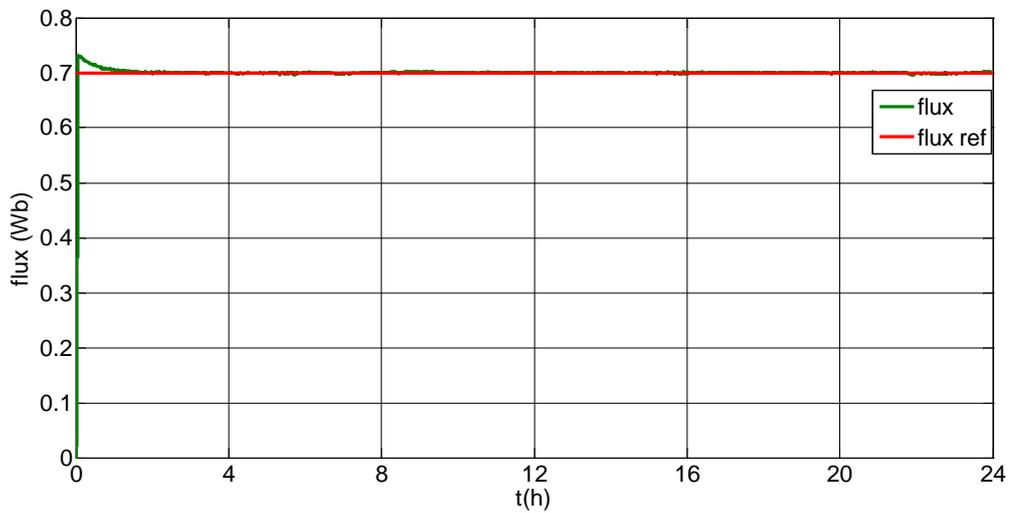


Figure (IV.26) : Flux rotorique.

La figure (IV.27) montre que le couple électromagnétique est négative et cela indique que le fonctionnement en mode génératrice et on remarque que le couple varié avec les variation de la vitesse puissance fournie.

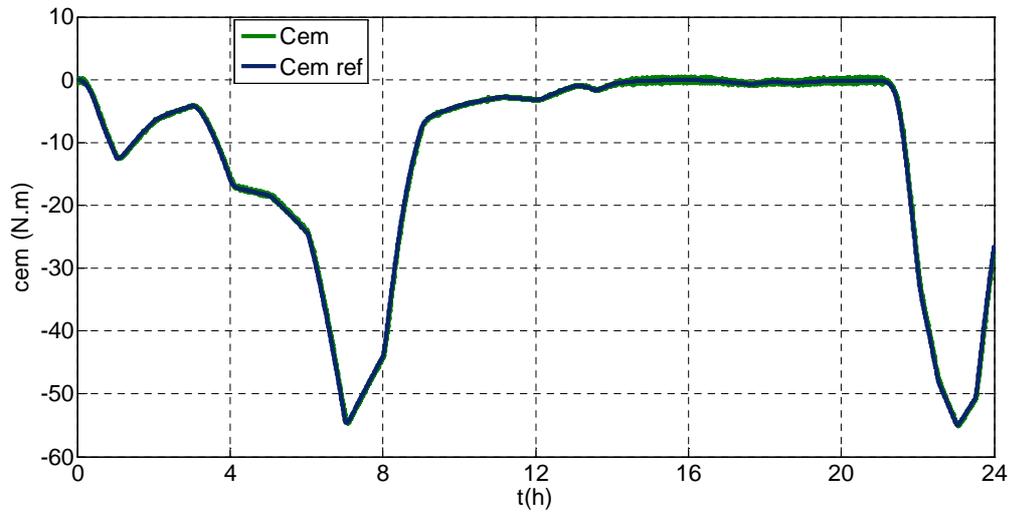


Figure (IV.27): Couple électromagnétique.

La figure (IV.28) montre l'évolution des courants I_{sd} et I_{sq} . On remarque que le courant I_{sd} est bien régulé et insensible aux variations de la vitesse. Le courant I_{sq} s'adapte avec les variations du couple électromagnétique.

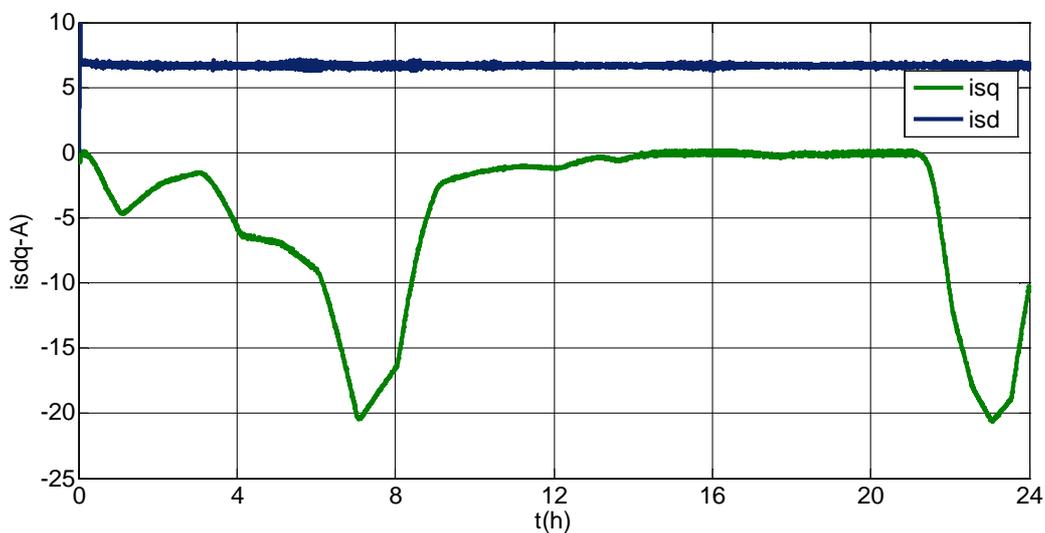


Figure (IV.28) : Courant I_{sd} et I_{sq} .

Les figures (IV.29), (IV.30) représentent la puissance et le courant débité par le générateur photovoltaïque.

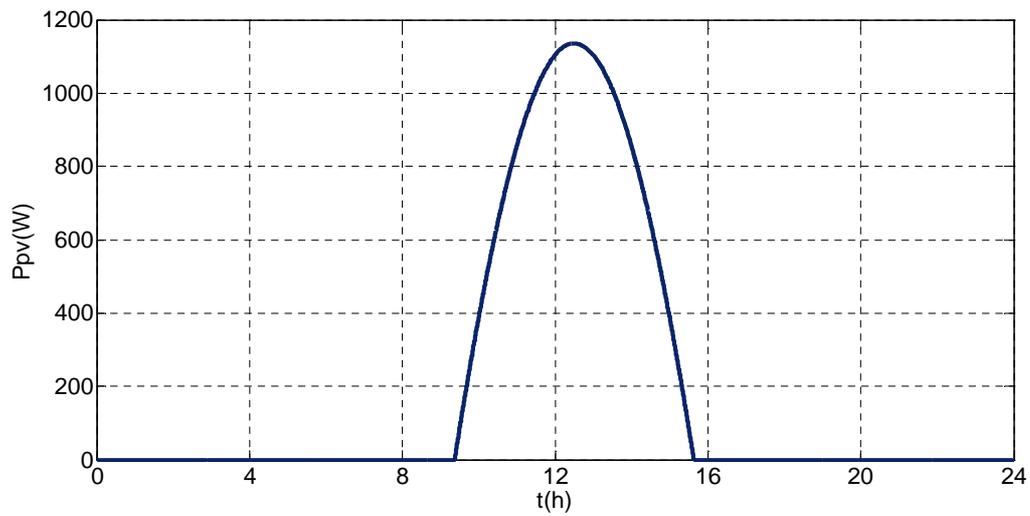


Figure (IV.29): Puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

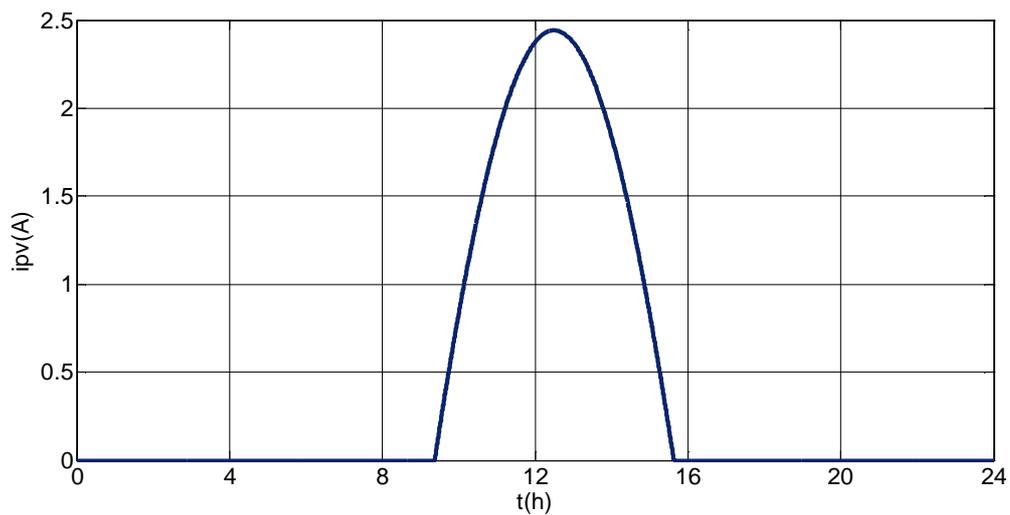


Figure (IV.30) : Courant fournie par le générateur photovoltaïque

Les figures (IV.31), (IV.32) représentent la puissance et le courant de la charge (i_{ch}). On remarque que l'évolution de la puissance de la charge suit celle du courant.

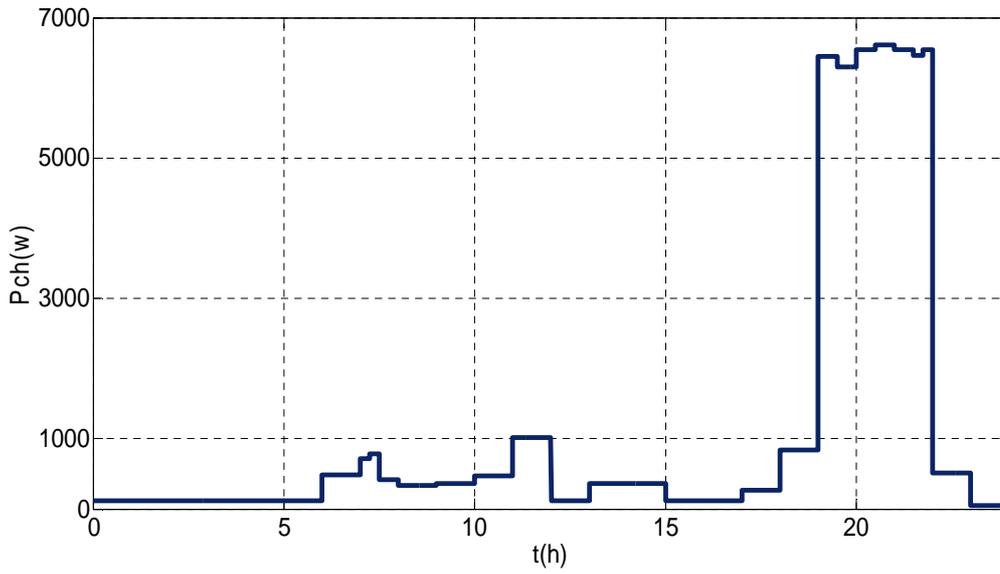


Figure (IV.31) : Puissance demandée par la charge

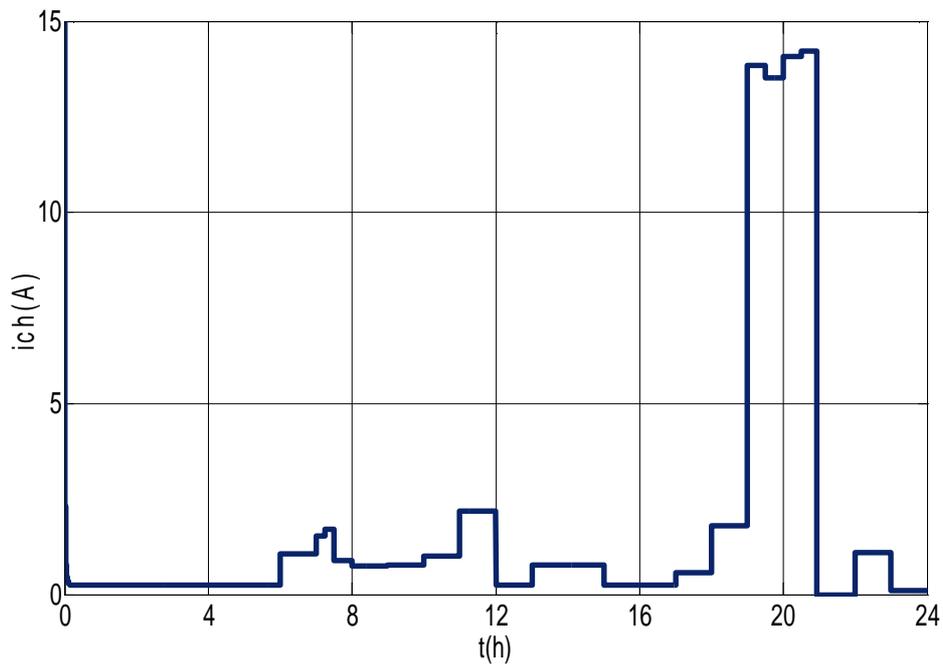


Figure (IV.32) : Courant demandé par la charge.

On remarque dans la figure (IV.33) que l'évolution de courant de la batterie suit l'état de charge.

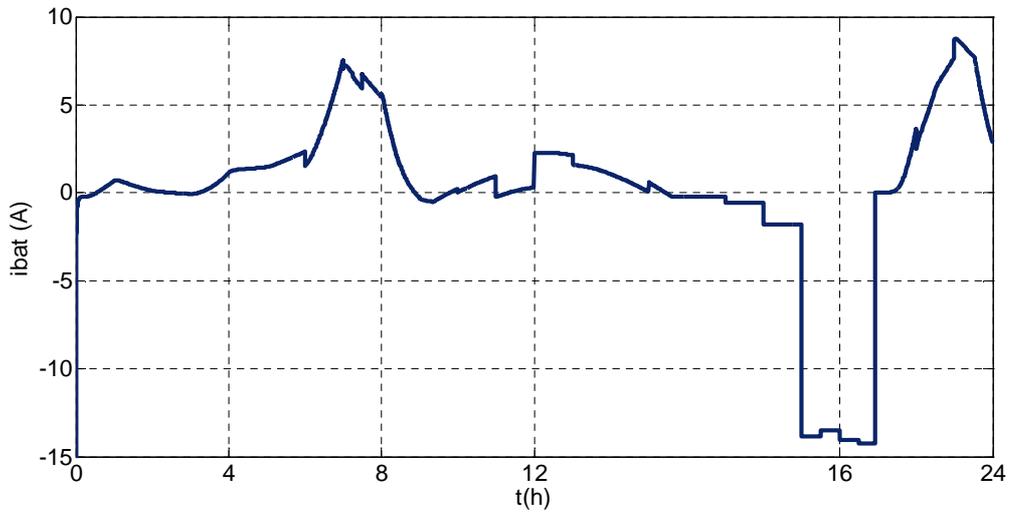


Figure (IV.33) : Courant de la batterie.

Les figures (IV.34) et (IV.35) nous représentent l'évolution du SOC et de la tension de la batterie. On remarque que l'évolution de l'état de charge de la batterie est similaire à celle de la tension.

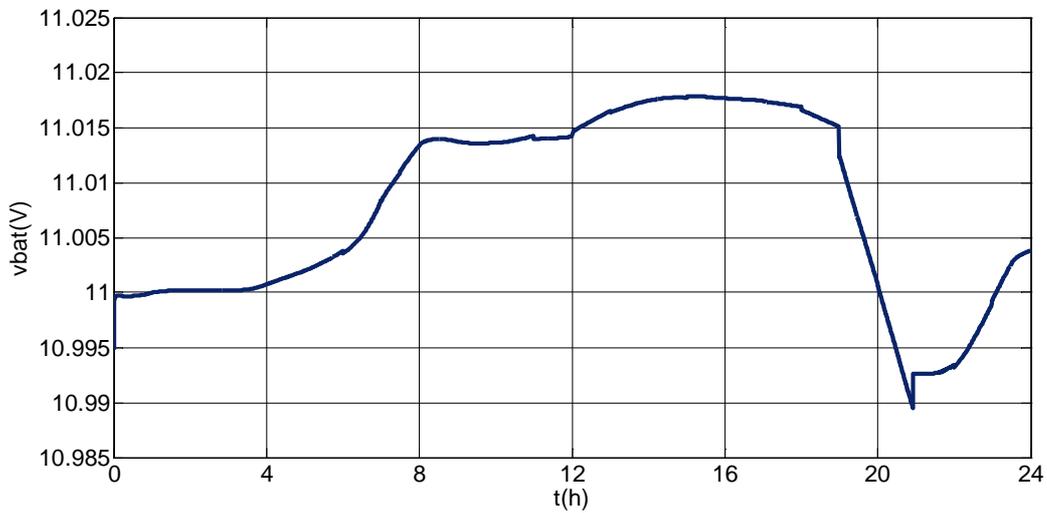


Figure (IV.34) : Tension de la batterie.

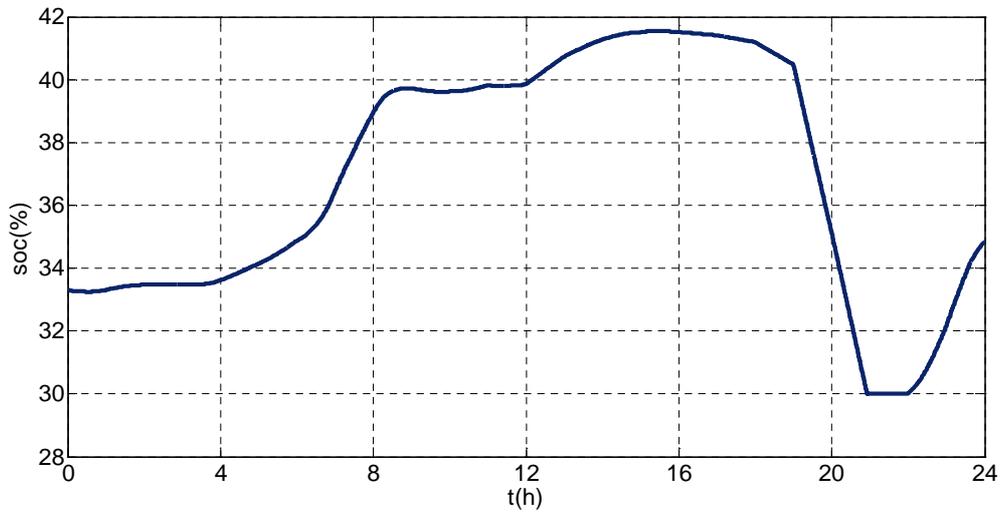


Figure (IV.35) : Etat de charge de la batterie (SOC).

La figure (IV.36) montre le courant de délestage. On remarque que ce courant n'existe pas dans ce cas d'une journée d'hivers. Ce existe seulement une fois le courant générer par le système hybride est supérieure à celui demandé par la charge et le $SOC \geq soc_{max}$.

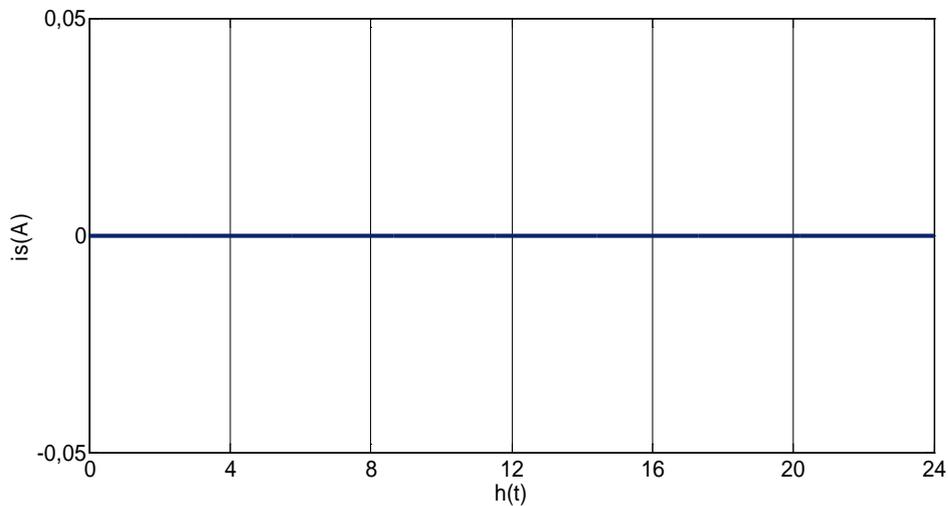


Figure (IV.36) : Courant à dissiper dans une charge dérivative.

La figure (IV.37), montre le courant total fournie par le système hybride (i_{hyb}), le courant de la batterie (i_b) et le courant de la charge (i_{ch}).

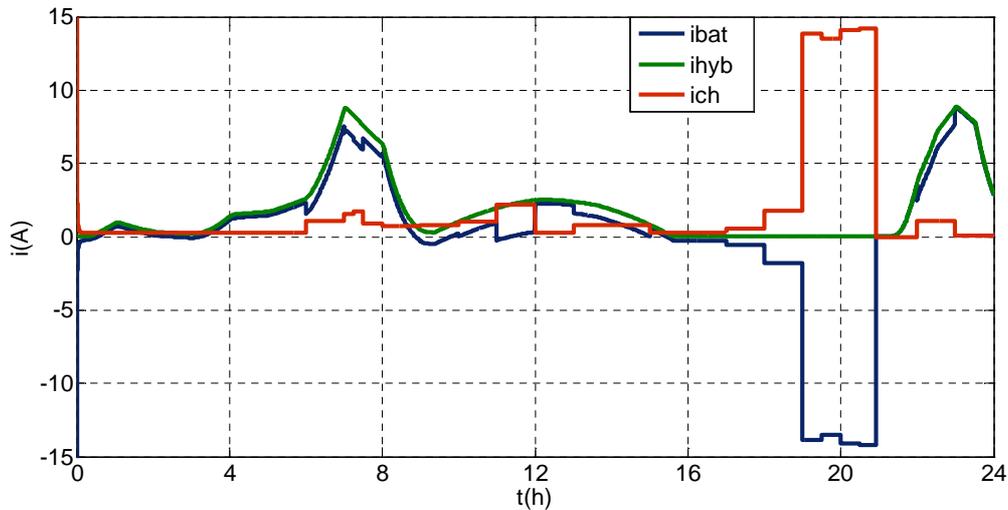


Figure (IV.37): Allure des courants i_{hyb} , i_{ch} i_{bat} .

Synthèse sur fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion :

Dans ce cas, on se limitera à donner juste les phases de fonctionnement qui ne sont pas apparues lors de la simulation d'une journée d'été. On peut constater sur les résultats obtenus que le cas où le SOC atteint sa valeur minimale est le seul cas qui n'a pas apparue.

Phase 1 : ($17 < t < 22$) : Cette période présente la situation où l'énergie produite par les deux sources principales est très faible, la batterie se décharge alors jusqu'à atteindre le SOC_{min} , puis elle est déconnectée, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite cette dernière va aussi se déconnecter. Dès qu'il y a une production supérieure à celle demandée par la charge, la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner l'énergie disponible.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons testé l'efficacité de l'algorithme de gestion présenté dans ce mémoire par la simulation numérique du système globale étudié, les résultats obtenus sont présentés et commentés. La gestion de l'énergie réalisée dans ce chapitre est faite dans le but de réduire la consommation de l'énergie, ceci en respectant les contraintes subies par les batteries (état de charge appartenant à $[SOC_{min}, SOC_{max}]$).

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Dans ce contexte, notre objectif est la minimisation du coût du système d'énergie hybride et de contrôler l'énergie de stockage disponible par l'optimisation du transfert d'énergie vers une charge résiduelle ici prise cinq maison autonome de consommation domestique.

Dans le premier chapitre nous avons présenté d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : photovoltaïque et éolienne avec stockage. Et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnements.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation des différentes partie du système hybride : Ce point nous a aidé à comprendre les différents modèles, soit le modèle de l'éolienne, celui des panneaux photovoltaïque et celui des batteries de stockage.

Pour la maximisation de l'énergie contenue dans le vent, la commande adoptée pour la chaîne de conversion éolienne a été une commande vectorielle pour générer un courant de référence lié à la courbe de puissance maximale. La technique de recherche du point optimal de puissance MPPT adoptée ici est basée sur l'architecture et la connaissance de la caractéristique de la voilure. Concernant le système photovoltaïque, le modèle à une diode prenant en compte les variations de l'éclairement et la température pour trouver les caractéristiques courant-tension. Le générateur photovoltaïque est équipé d'un hacheur survolteur qui adapte la tension aux bornes des panneaux photovoltaïques et d'une commande MPPT qui permet de varier le point de fonctionnement pour que les panneaux photovoltaïque puissent délivrer la puissance maximale.

La modélisation de la batterie a été réalisée de manière à subir des cycles de charge et de décharge. Dans notre travail on a utilisé le modèle R-C vu sa simplicité.

Dans le troisième chapitre : Nous avons dimensionné un système hybride éolien-photovoltaïque pour notre application, qui est une maison. Pour ce dimensionnement on a utilisé la méthode de mois les plus défavorables systèmes hybride PV /éolien, dans le but de choisir une bonne fiabilité avec un coût optimal.

Pour finir, dans le dernier chapitre on a procédé à la simulation du système complet en alimentant cinq maisons d'une puissance supposée identique 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.

En perspective, on souhaite l'utilisation des profils du vent et d'ensoleillements réelle afin de confirmer le bon fonctionnement du système étudié

Références Bibliographiques

Bibliographie

- [1] J.B. Gravel « Analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls », mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées Université de Montréal 2011.
- [2] F. Baghdadi « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables ». Mémoire Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2011.
- [3] L. Zarour « Etude technique d'un système d'énergie hybride (photovoltaïque-éolien) hors réseau ». Thèse de doctorat Université Mentouri de Constantine 2010.
- [4] S. Moussa « Production d'électricité au moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) », Bulletin des Energies Renouvelables, 2004. pp .9 -10.
- [5] M. Lopez « Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée ». Thèse de Doctorat Université Paris-Sud, France 2006.
- [6] L. Stoyanov « Etude de différentes structures de systèmes a sources d'énergie renouvelable ». Thèse de Doctorat a l'Université du Have, France 2005.
- [7] S. Lalouni « Étude, commande et simulation une chaine hybride (éolienne-photovoltaïque) de production d'énergie électrique ». Thèse Doctorat de L'Université de Bejaïa, Algérie, 2009.
- [8] M.L. Louazene « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ». Mémoire Magister Université el Hadj Lakhdar – Batna 2008.
- [9] H.O. Boukli « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique ». Thèse de Magister Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen 2011.
- [10] H. Hassini « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque ». Mémoire Magister Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen 2010.
- [11] S. Belakehal « Conception et commande des machines a aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables ». Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Constantine, 2010.
- [12] M. Belhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». Thèse de Magister Université de Bechar 2008.

- [13] B. Chikh –Bled, « Etude du rendement de stockage d'un système photovoltaïque appliqué au pompage hydraulique ». Thèse de Magister Université de Tlemcen 2001.
- [14] S. Vighetti « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: choix et dimensionnement des étages de conversion ».Thèse Docteur de l'Université de Grenoble 2008.
- [15] J.A. Roger « Theory of the direct coupling between dc motors and photovoltaic solar arrays », Solar Energy, 23, P. 193, 1979.
- [16] D. Boukhers « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage ».Thèse de Magister Université Mentouri de Constantine 2007.
- [17] S. Mejdoub « Simulation et optimisation des paramètres photo solaire ». Mémoire de Magister, Université de Tlemcen 2001.
- [18] H .Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans le générateurs a la vitesse variable ». Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieur D'arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France 2003.
- [19] R. Redjem « Modélisation et commande des machines électriques ». Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine 2009.
- [20] D. Djemati « Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius, simulation des performances de l'éolienne ».Thèse de Magister Université el Hadj Lakhdar – Batna 2011.
- [21] G. Cuntly, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.
- [22] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « éoliennes », Techniques de L'ingénieur, Bm 4 640-2005.
- [23] S. El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL) 2004.
- [24] F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes-2003.
- [25] L. Debbou, D. Maghribi « Commande d'un système hybride de production d'énergie ». Mémoire de Master, l'université A/Mira de Bejaïa, 2009.
- [26] Mr. B. Fellah « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité». Application aux Sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen 2012.

- [27] M. A. Camara « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs ».Thèse Doctorat Institut Polytechnique de Conakry – Université Gamal Abdel Nasser – Guinée 2011.
- [28] G.O. Cimuca « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens».Thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Lille 2005.
- [29] Ministère de l'énergie et des mines (Algérie), « Guide des énergies renouvelables », Edition 2007, PP. 38-40
- [30] T. Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse Doctorat Ecole Militaire Polytechnique d'Alger 2011.
- [31] A.T.Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat écoles doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, France , 2010.

Annexes

Annexe

1. Paramètre de la machine asynchrone

Rotor de type de cage d'écureuil

4 paires de pôles

230/400 V - 23.8/13.7 – 5.5 Kw - 50Hz - 690tr/mn

$$R_s = 1.07131 \Omega.$$

$$R_r = 1.29511 \Omega.$$

$$L_s = 8.9382mH.$$

$$L_r = 4.8613mH.$$

2. Paramètre de la turbine

Puissance nominale : $P_n = 7.5KW.$

Rayon de la turbine : $R_t = 3.24m.$

Vitesse nominale de la turbine : $\Omega_{tn} = 296tr/mn.$

Vitesse maximal de la turbine : $\Omega_{tmax} = 10tr/m.$

Vitesse minimal de la turbine : $\Omega_{tmin} = 4tr/m.$

Moment d'inertie : $J = 0.075Kg.m^2.$

Frottement : $f = 0.$

Le gain de multiplicateur : $G = 3.54.$

3. Paramètre de la batterie

$$C_b = 2600Ah.$$

$$V_b = 480V.$$

4. Paramètre d'un panneau photovoltaïque SHARP NTR5E3E

Dimension extérieur : 1575*826 mm .

Epaisseur : 40 mm .

Poids :17.0Kg.

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

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

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

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

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

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Distance Terre-Soleil | 6 |
| Figure I.2: Spectre du rayonnement solaire | 7 |
| Figure I.3: Détail de la coupe transversale d'une cellule PV | 8 |
| Figure I.4: Groupement des cellules PV en série | 10 |
| Figure I.5: Groupement des cellules en parallèle | 10 |
| Figure I.6: Générateur photovoltaïque | 11 |
| Figure I.7: Conversion de l'énergie cinétique du vent | 13 |
| Figure I.8: Les hélices à différents pales | 13 |
| Figure I.9: Turbines éoliennes en amont et en aval | 14 |
| Figure I.10: Principaux composants d'une éolienne | 14 |
| Figure I.11: éolienne de type Darrieus et Savonius | 16 |
| Figure I.12: Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable | 18 |
| Figure I.13: Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe | 18 |
| Figure I.14: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable | 19 |
| Figure I.15: Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien..... | 24 |
| Figure II.1: Système hybride éolien-photovoltaïque | 25 |
| Figure II.2: Turbine éolienne | 26 |
| Figure II.3: Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne | 28 |
| Figure II.4: Les systèmes d'axe utilisés | 31 |
| Figure II.5: Redresse MLI | 33 |
| Figure II.6: Schéma équivalent d'une module photovoltaïque | 34 |
| Figure II.7: Caractéristique courant-tension $I(v)$ d'une cellule photovoltaïque | 36 |
| Figure II.8: Caractéristique : puissance-tension $P(v)$ d'une cellule photovoltaïque | 36 |
| Figure II.9: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=1000, 800, 600, 400$) et $T_c = 25^\circ c$ | 37 |
| Figure II.10: Caractéristique puissance -tension d'une cellule photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=1000, 800, 600, 400 \text{ W/m}^2$) et $T_c = 25^\circ c$ | 38 |
| Figure II.11: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0.25, 50, 75^\circ c$) et $G=1000 \text{ W/m}^2$ | 38 |
| Figure II.12: Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque pour une variation de température ($T_c = 0.25, 50, 75^\circ c$) et $G=1000 \text{ W/m}^2$ | 39 |
| Figure II.13: Hacheur survolteur | 40 |

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure II.14: Modèle R-C de la batterie | 40 |
| Figure II.15: Hacheur survolteur-dévolteur | 41 |
| Figure II.16: Bus continue | 41 |
| Figure III.1: Présentation du site de Bejaïa | 44 |
| Figure III.2: le profil de charge pendant l'été | 46 |
| Figure III.3: Le profil de charge pendant hiver | 46 |
| Figure III.4: Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure III.5: Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation.... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure (III.5) : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (p&o). | Erreur ! Signet non défini. |
| | |
| Figure VI.1: Organigramme de gestion d'énergie dans le système global | 49 |
| Figure IV.2: Schéma bloc de simulation global | 50 |
| Figure IV.3: Profil de la vitesse de vent pour une journée festival | 51 |
| Figure IV.4: Profil de l'ensoleillement pour une journée festival | 51 |
| Figure IV.5: Profil de charge pour une journée festival | 52 |
| Figure IV.6: Profil de vent pour une journée hivernal | 52 |
| Figure IV.7: Profil de l'ensoleillement pour une journée hivernal | 53 |
| Figure IV.8: Profil de charge pour une journée hivernal | 53 |
| Figure IV.9: Puissance fournie par le système éolien | 54 |
| Figure IV.10: Courant fournie par le système éolien | 54 |
| Figure IV.11: Flux rotorique | 55 |
| Figure IV.12: Couple électromagnétique | 55 |
| Figure VI.13: Courant I_{sd} et I_{sq} | 56 |
| Figure IV.14: Puissance fournie par le générateur photovoltaïque | 56 |
| Figure IV.15: Courant fournie par le générateur photovoltaïque | 57 |
| Figure IV.16: Puissance demandée par la charge | 57 |
| Figure IV.17: Courant demandée par la charge | 58 |
| Figure IV.18: Courant de la batterie | 58 |
| Figure IV.19: Tension de la batterie | 59 |
| Figure IV.20: Etat de charge de la batterie (SOC) | 59 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.21: Courant à dissiper dans une charge dérivative | 60 |
| Figure IV.22: Allure des courants i_{hyb}, i_{ch}, i_{bat} | 60 |
| Figure IV.23: Allure de la tension du bus continue | 61 |
| Figure IV.24: Puissance fournie par le système éolien | 62 |
| Figure IV.25: Courant fournie par le système éolien | 63 |
| Figure IV.26: Flux rotorique | 63 |
| Figure IV.27: Couple électromagnétique | 64 |
| Figure IV.28: Courant I_{sd} et I_{sq} | 64 |
| Figure IV.29: Puissance fournie par le générateur photovoltaïque | 65 |
| Figure IV.30: Courant fournie par le générateur photovoltaïque | 65 |
| Figure IV.31: Puissance demandée par la charge | 66 |
| Figure IV.32: Courant demandé par la charge | 66 |
| Figure IV.33: Courant de la batterie | 67 |
| Figure IV. 34: Tension de la batterie | 67 |
| Figure IV.35: Etat de charge de la batterie (SOC) | 68 |
| Figure IV.36: Courant à dissiper dans une charge dérivation | 68 |
| Figure IV.37: Allure des courants i_{hyb}, i_{ch}, i_{bat} | 69 |