

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



**Département d'Automatique
Spécialité Automatique**

Projet de fin d'études

**En vue l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique**

THÈME

**Commande Hybride par Logique Floue d'un
Système Hybride Eolien-Photovoltaïque-Diesel pour
une maison en site isolé**

Etudié par :

**Mr AMMOUR Mohamed Lamine
Mr RIANE Rami**

Proposé et dirigé par :

**Pr D. BOUKHETALA
Pr F. BOUDJEMA**

Juin 2011

**Laboratoire de Commande des Processus
Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie**

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma très chère mère et à mon cher père qui ont été toujours à mes côtés dans les moments difficiles, qui m'ont tout appris, tant donné sans rien demandé en retour. Sans eux je ne serais pas l'homme que je suis et rien n'aurait été possible.

Que Dieu vous garde pour nous chers parents.

Je dédie aussi ce travail à mes chères sœurs, qui m'ont soutenu et aidé tout au long de mon parcours.

A mes nièces et neveux, que je leur souhaite le succès et la réussite dans la vie.

Ainsi qu'à tous mes amis (es) et camarades.

Amine

Dédicaces

A ma Mère,

A mon Père,

A qui je dois ce que je suis,

*Qu'ils trouvent dans ce site, le fruit de leurs sacrifices consentis pour mon
éducation, et l'expression de mon amour et de ma gratitude pour la bienveillance
avec laquelle ils m'ont toujours entouré.*

Que Dieu leur préserve longue vie et bonne santé.

A ma sœur,

A mes frères,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

RAMI

Remerciements

Nous tenons à remercier dieu de nous avoir donné la force morale, physique et l'aide pour accomplir ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier Messieurs les Professeurs **D. BOUKHETALA** et **F. BOUDJEMA** pour nous avoir accepté encadrés et dirigés durant l'élaboration de ce travail ainsi que pour leur assistance et tous leurs conseils.*

*Nous remercions également Madame **D. KOUSSA** du **CDER**, pour ces conseils et son aide tout le long de notre projet, ainsi que toute l'équipe du **CDER**.*

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre projet.

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

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

الملخص

يمكن لمصادر الطاقة المتجددة ، إنتاج الكهرباء، والمساعدة في حل مشكلة الكهرباء في المواقع النائية ، حيث تتواجد أعداد كبيرة من الأفراد محرومة من الطاقة الكهربائية.

ويتألف نظام إنتاج الطاقة في المنزل المقترح، من سلسلة ألواح ضوئية، و عنفة رياح ، موصولة ببعضها ببعض مع بطاريات تخزين عن طريق موصل توتر مستمر، أما مولد الديزل المتصل بنفس موصل التوتر المستمر يضمن توفير الطاقة الكهربائية في الحالات الطارئة التي يكون فيها الموقع خاليا من الطاقات المتجددة.

هذه الرسالة تتناول أولا ترشيده استهلاك طاقة الألواح الضوئية و عنفة الرياح عن طريق استقصاء نقاط الاستطاعة القصوى، ثانيا نوعية الطاقة الكهربائية عن طريق التحكم في موصل التوتر المستمر والجهد الناتج من المحول المستمر المتناوب، وأخيرا إدارة النظام بأكمله عن طريق المشرف.

الكلمات المفتاحية : التحكم الهجين، زيادة المردود، الطاقة الكهروضوئية، ألواح ضوئية، طاقة الرياح، عنفة الرياح، موصل التوتر المستمر، بطاريات التخزين، المحول المستمر المتناوب، المحول المستمر المستمر، المنطق الضبابي

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique.

Le système de production d'énergie de la maison proposée se comporte d'une chaîne de production photovoltaïque et éolienne, interconnectées par un bus continu à des batteries de stockage et un onduleur muni d'un filtre LC. Un générateur diesel connecté au même bus continu assure l'approvisionnement de la maison par l'énergie électrique en cas d'urgence ou le site est dépourvu en énergie renouvelable pour une longue période de temps.

Ce travail traite en premier lieu, l'optimisation des énergies photovoltaïque et éolienne, en poursuivant leurs points de puissance maximale; La qualité de l'énergie électrique en commandant la tension de bus continu et la tension de sortie de l'onduleur et finalement la gestion efficace du système complet grâce à un superviseur de charge

Mot clés: commande hybride, système d'énergie hybride, MPPT, logique floue, optimisation, maison isolée, photovoltaïque, éolien, bus continu, batteries de stockage, onduleur, hacheur, Machine Synchronique à Aimant Permanent (MSAP), Générateur Diesel.

Abstract

The sources of renewable energy, for decentralized production of electricity, can help for solving the problem of electrification of remote sites where a large numbers of individuals are devoid of energy intake.

The system of energy production in the proposed house is composed from a chain of photovoltaic and wind generation, interconnected by a DC bus with storage batteries and an inverter with a LC filter. A diesel generator connected to the same DC bus ensures the supply of electric power in case where the site is devoid of renewable energy for a long time.

This thesis addresses first, the energy optimization of a photovoltaic panel and a wind turbine by tracking their maximum power points; the quality of electric power by controlling the DC bus voltage and the output voltage of the inverter; and finally the management of the entire system with a supervisor.

Keywords: hybrid control, hybrid power system, MPPT, Fuzzy logic, Zero-energy building, photovoltaic panel, wind turbine, DC-bus, storage batteries, inverter, chopper, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Diesel generator.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Système d'énergie hybride d'une maison isolée	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition et mission des systèmes hybrides.....	5
I.3. Le concept des maisons performantes.....	6
I.4. Les techniques utilisées dans les maisons performantes.....	8
I.5. Eléments constituant le système hybride de la maison proposée.....	9
I.5.1. Energie solaire photovoltaïque.....	9
a) Effet photovoltaïque.....	9
b) Principe de la conversion photovoltaïque.....	11
c) Types de systèmes photovoltaïques.....	12
d) Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	13
I.5.2. Energie éolienne.....	13
a) Description de l'énergie éolienne.....	14
b) Principaux composants d'une éolienne.....	15
c) Principe de conversion dans une éolienne.....	16
d) Types d'éoliennes suivant la structure.....	19
e) Types d'éoliennes suivant la vitesse.....	20
f) Types d'éoliennes suivant la puissance.....	20
g) Le fonctionnement couplé ou non au réseau électrique.....	21
h) Types d'éoliennes suivant la génératrice.....	23
i) Avantages et inconvénients des différentes génératrices.....	25
I.5.3. Générateur diesel.....	25
a) Groupe électrogène fonctionnant à vitesse fixe.....	26
b) Groupe électrogène fonctionnant à vitesse variable.....	27
I.5.4. Système de stockage.....	27
I.5.5. Le système de commande et de supervision.....	28
I.5.6. Convertisseurs électriques (éléments de gestion).....	28
a) Les redresseurs (convertisseur AC/DC).....	28
b) Les onduleurs (convertisseur DC/AC).....	28

c) Les hacheurs (convertisseur DC/DC)	29
I.5.7. Charges	30
I.6. Conclusion	30

CHAPITRE II: Dimensionnement et modélisation des composants du SEH

II.1. Introduction.....	31
II.2. Dimensionnement du SEH	31
II.2.1. Le site d'implantation	32
II.2.2. Caractéristiques de la maison choisie	32
II.2.3. L'estimation du besoin énergétique journalier de la maison	32
II.3. Modélisation de la chaine photovoltaïque.....	34
II.3.1. Générateur photovoltaïque.....	34
II.3.1.1 Influence de l'éclairement et de la température sur la cellule PV	38
II.3.2. Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost »	40
II.4. Modélisation de la chaine éolienne	42
II.4.1. Turbine éolienne	43
II.4.2. Machine Synchrone à Aimant Permanent.....	45
II.4.2.1. Equations électriques et magnétiques.....	46
II.4.2.2. Equation mécanique	48
II.4.2.3. Modèle d'état de la MSAP	48
II.4.3. Redresseur Triphasé à diodes.....	49
II.5. Système de stockage électrique	50
II.5.1. Batterie.....	50
II.5.2. Hacheur réversible en courant	51
II.5.3. Bus continue.....	51
II.6. Générateur diesel	52
II.6.1. Moteur diesel	53
II.7. Onduleur monophasé et filtre de sortie	53
II.8. Conclusion	56

CHAPITRE III: Commande hybride du SEH

III.1. Introduction	57
III.2. Commande hybride	57
III.3. le système de gestion et de supervision	58

III.4. Le contrôleur flou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale	61
III.4.1. Poursuite du point de puissance maximal.....	61
III.4.2. MPPT appliqué sur les systèmes photovoltaïques.....	64
III.4.3. MPPT flou appliqué sur le système photovoltaïque	64
III.4.4. MPPT appliqué sur les systèmes éoliens	68
a) Maximisation de puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure	70
b) Maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure	72
III.4.5. MPPT flou appliqué sur le système éolien	72
III.5. Le contrôleur flou appliqué à la stabilisation du bus continu	74
III.6. Le contrôleur flou appliqué au générateur diesel.....	76
III.7. Le contrôleur flou appliqué à l'onduleur monophasé	77
III.8. Conclusion.....	79

CHAPITRE IV : Résultats de Simulation

IV.1. Introduction	80
IV.2. Simulation du système de supervision.....	80
IV. 3. Simulation de la chaine de production photovoltaïque.....	83
IV.3.1. Comportement du système photovoltaïque sans contrôleur MPPT	83
IV.3.2. Fonctionnement du système photovoltaïque sous des conditions constantes	84
IV.3.3. Fonctionnement sous des conditions météorologiques variables.....	84
a) Comportement du système face à un changement de l'éclairement.....	84
b) Comportement du système face à un changement de température.....	85
IV.4. Simulation de la chaine de production éolienne	86
IV.4.1. Fonctionnement du système éolien sans MPPT	86
IV.4.2. Fonctionnement du système éolien sous des conditions constantes.....	87
IV.4.3. Fonctionnement sous des variations de la vitesse du vent	87
IV.5. Simulation du bus continu (Test de robustesse)	89
IV.6. Simulation du Groupe Diesel.....	90
IV.6.1. Simulation sous un courant de charge constant.....	90
IV.6.2. Test de robustesse face à une variation de courant de charge	91

IV.7. Simulation de la tension de sortie de l'onduleur.....	91
IV.7.1. Test de robustesse face à une variation de la tension de bus DC	92
IV.7.2. Test de robustesse face à une variation du courant de charge.....	93
IV.8. Conclusion.....	94
Conclusion générale et perspectives	95
Annexe A.....	98
Annexe B	105
Références Bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Principe de l'effet photovoltaïque.....	10
Figure I.2. Système photovoltaïque autonome.....	11
Figure I.3. Systèmes photovoltaïque hybride.	11
Figure I.4. Systèmes photovoltaïque connecté au réseau.....	11
Figure I.5. Constitution d'une nacelle	14
Figure I.6. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	15
Figure I.7. Eoliennes à axe verticale.....	16
Figure I.8. Eoliennes à axe verticale.....	16
Figure I.9. Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée pour différents types de turbines.....	17
Figure I.10. Caractéristique Puissance-vitesse de rotation d'une éolienne pour différentes vitesses du vent.....	18
Figure I.11. Chaîne de conversion à génératrice asynchrone fonctionnant à vitesse fixe.....	20
Figure I.12. Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à double alimentation.....	20
Figure I.13. Chaîne de conversion à générateur synchrone et convertisseurs de fréquence.....	21
Figure I.14. Eolienne basée sur une génératrice à aimant permanent débitant directement sur des batteries.....	21
Figure I.15. Groupe électrogène diesel basé sur une machine synchrone.....	23
Figure I.16. Schéma synoptique de système de commande et supervision.....	28
Figure II.1. Evolution de la puissance appelée.....	33
Figure II.2. Profil du vent dans la région d'Adrar.....	33
Figure II.3. Profil d'ensoleillement dans la région d'Adrar.....	34
Figure II.4. Profil de charge de la maison.....	34
Figure II.5. Composantes d'un générateur photovoltaïque.....	35
Figure II.6. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (model à 1° diode).....	36
Figure II.7. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (model simplifié à 1° diode).....	37
Figure II.8. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la cellule PV.....	38
Figure II.9. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque.....	39
Figure II.10. Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule PV.....	40
Figure II.11. Caractéristiques puissance-tension, et courant-tension d'un panneau PV.....	40
Figure II.12. Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost.....	41
Figure II.13. Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque K est fermé.....	41
Figure II.14. Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque K est ouvert.....	42

Figure II.15. Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.....	43
Figure II.16. Système de conversion éolien.....	43
Figure II.17. Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique	45
Figure II.18 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne de 2m de diamètre.	46
Figure II.19. Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent.....	47
Figure II.20. Schéma d'un redresseur triphasé parallèle double à diode parfait.....	50
Figure II.21. Modèle électrique de la batterie.....	51
Figure II.22. Hacheur réversible en courant.....	52
Figure II.23. Modèle du bus continu	53
Figure II.24. Générateur diesel.....	54
Figure II.25. Bloc-diagramme d'un moteur diesel simplifié.....	55
Figure II.26. Modèle du bus continu.....	55
Figure II.27. Schéma électrique de l'onduleur monophasé.....	56
Figure III.1. Architecture du système hybride proposé.....	61
Figure III.2. Organigramme de supervision et gestion efficace.....	62
Figure III.3. Conception de l'organigramme de gestion dans l'environnement state flow.	63
Figure III.4. Les entrées sorties du système de gestion sous l'environnement state flow.	63
Figure III.5. Vue Générale d'un système photovoltaïque ou éolien doté d'un MPPT	64
Figure III.6. Caractéristiques puissance/tension d'un générateur photovoltaïque	65
Figure III.7. Caractéristique Courant/Tension, Puissance/Tension d'une cellule PV.....	65
Figure III.8. Schéma (synoptique) du système photovoltaïque avec MPPT flou.....	66
Figure III.9. Structure de base du contrôleur flou TSK.....	67
Figure III.10. Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement.....	68
Figure III.11. Fonctions d'appartenances de l'entrée.....	69
Figure III.12. Fonctions d'appartenances de l'entrée.....	69
Figure III.13. Conclusions numériques de la sortie d_{PV}	69
Figure III.14. Caractéristiques de la voilure dans le plan puissance – vitesse.....	71
Figure III.15. Vitesse de référence en fonction de la puissance.....	73
Figure III.16. Convergence vers le MPP par contrôle en vitesse.....	74
Figure III.17. Schéma de la chaine de conversion éolienne avec MPPT flou.....	75
Figure III.18. Caractéristique P_e en fonction de V_{eDC}	75
Figure III.19. Principe de régulation de la tension du bus continu par un contrôleur flou	77
Figure III.20. Schéma de commande du générateur diesel par contrôleur flou.....	78
Figure III.21. Schéma de commande de l'onduleur par contrôleur flou.....	80

Figure A.1. Fonctions d'appartenance usuelles.

Figure A.2. Schéma de base de la régulation floue.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Classification des SEH par gamme de puissance.....	6
Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	12
Tableau I.3. Classification des d'éoliennes suivant leur puissance.....	20
Tableau I.4. Avantages et inconvénients des différentes génératrices.....	24
Tableau II.1. Coordonnées géographiques du site d'Adrar [68].....	32
Tableau III.1. Table d'inférence du MPPT flou.....	70

ABBREVIATIONS

- AC: Alternative Current
- DC: Direct Current
- DL: Dump Load
- FLC: Fuzzy Logic Controller
- GD: Générateur Diesel
- MADA: Machine Asynchrone à Double Alimentation
- MAS: Machine Asynchrone
- MD: Moteur Diesel
- MPPT: Maximum Power Point Tracking
- MS: Machine Synchrone
- MSAP: Machine Synchrone à Aimants Permanents
- PV: Photovoltaïque
- SEH: Système d'Energie Hybride
- THD: Taux de Distorsion d'Harmonique
- TSK: Takagi Sugeno Kang

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées.

Parmi elles, nous pouvons citer l'énergie de fission nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique. Cependant, le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années.

Une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables. Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont autant de ressources naturelles utilisables pour générer de l'énergie électrique. Ces énergies n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre (principalement le CO₂ et le CH₄) lors de leur exploitation, ce qui rend la production d'énergie électrique propre, économe et durable. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans les unités de production d'électricité de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Pour les régions isolées ou éloignées de notre pays, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et constitue un lourd fardeau financier, en outre le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, le recours à des solutions limitant la consommation énergétique des maisons, aux énergies renouvelables et à une meilleure utilisation des combustibles fossiles devient impératif. Ces solutions, appliquées aux maisons, amènent à travailler simultanément sur la consommation des maisons, sa structure et ses divers équipements, dès la phase de conception.

La maison performante associe une grande partie de ces solutions. Ces maisons, combinant faibles besoins énergétiques et production énergétique décentralisée, sont encore peu répandues, notamment en raison des contraintes économiques et d'un faible retour d'expérience. Leur conception requiert la maîtrise du comportement du bâtiment et de ses composants en toute saison.

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peu constituer un complément ou une alternative aux générateurs diesels utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées. Les systèmes énergies hybrides sont généralement conçus pour répondre aux besoins énergétiques allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète des villages.

Des progrès technologiques sont donc attendus à la fois par les producteurs en ce qui concerne l'optimisation des rendements de la transformation des énergies renouvelables, mais également par les gestionnaires des réseaux en ce qui concerne le transport, la distribution et la gestion de cette forme d'énergie, nouvelle par sa nature et fortement fluctuante par son comportement. Cependant, des améliorations dans la conception et le fonctionnement des systèmes hybrides sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitives ces filières technologiques et permettre leur essor.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergies dans un système hybride dans le cadre de l'habitat doit avoir une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de coût et de disponibilité, étant entendu que le bilan « écologique » est supposé a priori favorable. Les moyens de production d'énergie utilisant les éoliennes, le photovoltaïque, le petit hydraulique, présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge.

Le but du système hybride est d'assurer une alimentation à la charge sans interruption, et si possible de maximiser le bilan d'énergie provenant des sources d'énergies renouvelables. Dans tous les cas, la bonne qualité de l'énergie doit être garantie par rapport aux normes de sécurité des personnes et d'usage des équipements.

Pour la configuration du système hybride d'une maison en site isolé, étudiée dans ce travail, nous avons retenu le système photovoltaïque et le système éolien comme source renouvelable de production de l'énergie électrique, un générateur diesel est aussi utilisé comme une source de secours pour satisfaire la disponibilité de l'énergie pour la charge face aux fluctuations des énergies renouvelables. L'autonomie de ce système sera assurée par un système de stockage qui présente un facteur clef dans un système d'énergie hybride ; dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont reliées aux systèmes de production d'énergie, photovoltaïque, éolienne et diesel, à travers un bus continu et des convertisseurs de puissance. Un onduleur monophasé muni d'un filtre de sortie joue le rôle d'une interface entre le bus continu et la charge, afin de l'alimenter par une

tension sinusoïdale à amplitude et fréquence constantes. Ce système est destiné à alimenter une maison type d'une famille moyenne, habitée au cours de toute l'année dans la région d'Adrar.

Dans ce contexte, le travail présenté ici se focalise sur la commande et l'optimisation des systèmes d'énergie hybride dans les maisons en site isolé. La nécessité d'obtenir de meilleures performances impose des techniques de commande plus adaptées à ce type de système. Parmi les techniques les plus performantes, nous avons utilisé la logique floue afin de satisfaire l'utilisateur à travers :

- L'optimisation des énergies renouvelables, photovoltaïque et éolienne, à travers des commandes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).
- La qualité et la continuité de l'électricité produite, en commandant l'onduleur, le générateur diesel, et la stabilisation de la tension du bus continu.
- La supervision du système hybride par surveillance automatique de certains composants de façon à gérer l'énergie électrique produite d'une manière optimale.

Le travail présenté ici est organisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différents concepts des maisons performantes, la définition et la mission des systèmes hybrides, un état de l'art de ce système est donné. Notre travail portant sur un système d'énergie hybride éolien/photovoltaïque/diesel et batteries de stockage destiné à alimenter une maison isolée.

Le deuxième chapitre présente d'abord une étude de dimensionnement pour déterminer les capacités nominales des sources utilisées dans la configuration du système hybride de la maison isolé proposée dans ce travail .Tous les composants de notre système hybride sont ensuite modélisés dans le but d'analyser le comportement dynamique du système complet face aux variations climatiques et de charge.

Dans le troisième chapitre, d'une part, nous présenterons l'architecture et le fonctionnement du système de supervision pour une gestion automatique et efficace de l'énergie. D'autre part les différents concepts de la logique floue qui seront utilisées pour synthétiser le régulateur floue type Takagi-Sugeno-Kang en vue de: l'optimisation de l'énergie photovoltaïque et éolienne, la stabilisation de la tension du bus continu et la commande du générateur diesel, enfin la commande de l'onduleur afin d'obtenir une tension sinusoïdale à amplitude et fréquence constante, quel que soit les perturbations.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats de simulation. Ce chapitre présente la simulation du fonctionnement du système de gestion et de supervision, l'analyse du comportement des différents sous-systèmes, modélisé dans le deuxième chapitre, face aux variations climatiques et de charges.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale synthétisant les conclusions de tous les chapitres, et par des perspectives de ce mémoire.

CHAPITRE I

**SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE D'UNE
MAISON ISOLEE**

I.1. Introduction

Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel est la source principale d'énergie électrique. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique est prohibitif et le prix du combustible augmente radicalement avec l'isolement.

A cet effet, nous avons pensé de contourner le problème par une autre solution à savoir l'exploitation des potentiels énergétiques renouvelables [42], la baisse continue dans les prix des générateurs basés sur les énergies renouvelables et la fiabilité croissante de ces systèmes ont mené à une plus grande utilisation de ces sources dans les régions isolées [77].

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée à la variabilité des ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources. Pour les régions isolées, la solution à retenir est certainement le couplage entre plusieurs sources, par exemple des éoliennes, des panneaux photovoltaïques et des générateurs diesel (système hybride) [77].

Après avoir présenté la définition du système hybride d'une maison isolé, et le concept des maisons performantes, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'état de l'art, on décrivant les sources d'énergies qui composent les systèmes hybrides habituellement ainsi que les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources renouvelables pour une maison isolé.

I.2. Définition et mission des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride (SEH) est un système qui associe au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergies classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue [77]. Un système d'énergie hybride est capable d'un fonctionnement autonome, parfois il est associé à un système de stockage, sa fonction principale est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie, et l'économie du carburant [60], il est souvent utilisé dans la production d'électricité sans interruption dans les maisons isolées [77].

Nous obtenons une baisse de prix dans les SEH pour couvrir au moins l'investissement fait pour les générateurs d'énergies renouvelables et les autres composantes auxiliaires du système [60].

La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels. Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel [77].

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles, le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (tableau 1).

Puissance du SEH	application
Fiable : inférieur à 5 Kw	Système autonome : station de télécommunication, petite maison, pompage d'eau...
Moyenne : entre 10 à 250Kw	Alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande supérieure à 500 Kw	Grands réseaux isolés comme par exemple réseaux insulaires

Tableau I.1. Classification des SEH par gamme de puissance [65].

I.3. Le concept des maisons performantes

Les contraintes environnementales d'une part concernant le réchauffement climatique, les rejets dans l'atmosphère de gaz à effet de serre et énergies fossiles amenées à disparaître, d'autre part la hausse constante du prix de l'énergie (Les statistiques les plus récentes montrent que l'habitat consomme 30% de l'énergie mondiale). Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, le recours à des solutions limitant la consommation énergétique des maisons, aux énergies renouvelables et à une meilleure utilisation des combustibles fossiles devient impératif [80].

Il s'agit donc d'un secteur pour lequel il est pertinent de trouver des solutions de production d'énergie propre, économe et durable [30, 60], de façon à rendre la maison un lieu

de production d'énergie décentralisée utilisant les énergies renouvelables : vent, soleil, géothermie superficielle, biomasse ... [80].

Les maisons dites « performantes » sont associées, contrairement aux maisons plus ordinaires, à des préoccupations environnementales, en particulier vis-à-vis de leurs besoins énergétiques. Ces différents concepts se différencient par leurs performances énergétiques de plus ou moins haut niveau [80].

La maison à basse consommation : Les consommations en énergie de ce type de maison sont plus faibles que les maisons ordinaires, sans toutefois inclure de moyen de production d'énergie.

La maison passive : La plate-forme francophone de la maison passive donne cette définition: « *Une maison avec un climat intérieur agréable en hiver comme en été sans installation de chauffage ou de refroidissement conventionnelle* ». Cette maison présente des consommations en énergie très faibles. Les apports d'énergie dits « passifs » comme l'énergie solaire ou l'énergie dégagée par les appareils internes à l'habitat suffisent, combinés à des systèmes de ventilation, à assurer une température suffisante dans l'édifice. Ce concept associe également à ces économies d'énergies, une réduction de la consommation électrique [51].

La maison zéro énergie : Ce type de maison est à très faible consommation et utilise des moyens de productions d'énergie locaux, qui suffisent à fournir la quantité d'énergie nécessaire [30]. Une telle maison est caractérisée par un bilan énergétique annuel nul, elle consommera plus d'énergie qu'elle n'en produit en hiver et cette surconsommation sera compensée par l'excédent d'énergie produit en été [51].

La maison autonome : C'est une maison énergétiquement indépendante, son apport d'énergie est produit sur place sans être raccordé au réseau. Le principe est similaire à la maison « zéro énergie », à la différence près que le bilan énergétique d'une maison autonome est nul à tout instant, et non pas de façon globale sur une année.

Maison à Energie Positive : Allant un pas plus loin que les maisons zéro énergie, les maisons à énergie positive produisent plus d'énergie qu'elles n'en consomment. La puissance des systèmes d'énergie renouvelable est donc plus élevée. Ces maisons sont fournisseuses nettes d'énergie au réseau auquel elles sont raccordées, en moyenne sur une année complète. Elles constituent de ce fait des mini-centrales électriques insérées dans un réseau décentralisé [51].

I.4. Les techniques utilisées dans les maisons performantes

Il existe un certain nombre de solutions techniques éprouvées, et qui pourront constituer une maison performante, relié au réseau ou bien isolé :

Isolation thermique : L'isolation thermique d'une maison désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre l'intérieur de la maison et l'environnement extérieur, ce qui présente donc plusieurs avantages, le plus évident, est de conserver la chaleur en hiver et l'air frais en été au sein de l'habitat, en économisant l'énergie nécessaire au chauffage ou au rafraîchissement des pièces.

L'étanchéité à l'air : Pour une maison performante, une excellente étanchéité à l'air est nécessaire, car une faille perturberait toute l'efficacité de l'isolation et de la ventilation des locaux. Les fuites peuvent se situer dans de nombreux emplacement, en particulier au niveau de tous les raccords et liaisons entre éléments, encadrements de fenêtres, et pénétrations de canalisations. La qualité de l'étanchéité pourra être vérifiée par des tests d'étanchéité [30].

La ventilation contrôlée : désigne l'ensemble des dispositifs destinés à assurer le renouvellement de l'air à l'intérieur de la maison ce qui est indispensable au bien-être et confort de l'habitation, aux problèmes d'hygiène et d'humidité [51].

L'énergie solaire passive : L'énergie solaire, captée par les parties vitrées, est une énergie extérieure indispensable afin d'être utilisé pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux.... Les surfaces vitrées dépendent donc de l'orientation de la maison : 40% à 60% de surface vitrée sur la façade Sud, 10% à 15 % sur la façade Nord, et moins de 20% sur les façades Est et Ouest [30].

Construction compacte : la compacité d'une maison est le rapport entre la surface thermo-conductrice et le volume à chauffer. Elle peut jouer un rôle important dans le gain d'énergie de chauffage. Ainsi, pour un même volume, la perte d'énergie par les parois sera plus faible dans une maison compacte [30].

Limitation des consommations d'énergie des appareils ménagers : De nombreuses économies d'énergies peuvent être faites dans le choix d'appareils électroménagers adéquats. Parmi les plus énergivores, on trouvera les lave-vaisselles, lave-linges, fours et réfrigérateurs. Des réflexes doivent être adoptés dans le choix des éléments électriques des habitations en fonction de leur consommation, comme l'achat d'ampoules basse consommation, ainsi que des gestes simples peuvent aussi limiter la consommation comme la mise en hors tension des appareils, plutôt qu'en veille [30].

Moyens de production d'énergie : Il est nécessaire d'associer aux techniques de réduction de consommation d'énergie, des moyens de production d'électricité et de chaleur, ainsi que des infrastructures adaptées pour stocker et transporter ces énergies. Ce type de maison pourra donc accueillir :

- Des modules solaires photovoltaïques installés sur le toit ou sur les façades fortement exposées au soleil, qui permettent de produire de l'électricité.
- Des capteurs solaires thermiques qui transmettent l'énergie solaire reçue à un fluide caloporteur, pour produire de la chaleur.
- Des aérogénérateurs comme les technologies micro-éoliennes pour produire de l'électricité.
- Utilisation de l'énergie géothermique pour récupérer la chaleur, en utilisant souvent l'eau comme véhicule thermique.
- Utilisation de la biomasse (chaudière à cogénération biomasse fonctionnant à partir de bois ou d'huile par exemple) pour produire de l'électricité et de la chaleur.

I.5. Eléments constituant le système hybride de la maison proposée

Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesels sont les principaux constituants d'un système hybride. Les convertisseurs, les charges et une forme de gestion d'énergie font également partie du système. Des batteries sont habituellement utilisées pour le stockage d'énergie électrique. Une description des composants utilisés dans notre système hybride de la maison isolé est donnée ci-après.

I.5.1. Energie solaire photovoltaïque

a) Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique à travers les cellules photovoltaïques, sous forme de courant continu [60]. Ces cellules sont associées pour former un module photovoltaïque et une association de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque, les panneaux sont finalement interconnectés entre eux pour constituer un générateur photovoltaïque [28, 74]. La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil.

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien Italien

Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [74]. L'effet photovoltaïque, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel et Einstein a expliqué les mécanismes en 1912. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première Cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [6], et c'est en 1973 que La première maison alimentée par des cellules PV était construite à l'Université de Delaware aux États-Unis.

b) Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque consiste en la transformation de la lumière en énergie électrique au moyen de cellules photovoltaïques (appelée aussi, cellule solaire ou photopile). Une cellule est fabriquée à partir de matériaux semi conducteurs d'habitude du silicium [77]. Il s'agit d'une structure en deux couches dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons [60].

Lorsqu'un photon ayant suffisamment d'énergie est absorbé par le semi-conducteur (Figure I.1), il produit la rupture d'une liaison de valence et libère ainsi un électron, ce qui crée un trou positif. Ces charges sont ensuite séparées par le champ électrique au niveau de la jonction NP, puis se dirigent vers les contacts électriques correspondants. En reliant les deux couches, à travers un circuit électrique, on obtient un mouvement des électrons qui passent d'une couche à l'autre et créent ainsi un courant électrique [77].

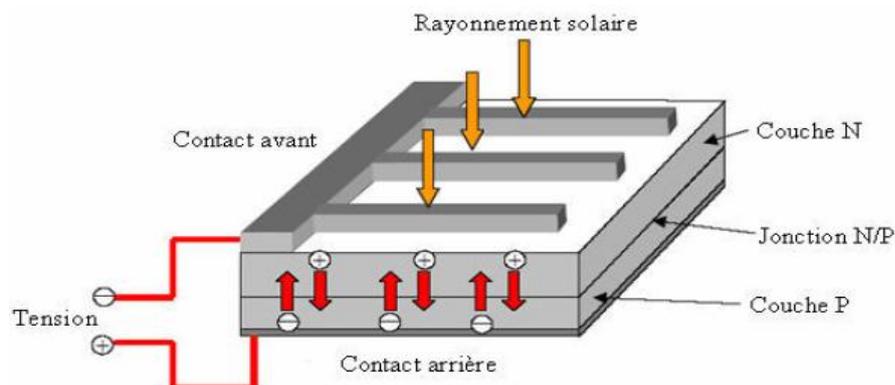


Figure I.1. Principe de l'effet photovoltaïque.

c) Types de systèmes photovoltaïques

En fonction du service et des applications recherchées les systèmes photovoltaïques peuvent être classifiés comme suit :

Autonomes : Les systèmes photovoltaïques autonomes sont des systèmes qui alimentent l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique et sans dépendre d'aucune autre source d'énergie (Figure I.2). Dans la majorité des cas, les systèmes autonomes exigent des batteries de stockages [74, 27], ils sont souvent utilisés dans les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne....

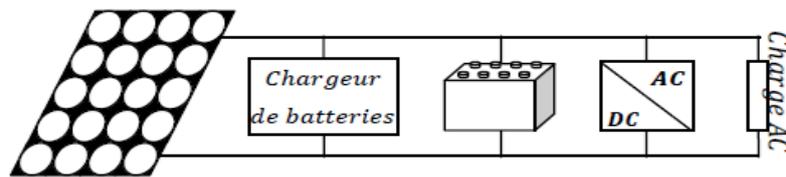


Figure I.2. Système photovoltaïque autonome.

Hybride : L'énergie photovoltaïque peut être ajoutée à d'autres sources d'énergies comme l'éolienne, le diesel... (Figure I.3), et cela afin de fournir la puissance pendant 24 heures économiquement et efficacement. L'intégration de ces sources d'énergie forme un système énergétique hybride, qui est une excellente option pour assurer la continuité du service électrique et avoir plus d'énergie avec un coup réduit [80, 6].

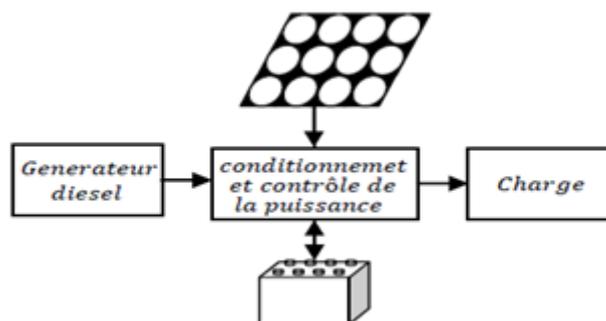


Figure I.3. Systèmes photovoltaïque hybride.

Connecté au réseau : Dans ce cas, des panneaux solaires photovoltaïques sont reliés à un réseau par des convertisseurs électriques (Figure I.4). Un système PV connecté au réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel

il s'approvisionne au besoin. Ces systèmes peuvent être petits, tels que les systèmes résidentiels, ou des grands systèmes cas d'une centrale électrique photovoltaïque [80].

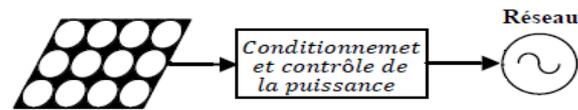


Figure I.4. Systèmes photovoltaïque connecté au réseau.

d) Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse, elle est connue par ses multiples avantages en tant qu'énergie inoffensive, la plus convenable pour les sites isolés, une énergie verte (aucune émission, aucune combustion ou carburant radioactif, ne contribue au changement climatique ou à la pollution global), en plus les panneaux photovoltaïques son connus par leur durée de vie élevée (garantie de fonctionnement des modules 25 ans), en plus ils ne présentent aucun danger au niveau de l'installation ou de l'exploitation [80].

Par contre leurs inconvénients majeur est leurs efficacité et leurs coût élevé. Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque dans sa limite ne dépasse pas les 38% et ceux qui se trouvent sur le marché travaillent dans l'intervalle de rendement [5% à 18%]. On peut récapituler les avantages et les inconvénients des panneaux et d'énergie solaire dans ce tableau :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • D'un point de vue écologique, le panneau solaire photovoltaïque contribue à la réduction des émissions de CO₂, à la réduction des rejets polluants et à la préservation des ressources naturelles. • L'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole qui sont pourtant encore plus utilisés que le solaire. • Pour les endroits isolés ou les petites 	<ul style="list-style-type: none"> • les panneaux solaire sont momentanément trop onéreuses, l'installation de panneaux solaires sur notre toit n'est intéressante qu'à la condition de pouvoir bénéficier de subsides. • Un inconvénient mineur est que la fabrication de certaines cellules solaires nécessite des produits polluants (ex : des solvants). La pollution ainsi causée est cependant négligeable si l'on tient compte des avantages écologiques que procurent ces

<p>installations, rien de tel que les panneaux solaires pour les rendre autonomes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les panneaux solaires, une fois installés, demandent très peu d'entretien et l'énergie est produite sans action de l'homme. • Les panneaux solaires ont une forte marge d'évolution et peuvent représenter un très bon investissement pour des particuliers. • Les panneaux solaires restent silencieux et non dérangeants pour les riverains voisins, ce qui n'est pas le cas de toutes les sources d'énergie. • Les panneaux solaires photovoltaïques sont recyclables. • Les systèmes de panneaux solaires photovoltaïques simples et rapides à installer, ils ne présentent aucun danger au niveau de l'installation ou de l'exploitation. 	<p>cellules solaires.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une fiabilité basse des éléments auxiliaires (les batteries de stockage), à l'encontre des panneaux eux-mêmes. • Le rendement de conversion d'un module est faible même très faible pour les panneaux à usage public, en plus le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans). • L'énergie solaire n'est pas compétitive lorsqu'il s'agit de production importante d'énergie, car de grandes superficies de panneaux solaires sont requises pour la produire. • L'énergie solaire est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons.
---	--

Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

I.5.2. Energie éolienne

a) Description de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne ou encore un système éolien, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [6]. Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le

rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, champ d'application, et création d'emplois [28]. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet.

Le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin, en moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année. Il convient alors de diviser par 5 la puissance installée pour obtenir la puissance réelle moyenne [63].

L'origine des éoliennes remonte à la civilisation Perse, du fait que « Eole » est un nom perse qui signifie dieux des vents, depuis l'utilisation des moulins à vent, cette technologie n'a pas cessé d'évoluer. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité était mise au point par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Au début des années quarante, des vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Depuis ce temps-là des études et des recherches ont été faites permettant ainsi une évolution rapide de cette technologie. Il y a eu également une éolienne raccordée au secteur sur les hauteurs d'Alger (Dély-Ibrahim) en 1957. Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes éoliens raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et Afrique du Nord [24].

b) Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [6, 60] :

Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, appelé aussi la tour, il supporte le poids de l'ensemble, ou à l'intérieur sont disposés les câbles pour transporter l'énergie électrique. Le mât doit être le plus haut possible car le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles près du sol. une tour peut mesurer jusqu'à 80 m de haut pour les éoliennes de grande puissance [6, 63, 60].

La nacelle : montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et électriques nécessaires au fonctionnement de la machine (Figure I.5) [53].

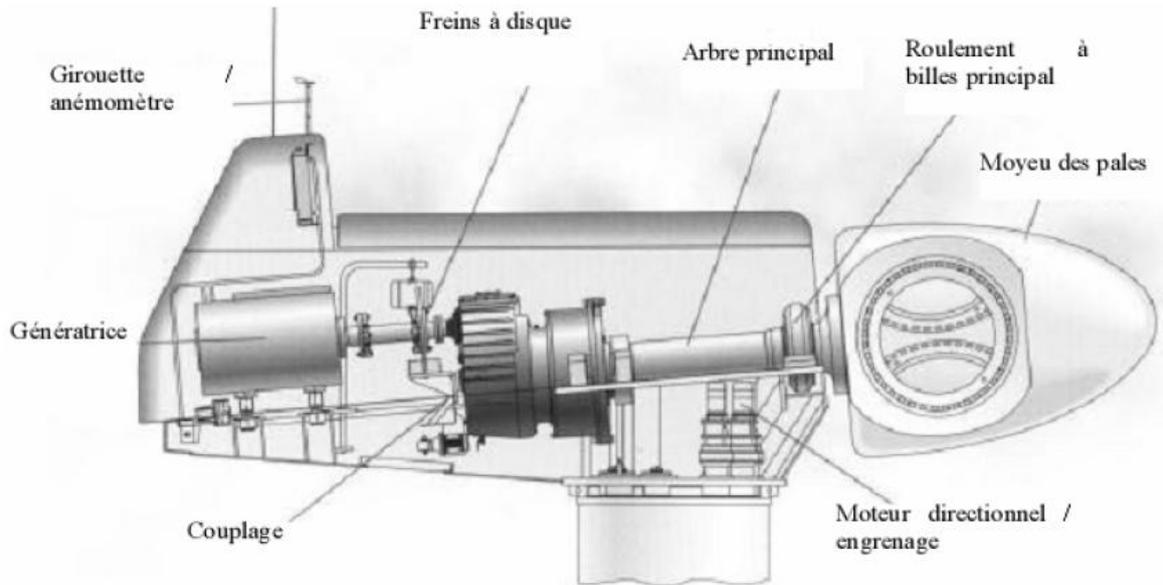


Figure I.5. Constitution d'une nacelle.

Rotor : Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. A trois pales, le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [6].

c) Principe de conversion dans une éolienne

Une éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes (Figure I.6) :

- Au niveau de la turbine (rotor), l'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit cette énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, [44].

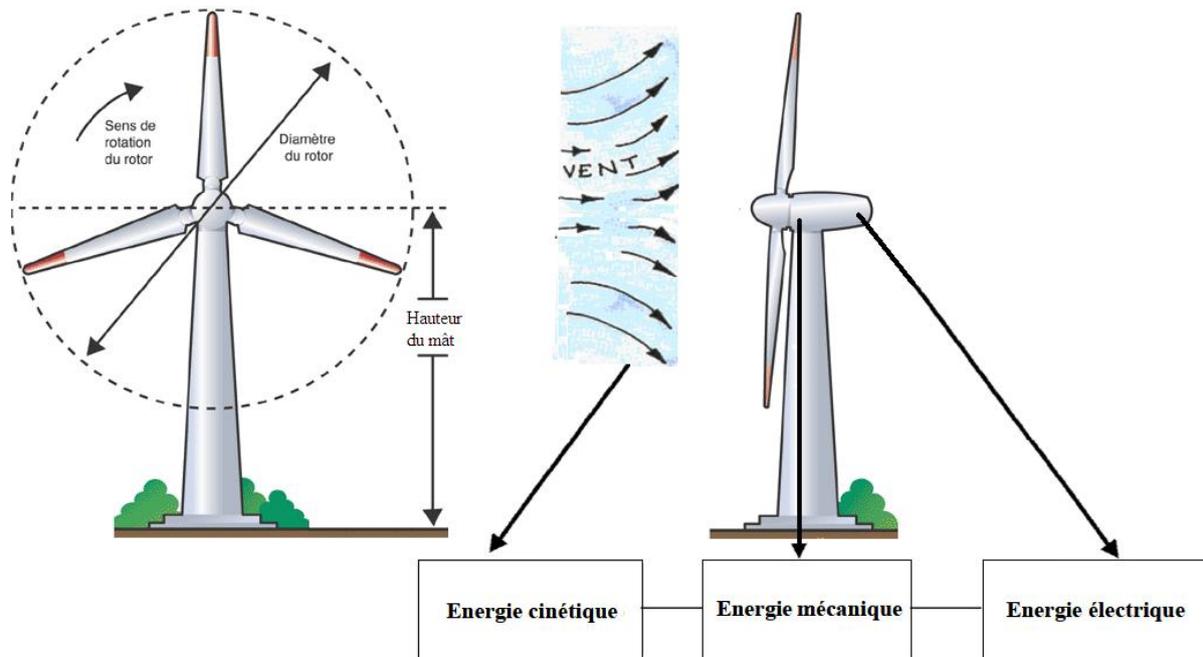


Figure I.6. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

d) Types d'éoliennes suivant la structure

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

Eoliennes à axe verticale

Les éoliennes à axe vertical (Figure I.7) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité [6]. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles, en revanche, l'efficacité globale de ces éoliennes n'est pas impressionnante, ainsi que certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage [63], ce qui rend ce type d'éoliennes très peu répandu et assez mal connu. Il existe principalement trois technologies VAWT: les turbines Darrieus classiques, les turbines Darrieus à pales droites (H-type), et la turbine de type Savonius [80].



Figure I.7. Eoliennes à axe verticale.

Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (Figure I.8) sont de loin les plus utilisées, car elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Outre l'aspect visuel de ces éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne à axe horizontale ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, le niveau sonore d'une éolienne est de 50 dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne [60].

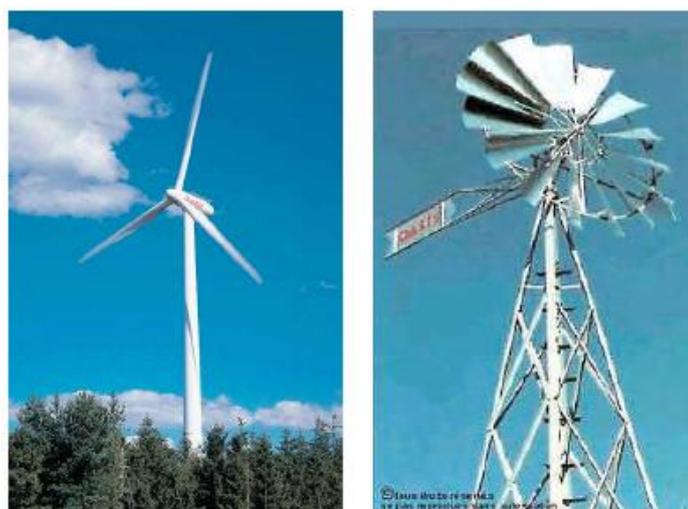


Figure I.8. Eoliennes à axe horizontale.

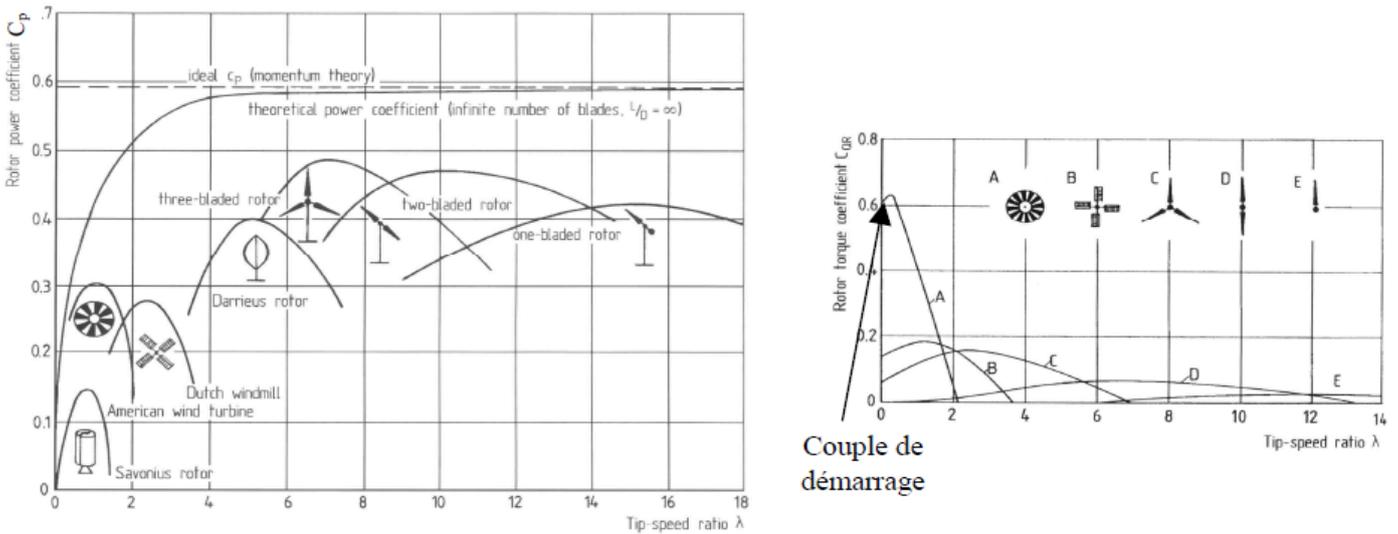


Figure I.9. Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée pour différents types de turbines.

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ

On peut noter ainsi que :

- Les courbes donnant le coefficient de couple montrent que les couples de démarrage sont favorables aux multiples (pompage,...). Il en est de même pour les systèmes à axe vertical.
- Les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en termes de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...).
- Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (3, 2, 1) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multiples. Elles sont donc moins sensibles aux variations λ autour de λ_{opt} [28].

On peut dire ainsi que les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multiples sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur

efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement [80].

e) Types d'éoliennes suivant la vitesse

Les éoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées (mess). Dans cette technologie, la génératrice électrique est directement couplée au réseau, sa vitesse est sensiblement constante, elle est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice [80]. Le maintien de la vitesse fixe est assuré par un système mécanique d'orientation des pales [23].

Les éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes a vitesse variables sont principalement installé afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglages [23], ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesses nominale, souvent, ils sont moins coûteux, car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire [60].

Si on considère les courbes représentant la puissance de l'éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω , il apparaît clairement l'importance du réglage de la vitesse variable. En effet, la Figure I 4 montre que la position du maximum de puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage de vitesse par des stratégies de commande est nécessaire pour maximiser la puissance électrique quelle que soit la vitesse du vent. Nous verrons dans ce qui suit différents ensembles convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie [1,6].

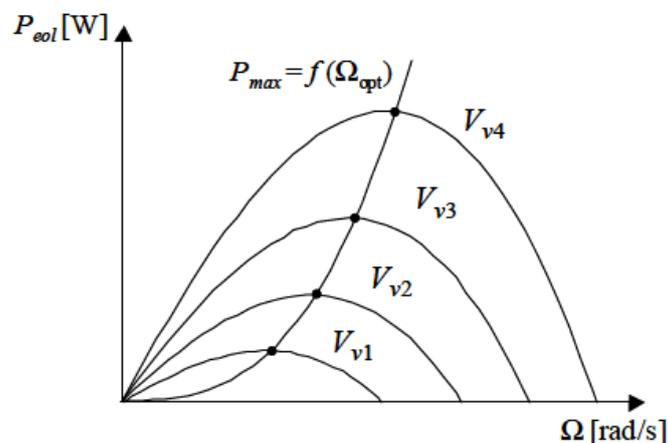


Figure I.10. Caractéristique Puissance-vitesse de rotation d'une éolienne pour différentes vitesses du vent.

Pour aboutir à optimiser la puissance éolienne dans le but de maximiser l'énergie captée, deux types de régulation sont utilisés, mécanique et électrique. Les régulations mécaniques se résument en trois systèmes pour les grandes éoliennes :

- Système Pitch ou à angle de calage variable.
- Système Stall ou à décrochage aérodynamique.
- Système Stall actif ou à décrochage aérodynamique actif.

Et un système de calage des pales ou d'orientation face au vent pour les petites éoliennes.

Les méthodes de régulations électriques utilisent des techniques de poursuite du point de puissance maximale (dites MPPT), appliquées sur les convertisseurs d'énergies électriques. Ces techniques font varier la vitesse de rotation de la génératrice à travers le convertisseur, afin de maximiser la puissance éolienne, ou bien de garder le coefficient de puissance C_p maximum. Plusieurs techniques MPPT sont développées dans la littérature, elles varient suivant l'architecture de la chaîne de conversion électrique.

f) Types d'éoliennes suivant la puissance

Une classification des éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leurs hélices est établie dans le tableau suivant [63]:

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
moyenne	12 m à 45 m	40 KW à 1MW
grande	46 m et plus	1MW et plus

Tableau I.3. Classification des d'éoliennes suivant leur puissance.

g) Le fonctionnement couplé ou non au réseau électrique

C'est dans les grandes puissances que l'on rencontre des systèmes raccorder au réseau [28], pour cela, plusieurs structures existent. Le principal avantage des systèmes couplés au réseau est qu'ils permettent de revendre l'énergie produite et non consommée sur place au fournisseur du réseau. Par contre, ces systèmes ne peuvent fonctionner qu'en présence du réseau. Dans le cas d'une coupure de ce dernier, bien qu'ayant son propre système de production d'électricité, le producteur indépendant se trouve privé d'électricité [60].

Pour les sites isolés, l'énergie éolienne peut être très utile en fonctionnant seule, ou associée à d'autres sources d'énergie [80]. Le producteur consommateur isolé du réseau est tributaire des conditions météorologiques. Ainsi, si l'on a plusieurs jours successifs défavorables à la production d'électricité, le producteur consommateur risque également d'être privé d'électricité. Au contraire, si les conditions sont favorables à la production et que toute la capacité de stockage est totalement utilisée, il doit arrêter de produire et donc délester sa production. Afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut multiplier les sources de natures différentes. On obtient alors un système dit multi source [60].

h) Types d'éoliennes suivant la génératrice

Les machines asynchrones (MAS) sont les machines les plus répandues, elles représentent le choix par excellence à cause de leur faible coût, robustesse et simplicité de fabrication. 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. Dans les aérogénérateurs de dimensions importantes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Environ 85% de ces applications en éolien sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique comme le montre la Figure [54, 1].

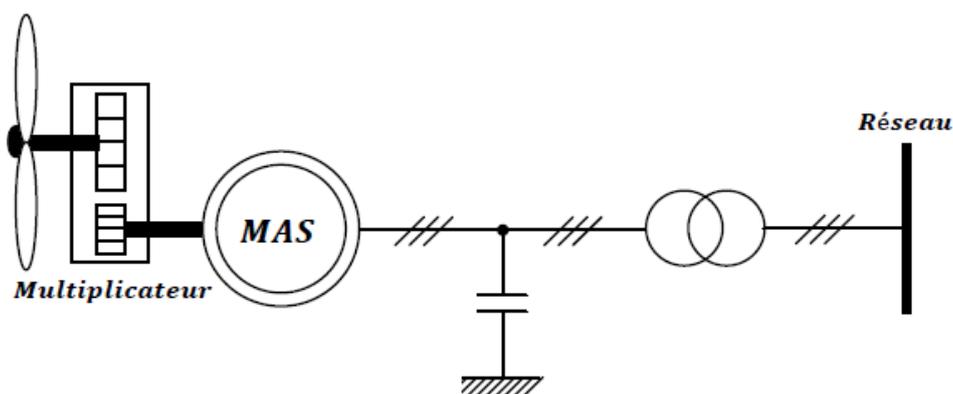


Figure I.11. Chaîne de conversion à génératrice asynchrone fonctionnant à vitesse fixe.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est la machine la plus utilisée dans le domaine des systèmes éoliens connectés au réseau [80]. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à

cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines [54].

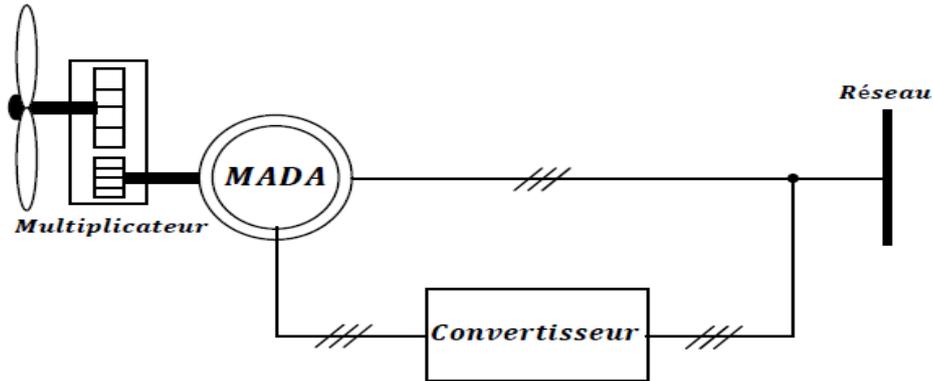


Figure I.12. Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à double alimentation.

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

En utilisant les machines synchrones, on élimine les problèmes du multiplicateur mécanique (siège de perte de puissance et source de bruit). Elles sont les mieux adaptées pour les systèmes d'entrainements directs, et connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par le convertisseur. Leur inconvénient majeur réside dans l'entretien régulier de système des bagues et balais.

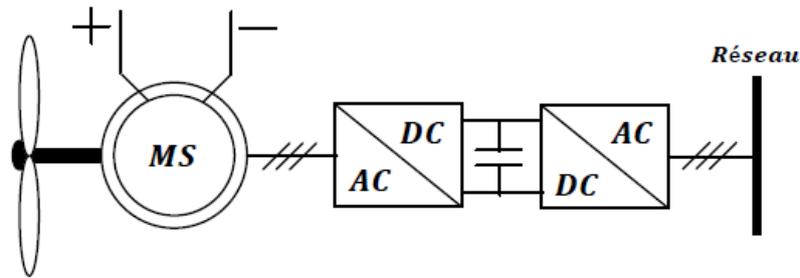


Figure I.13. Chaîne de conversion à générateur synchrone et convertisseurs de fréquence.

Pour surmonter les problèmes du système des bagues et balais, et pour des raisons de compacité et de rendement ; les génératrices synchrones à aimants permanents (MSAP) apparaissent avec le développement des matériaux magnétiques. Dans les applications éoliennes, ces systèmes présentent de nombreux avantages par rapport aux autres types de machines électriques : robustesse, couple massique élevé, en plus un taux de défaillance très réduit, grâce à la suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais. Leur vitesse de rotation est différente à celle liée à la fréquence du réseau d'où l'obligation de la présence de l'électronique de puissance. Cette dernière permet une régulation simple de la vitesse de rotation, et donc une optimisation efficace de la puissance éolienne.

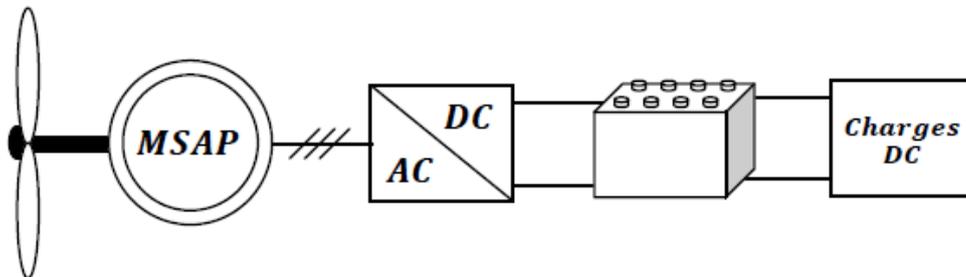


Figure I.14. Eolienne basée sur une génératrice à aimant permanent débitant directement sur des batteries.

i) Avantages et inconvénients des différentes génératrices

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des différents types de génératrices utilisés pour la conversion de l'énergie éolienne [23] :

Type de génératrice éolienne	Avantages	Inconvénients
<p>MAS Vitesse fixe</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Machine robuste. -Faible cout. - Pas d'électronique de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> -Puissance extraite non optimisée. -Maintenance boite de vitesse. -Pas de contrôle de l'énergie réactive. -Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
<p>MADA Vitesse variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Fonctionnement a vitesse variable -Puissance extraite optimisée -Machine standard -Connexion de la machine plus facile à gérer -Une magnétisation de la machine gérer en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> -Maintenance boite de vitesse. -Prix de l'électronique de puissance. -Contrôle –commande complexe. -Contact glissant bagues – balais.
<p>MSAP Vitesse variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse. -Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. -Connexion de la machine facile à gérer. -Possibilité d'absence de boite a vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> -Prix d'électronique de puissance. -Machine spécifique Grand diamètre de la machine.

Tableau I.4. Avantages et inconvénients des différentes génératrices

I.5.3. Générateur diesel

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un générateur électrique. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes, ils peuvent être mobiles ou installés à des postes fixes.

Les groupes électrogènes produisent du dioxyde de carbone, un gaz asphyxiant, ainsi que du monoxyde de carbone, extrêmement toxique et de plus quasi indétectable, c'est pour cela qu'il faut l'utiliser dans un lieu suffisamment aéré. Ne jamais l'utiliser sous pluie ou neige, cela peut provoquer des courts circuits et des dommages à l'appareil. Le générateur ne doit pas utiliser à proximité de liquides inflammables ou feu.

Les groupes électrogènes sont utilisés en tant que sources d'énergie électrique autonomes,

En complément d'une alimentation sans interruption dans le but de palier une éventuelle coupure d'alimentation électrique (source de secours) , cette coupure entraîne généralement des conséquences graves ou des pertes financières, par exemple dans les hôpitaux, l'industries, les banques ...

Comme fourniture d'énergie auxiliaire pour limiter la puissance de pointe absorbée sur le réseau d'énergie.

Dans des zones non couplées à un réseau électrique pour assurer la continuité de production d'énergie électrique et diminué son prix, il est nécessaire d'ajouter avec le générateur diesel des sources d'énergies renouvelables.

Dans les véhicules hybrides électriques – thermiques qui semblent appelés à connaître un important développement dans un futur proche.

a) Groupe électrogène fonctionnant à vitesse fixe

Le groupe électrogène diesel est constitué par un moteur diesel directement couplé à une génératrice synchrone (Figure I.15). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse de rotation du moteur diesel et donc du générateur constante [77].

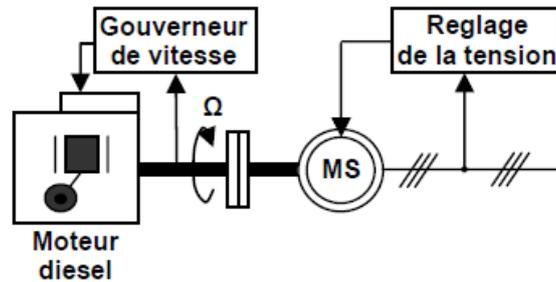


Figure I.15. Groupe électrogène diesel basé sur une machine synchrone.

b) Groupe électrogène fonctionnant à vitesse variable

Les groupes électrogènes fonctionnant à vitesse variable sont basés sur l'association d'un générateur fonctionnant à vitesse et puissance variables entraîné par un moteur diesel et un convertisseur AC/AC qui alimente une charge électrique à fréquence et puissance variables.

I.5.4. Système de stockage

A cause de la non disponibilité permanente des énergies renouvelables, et la consommation journalière de l'énergie, avec ses creux et ses pointes, on utilise depuis fort longtemps des installations de stockage pour répartir quelque peu la production continue. Le stockage d'énergie est en général assuré par des batteries, l'utilisation de ces dernières garantit une disponibilité permanente et constante de l'énergie quelles que soient les conditions atmosphériques ou l'horaire du moment [59]. Elles sont très utiles dans de nombreuses applications électriques. Les systèmes hybrides des maisons isolées sont l'une de ces applications

La batterie dans un tel système doit remplir trois fonctions importantes :

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants (par exemple: un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV). Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant toute fluctuation de tension causée par les sources d'énergie renouvelable.

L'utilisation des batteries électrochimiques dans un système hybride est très répandue et en plein essor, notamment avec le développement du véhicule électrique. Les grandes familles d'accumulateurs disponibles sont actuellement celles au plomb acide et au sodium à électrolyte d'alumine (*NaS*). Les batteries au plomb acide sont la solution la plus rentable et la plus connue, étant utilisée depuis plus de 150 ans pour fournir le courant de démarrage des voitures (une cellule au plomb-acide peut fournir une tension nominale de 2,0 volts), mais elles ont des cycles de vie limités, des densités énergétiques basses et de faibles rendements. En plus, un convertisseur DC/AC est indispensable pour interfacer une batterie avec un système à courant alternatif, car elle stocke le courant continu.

I.5.5. Le système de commande et de supervision

Vu le caractère aléatoire des conditions climatiques (la température ambiante, l'éclairage, la vitesse du vent...) et de la consommation énergétique, un ajustement en temps « réel » est nécessaire, pour gérer automatiquement et de manière optimale l'énergie électrique produite par les générateurs PV et éolien, Démarrer et arrêter automatiquement le générateur diesel de secours au besoin, et l'ajustement de son point de fonctionnement. Ainsi, les chargeurs de batteries, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Le bus continu doit aussi maintenir une tension stable à ses bornes, cela est assuré par les batteries, à travers la commande d'un convertisseur d'énergie intercalé entre les deux.

La tension sinusoïdale assurée par l'onduleur, après le bus continu, doit répondre à certaines normes. Le système de commande veille pour que l'amplitude, la fréquence et le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension aux bornes de la charge soit normatif, pour ne pas détériorer les appareils domestiques.

Pour assurer ces commandes, la maison doit être largement dotée d'un système de commande et de supervision automatique et d'instruments de mesures. Des capteurs doivent permettre d'obtenir les conditions météorologiques (la température ambiante extérieure, l'éclairage et la vitesse du vent). D'autres capteurs doivent transmettre les mesures de courants et les tensions au niveau de : la chaîne de production photovoltaïque, la chaîne de production éolienne, le générateur diesel, les batteries et le bus continu [80].

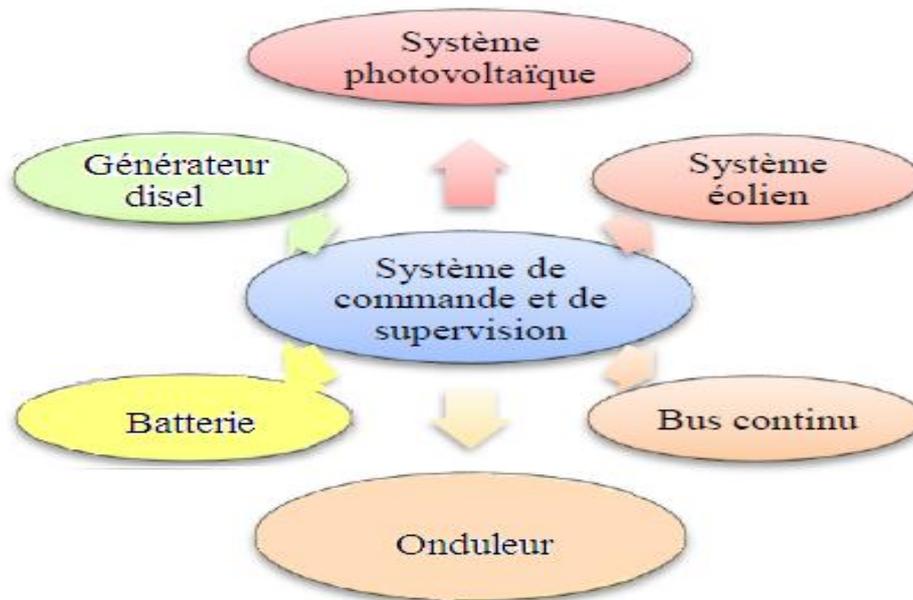


Figure I.16. Schéma synoptique de système de commande et supervision.

I.5.6. Convertisseurs électriques (éléments de gestion)

Dans un système hybride, des convertisseurs sont utilisés pour optimiser et stabiliser l'énergie, charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans un tel système : les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs [77].

a) Les redresseurs (convertisseur AC/DC)

Les redresseurs réalisent la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [80].

Suivant la possibilité d'ajuster la tension de sortie, deux grandes familles de redresseurs peuvent être distinguées:

- Les redresseurs non commandés, ou redresseurs à diodes, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.
- Les redresseurs commandés, ou redresseurs à thyristors, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus

réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes [80].

Dans le SEH, les redresseurs sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source alternative. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement [60,77].

b) Les onduleurs (convertisseur DC/AC)

Les onduleurs réalisent la conversion continu-alternatif; ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges a CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre generateur.Ceux-ci sont les plus flexible, mais sont aussi les plus chers [77].

c) Les hacheurs (convertisseur DC/DC)

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe [80], par exemple, pour adapter la tension entre deux sources [77]. Dans ce type de convertisseurs, on peut faire une distinction entre les hacheurs réversibles et les hacheurs non réversibles :

1. Les hacheurs non réversibles, sont ceux qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge. On distingue :
 - Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$.
 - Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$.
 - Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), qui assure les deux fonctions.

2. Les hacheurs réversibles, dans ce cas une source peut devenir une charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Selon le type de conversion, tension ou courant, on distingue :
 - Les hacheurs réversibles en courant
 - Les hacheurs réversibles en tension
 - Et les hacheurs réversibles en tension et en courant.

I.5.7. Charges

Les charges sont les éléments consommateurs de la puissance électrique pour la rendre utile. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge [80]. Il existe des charges à caractère résistif et d'autre inductif. Les charges résistives incluent les ampoules d'éclairage, les chauffages électrique, les chauffe-eaux etc. les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de la puissance réactive. Des charges à courant continu peuvent exister dans une maison, ils peuvent aussi avoir des composants inductifs [77].

I.6. Conclusion

Cette partie nous a permis de clairement identifier les enjeux, les objectifs et les caractéristiques des maisons performantes, une brève description des systèmes hybrides et leur intégration dans des maisons isolées a été réalisé.

Les principales notions liées à la technologie utilisée dans un système hybride d'une maison isolée ont été données. L'intégration des énergies renouvelables dans un tel système est indispensable pour apporter le gain en énergie. On a étudié, donc , la conception du système hybride en combinons trois source d'énergie (éolien, photovoltaïque et diesel) de production continue de l'énergie électrique dont l'autonomie sera assuré par un système de stockage pour alimenter une maison isolé.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du système hybride d'une maison isolée doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles de façon à maximiser l'utilisation de ces ressources et assurer la disponibilité ainsi que la qualité d'énergie électrique. Dans ce but, les sources du système hybride proposé sont dimensionnées puis modélisées dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II

DIMENSIONNEMENT ET MODELISATION DES COMPOSANTS DU SEH

II.1. Introduction

Les systèmes électriques hybrides (SEH) utilisent différentes sources d'énergie comme l'éolien, le photovoltaïque et le générateur diesel et un système de stockage interconnectés entre eux à travers des convertisseurs. Ce type de systèmes peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté. Dans ce contexte, un dimensionnement correct du SEH, ainsi que l'étude du comportement dynamique du système sont très importants [77].

Avant d'étudier le comportement dynamique de chaque élément du SEH, présenté dans le chapitre suivant, un dimensionnement puis une modélisation de ce dernier est indispensable. Dans ce chapitre, On a dimensionné puis modélisé chaque élément du SEH [80].

II.2. Dimensionnement du SEH

La conception des SEH exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergies, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace.

Les principaux facteurs du dimensionnement sont : les conditions environnementales du site, le profil de charge et la disponibilité de la technologie, ce qui rend les logiciels de dimensionnement des outils indispensables, ils existent plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SEH : HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL, etc....Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes.

Le dimensionnement de notre SEH pour une maison en site isolé dépend évidemment des reoussources énergétiques disponibles ainsi que des contraintes d'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site qui ne pouvaient pas faire l'objet d'une étude complète dans le cadre de ce mémoire. Pour créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter des données disponibles ainsi qu'une stratégie de dimensionnement donnée par [68, CDER].

II.2.1. Le site d'implantation

Le site d'Adrar sur la zone qui comprend le Sahara, au-delà de l'Atlas Saharien (tableau I.1).

Site	Latitude	Longitude	Altitude
Adrar	27.82°N	00.18°W	263.8 m

Tableau II.1. Coordonnées géographiques du site d'Adrar [68].

II.2.2. Caractéristiques de la maison choisie

nous avons choisi une maison type non raccordé au réseau de distribution d'énergie classique et équipée de l'ensemble des appareils permettant de fournir le confort aux occupants. Par ailleurs dans notre cas nous supposons que l'habitation sera occupée en permanence durant toute l'année et que Les équipements domestiques fonctionnent sous une tension standard 220V-50Hz.

II.2.3. L'estimation du besoin énergétique journalier de la maison

La figure II.1 ci-dessous donne l'évolution de la puissance appelée journalière. Nous constatons qu'un appel de puissance est de l'ordre de 1100 watts.

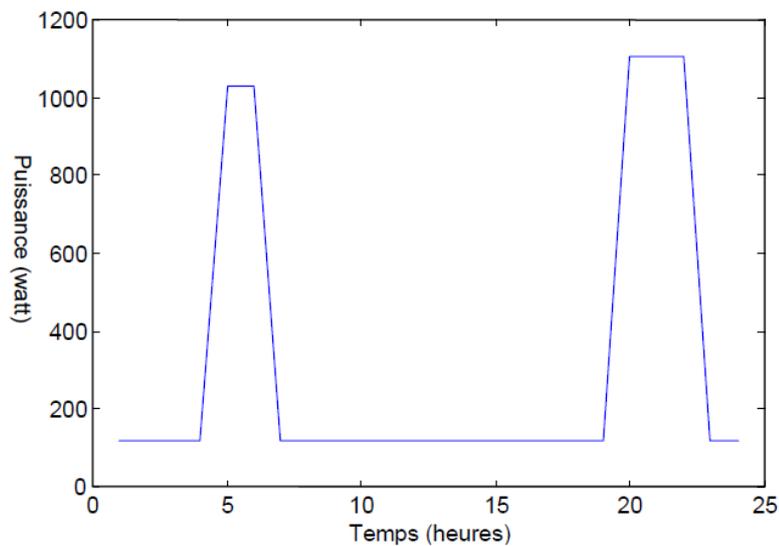


Figure II.1. Evolution de la puissance appelée

Les ressources locales (vitesse du vent et éclairement) du site d'Adrar ainsi que le profil de charge de la maison choisie sur une année pour réaliser le dimensionnement du SEH sont illustrés dans les figures suivantes :

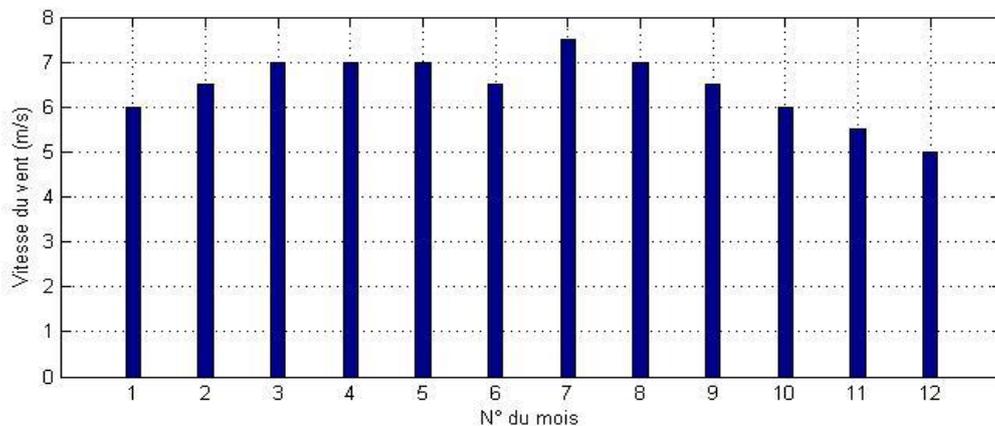


Figure II.2. Profil du vent dans la région d'Adrar [3].

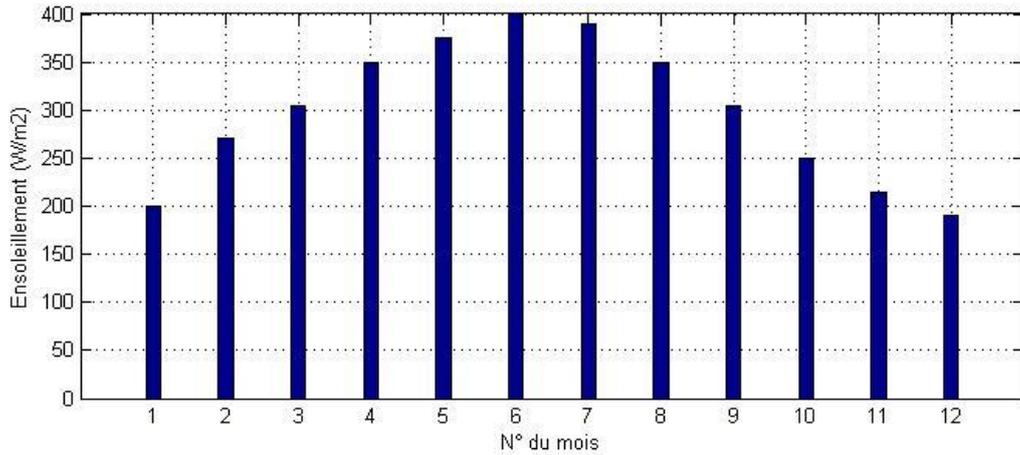


Figure II.3. Profil d'ensoleillement dans la région d'Adrar [47].

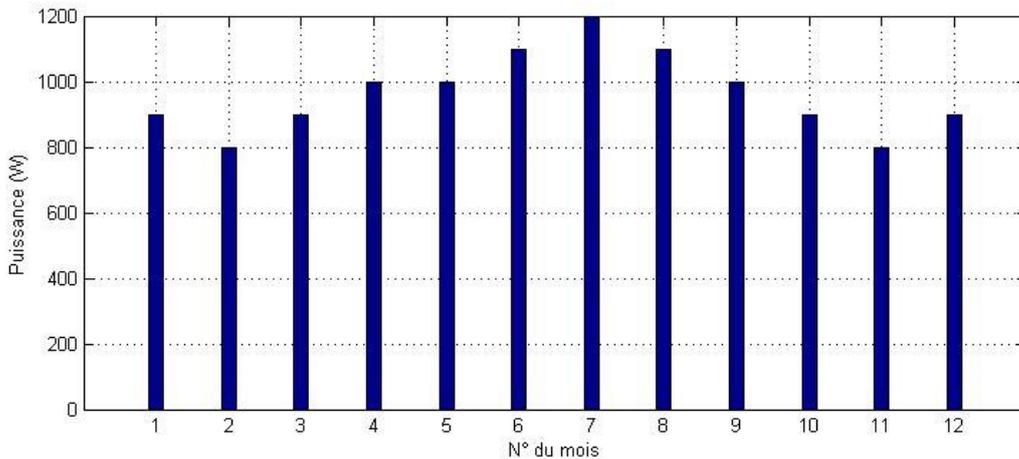


Figure II.4. Profil de charge de la maison.

Les figures II.2. et II.3. présentent les profils de vent et ensoleillement avec une valeur moyenne de la vitesse du vent de 6.5 m/s et une valeur moyenne de 300 W/m^2 pour l'ensoleillement.

Le profil de charge à alimenter en électricité est illustré dans la figure II.4, il s'agit d'une charge avec une valeur moyenne de 1100 W et un pic de puissance instantané de 1300 W au maximum.

Generateur diesel : pour subvenir à ce pic sans oublier les pertes des convertisseurs et une marge de sécurité de 20% il nous faut un GD de 1800 W .

Energies renouvelables : pour subvenir à ce pic sans oublier les pertes des convertisseurs et une marge de sécurité de 30% il nous faut un système E.R de 2000 W .

Puisque le site de Adrar est caractérisé par des vitesses de vent assez fortes pour une éolienne donc 1400 W seront assurée par celle-ci et 600 W par les panneaux photovoltaïques.

D'après Les figures II.2. Et II.3. le mois le plus défavorable en vue des énergies renouvelables et le mois de Décembre avec une vitesse de vent 5.5 m/s et un ensoleillement de 200 W/m^2 . Il nous faut donc :

- Une éolienne qui produit une puissance électrique de 1400 W à une vitesse du vent de 5.5 m/s . Choisissons 6.5 m/s comme vitesse de vent nominale on trouve que la puissance électrique nominale correspondante est 3600 W pour la MASP
- Des panneaux photovoltaïques qui produisent au moins 800 W à un ensoleillement de 200 W/m^2 .

Et donc en récapitulant :

- une machine synchrone à aimant permanent d'une puissance nominale de 3600 W .
 - 40 modules photovoltaïques d'une puissance de 80 W à un ensoleillement de 1000 W/m^2 .
 - 7 batteries de stockage d'une tension nominale de 12 V et une capacité de 28 AH .
 - Un générateur diesel d'une puissance nominale de 1800 W .
- (Détailé dans l'Annexe B)

II.3. Modélisation de la chaîne photovoltaïque

II.3.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Il est réalisé par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires). La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier [80].

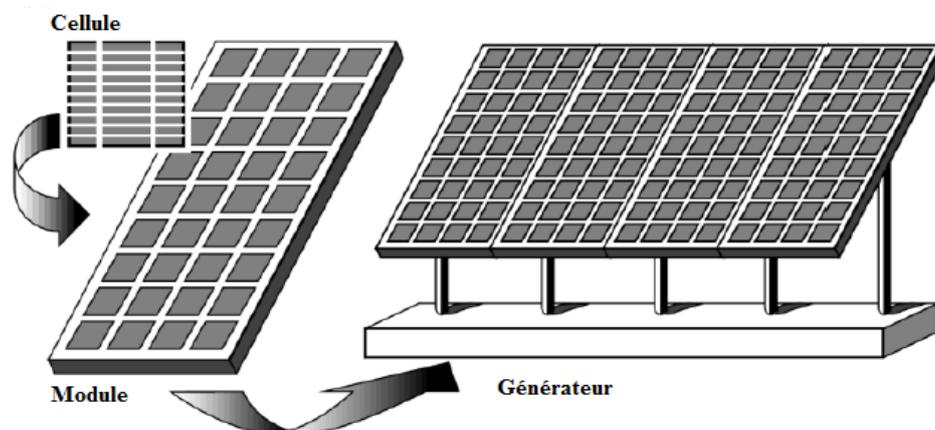


Figure II.5. Composantes d'un générateur photovoltaïque.

Le model d'un générateur photovoltaïque se base essentiellement sur le model d'une cellule photovoltaïque voyant d'abord donc le modèle mathématique de cette dernière.

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques d'une cellule photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes), Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres pris en compte [60].

Nous avons choisi le modèle à une diode qui est le plus classique et le plus utilisé. Ce modèle fait intervenir une source de courant qui génère un courant proportionnel à l'éclairement (G_a), une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule complété par une résistance série (R_s) et une autre shunt (R_{sh}) pour les pertes comme le montre le schéma équivalent de la figure II.6. [28].

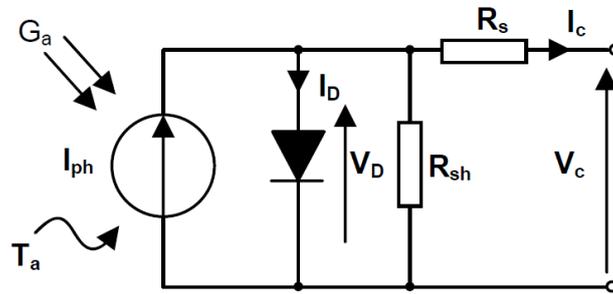


Figure II.6. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (model à 1^e diode).

Le courant I_c fournit par la cellule (figure ci-dessus) a pour expression :

$$I_c = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (II.1)$$

Ou:

I_c : Le courant fourni par la cellule (A) ;

I_{ph} : Le Photo-courant de cellule(A) ;

I_D : Le courant direct de la diode (A) ;

I_{Rsh} : Courant traversant la résistance shunt ;

Le photo-courant de la cellule (I_{ph}), le courant direct de la diode (I_D) et le courant traversant la résistance shunt (I_{Rsh}), ont pour expression respectivement :

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G_a}{1000} \right) \quad (II.2)$$

I_{sc} : Courant de court-circuit de la cellule photovoltaïque à 25°C et 1000W/m²

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(q \frac{V_c + I_c R_s}{n K T_c} \right) - 1 \right) \quad (II.3)$$

$$I_{Rsh} = \left(\frac{V_C + R_S I_C}{R_{Sh}} \right) \quad (II.4)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode ;

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) ;

K : La constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23}$ J/K) ;

n : Constante de qualité de la diode ;

T_C : Température de la jonction(K);

V_C : La tension aux bornes de la cellule(V) ;

D'après les équations (II.1), (II.2), (II.3) et (II.4), le courant de la cellule photovoltaïque I_C en fonction de la tension V_C est décrit par l'équation suivante :

$$I_C = I_{sc} \frac{G}{1000} - I_0 \left(\exp \left(q \frac{V_C + I_C R_S}{n K T_C} \right) - 1 \right) - \frac{V_C + R_S I_C}{R_{Sh}} \quad (II.5)$$

La résistance shunt peut être négligée ($R_{Sh} = \infty$) puisque habituellement elle est très grande devant la résistance série, on aura alors le modèle de la figure (II.7) :

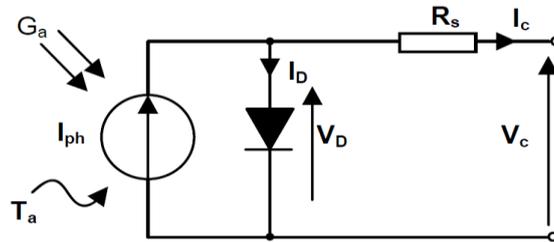


Figure II.7. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV (modèle simplifié à 1° diode).

L'équation (II.5) devient :

$$I_C = I_{sc} \frac{G}{1000} - I_0 \left(\exp \left(q \frac{V_C + I_C R_S}{n K T_C} \right) - 1 \right) \quad (II.6)$$

Le modèle final de la cellule ou $I_C = f(V_C)$ (modèle après simplification de (II.6)) est donné par l'équation [80] :

$$I_C = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{V_C}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right) \right) \quad (II.7)$$

Ou :

C_1 et C_2 sont deux constante données par :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{sc}}\right) \left(\exp\left(\frac{-V_{MPP}}{C_2 V_{oc}}\right)\right) \quad (II. 8)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_{MPP}}{V_{oc}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{sc}}\right)} \quad (II. 9)$$

Avec :

I_c et V_c respectivement courant et tension de la cellule photovoltaïque;

I_{sc} et I_{MPP} sont respectivement les courants de court circuit et le courant de puissance maximale ;

V_{oc} et V_{MPP} sont respectivement les tensions de circuit ouvert et de puissance maximale.

Le résultat obtenu lors de la simulation sous MATLAB d'un tel modèle de cellule peut être représenté comme suit :

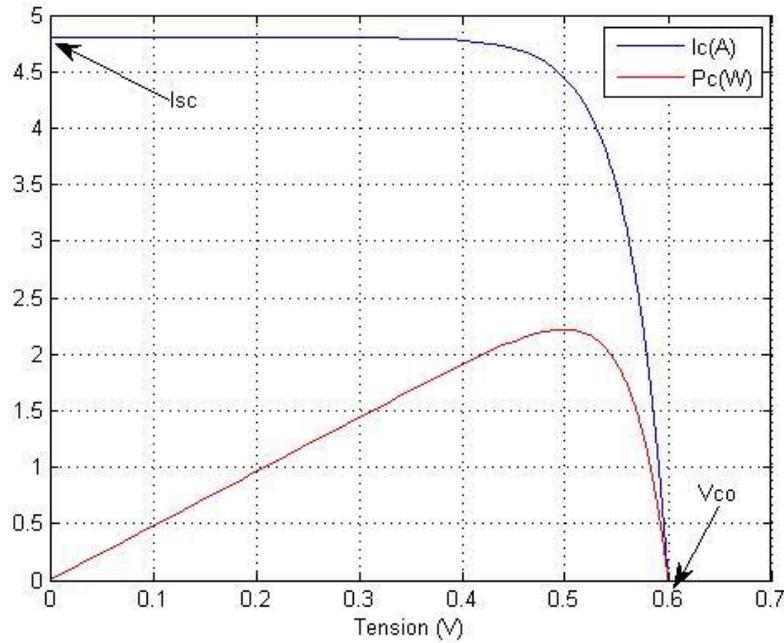


Figure II.8. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la cellule photovoltaïque avec $G = G_{ref} = 1000W/m^2$, $T = T_{ref} = 25^{\circ}C$

II.3.1.1 Influence de l'éclairement et de la température sur la cellule PV

L'équation (II.7) représente la caractéristique $I-V$ de la cellule à une température et à un éclairement de référence, $25^{\circ}C$ et $1000 W/m^2$. Si l'éclairement et la température varient, le point (I_{MPP}, V_{MPP}) de la courbe de référence se translate en un autre point (I_n, V_n) tel que :

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta I = \alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \\ \Delta V = -\beta \Delta T - R_S \Delta I \end{cases} \quad (II.10)$$

Et

$$\begin{cases} V_n = V_{ref} + \Delta V \\ I_n = I_{ref} + \Delta I \end{cases} \quad (II.11)$$

La courbe définie par l'équation (II.7) se translate elle aussi et sera définie par l'équation :

$$I_n(V_n) = I_{ref}(V_n - \Delta V) + \Delta I \quad (II.12)$$

Donc

$$I_c = I_{sc} \left(1 - c_1 \left(\exp \left(\frac{V_c - \Delta V}{c_2 V_{oc}} \right) - 1 \right) \right) + \Delta I \quad (II.13)$$

Ou :

α et β sont les coefficients de température du courant et de la tension respectivement ;

G et G_{ref} sont l'ensoleillement et l'ensoleillement de référence (W/m^2), respectivement ;

T et T_{ref} sont respectivement la température et la température de référence de la cellule ($^{\circ}C$);

I_{sc} et I_{MPP} sont respectivement les courants de court circuit et de puissance maximale ;

V_{oc} et V_{MPP} sont respectivement les tensions de court circuit et de puissance maximale ;

R_S est la résistance série (Ω).

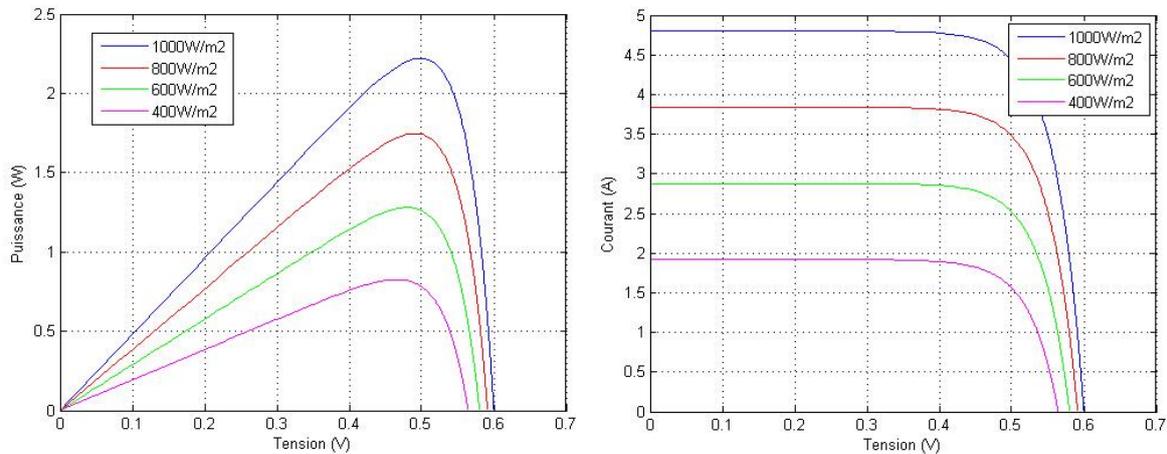


Figure II.9. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

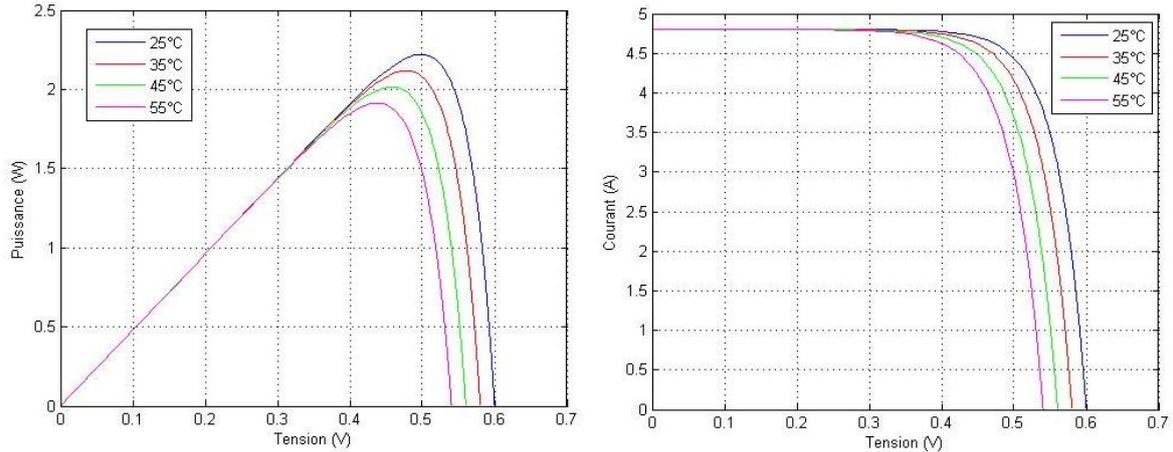


Figure II.10. Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Ces résultats montrent bien que la puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules; encapsulées avec divers matériaux pour les protéger; pour avoir une puissance exploitable. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques Watts crête et quelques dizaines de Watts crête (1m² de cellules PV produit de l'ordre de 100W) [56].

Pour N_p cellule en parallèle et N_s cellule en série (générateur PV) on aura :

$$I_{sc}^G = N_s I_{sc}^c \tag{II.14}$$

$$V_{oc}^G = N_p V_{oc}^c \tag{II.15}$$

$$R_s^G = \frac{N_s}{N_p} R_s^c \tag{II.16}$$

I_{sc}^G et V_{oc}^G sont respectivement le courant de court circuit et la tension à vide du générateur PV; I_{sc}^c et V_{oc}^c sont respectivement le courant de court circuit et la tension à vide de la cellule PV ; R_s^G et R_s^c sont respectivement la résistance interne du générateur PV et de la cellule PV.

Le résultat obtenu lors de la simulation sous MATLAB d'un tel modèle du *Panneau Shell SQ75 (36 cellules en série)* est représenté ci-dessous figure (II.11) :

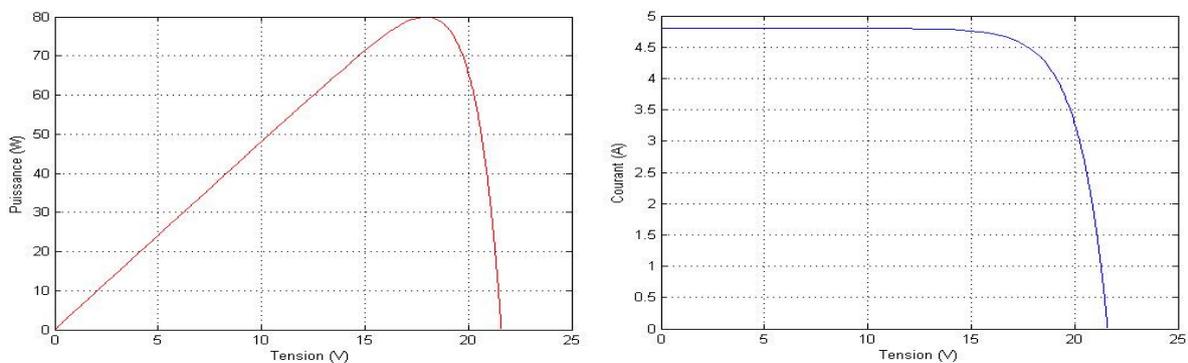


Figure II.11. Caractéristiques puissance-tension (à gauche) et courant-tension (à droite) d'un panneau photovoltaïque.

II.3.2. Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost »

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [63].

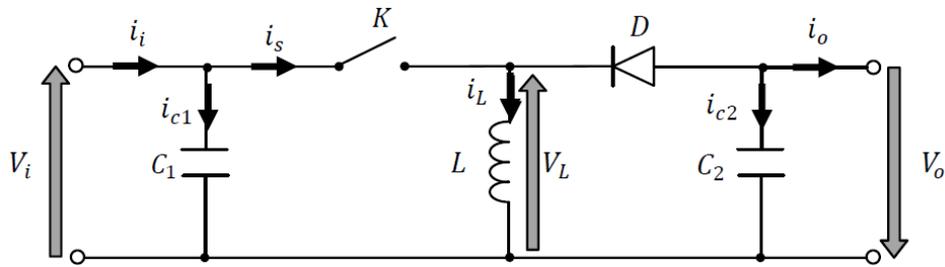


Figure II.12. Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur K :

- Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance. Dans ce cas $d \in [0, dT_s]$ le circuit équivalent est montré sur la figure II.13 :

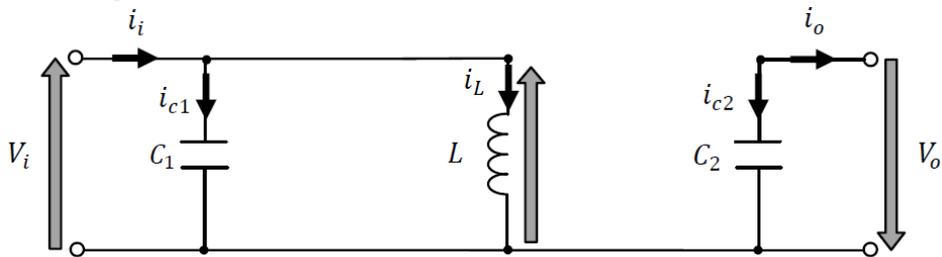


Figure II.13. Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque K est fermé.

Avec :

d est le rapport cyclique.

T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$ (f_s : la fréquence du hachage).

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (II.17)$$

- Dans l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge. Dans ce cas $d \in [dT_s, T_s]$ le circuit équivalent apparaît dans la figure (II.14) :

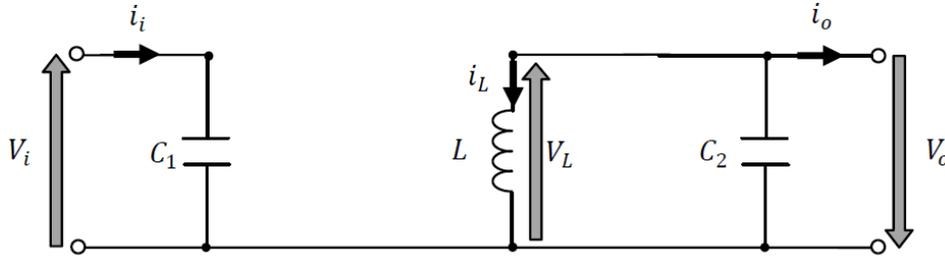


Figure II.14. Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque K est ouvert

Le modèle d'équation dans cette configuration est donné comme suit :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = -c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_L(t) - i_o(t) \\ v_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_o(t) \end{cases} \quad (II.18)$$

Les systèmes d'équations de base (II.17), (II.18) représentent le convertisseur Buck-Boost pour une période dT_s et $(1-d)T_s$ respectivement, le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée. La dynamique valable pour les deux intervalles de temps est représenté par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} c_1 \frac{dv_i}{dt} T_s = (i_i - i_L)dT_s + (1-d)T_s i_i \\ c_2 \frac{dv_o}{dt} T_s = (i_L + i_o)(1-d)T_s - i_o dT_s \\ L \frac{di_L}{dt} T_s = v_i dT_s + v_o(1-d)T_s \end{cases} \quad (II.19)$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations (II.19) donne

$$\begin{cases} I_i - dI_L = 0 \\ I_o - I_L = 0 \\ dV_i + (1-d)V_o = 0 \end{cases} \quad (II.20)$$

En utilisant les relations (II.19), on peut calculer le rapport de conversion M , défini par :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{d}{d-1} \quad (II.21)$$

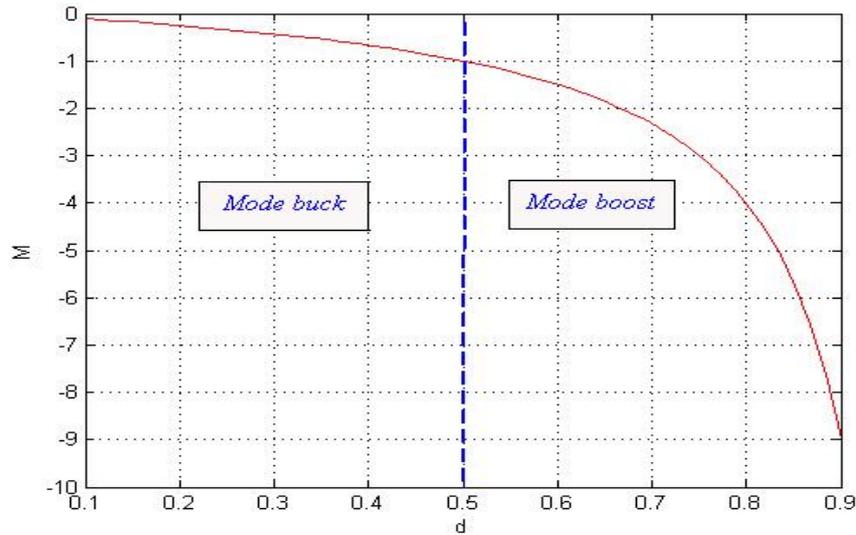


Figure II.15. Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.

II.4. Modélisation de la chaîne éolienne

Dans le cadre de ce travail, l'application de l'éolienne est dans le cadre de l'intégration à habitat, donc la production de l'énergie électrique afin de contribuer à satisfaire le besoins d'une maison isolée. Pour cela, la chaîne de conversion éolienne étudiée sera d'une petite puissance, d'une turbine à axe horizontale, à vitesse variable (pour avoir la possibilité de maximiser l'énergie captée), non couplé au réseau et basée sur une machine synchrone à aimant permanent (MSAP), car c'est la génératrice la plus adéquate pour des tels situations.

Le système de conversion d'énergie éolienne proposé dans ce travail est composé d'une turbine éolienne, d'une génératrice (MSAP), d'un convertisseur AC/DC (redresseur) et d'un hacheur pour adapter la tension continue redressée [54]. Il est basé sur des blocs modulaires comme présenté dans la figure II.16 suivante :

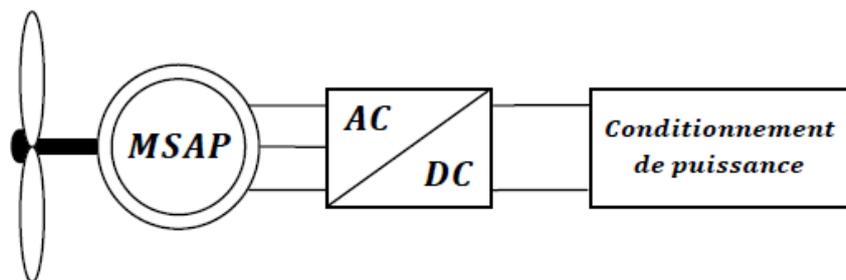


Figure II.16. Système de conversion éolien.

II.4.1. Turbine éolienne

La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de l'expression suivante [63] :

$$P_{eol} = C_p \cdot P_{vent} \tag{II.22}$$

C_p : Le coefficient de puissance.

D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{eol} \rho v^3 \tag{II.23}$$

Avec :

S_{eol} : la surface balayée par l'éolienne;

ρ : la masse volumique de l'air ($1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$);

V : la vitesse du vent.

Donc :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \tag{II.24}$$

Où

ρ : est la masse volumique de l'air en kilogrammes par mètre cube ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

R_t : est le rayon de la turbine (ou longueur d'une pale) en mètre (m) ;

v : la vitesse du vent en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

C_p : le coefficient de puissance. Ce coefficient, correspondant au rendement aérodynamique de la turbine. Le coefficient C_p diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ

On définit la vitesse spécifique λ défini par :

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \tag{II.25}$$

Ω_t est la vitesse mécanique de la turbine en radians par seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques, mais ça n'empêche pas qu'on trouve dans la littérature, des expressions approchées du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes à vitesse variable sont proposées par [23] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-18.4/\lambda_i} \tag{II.26}$$

Avec :

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \tag{II.27}$$

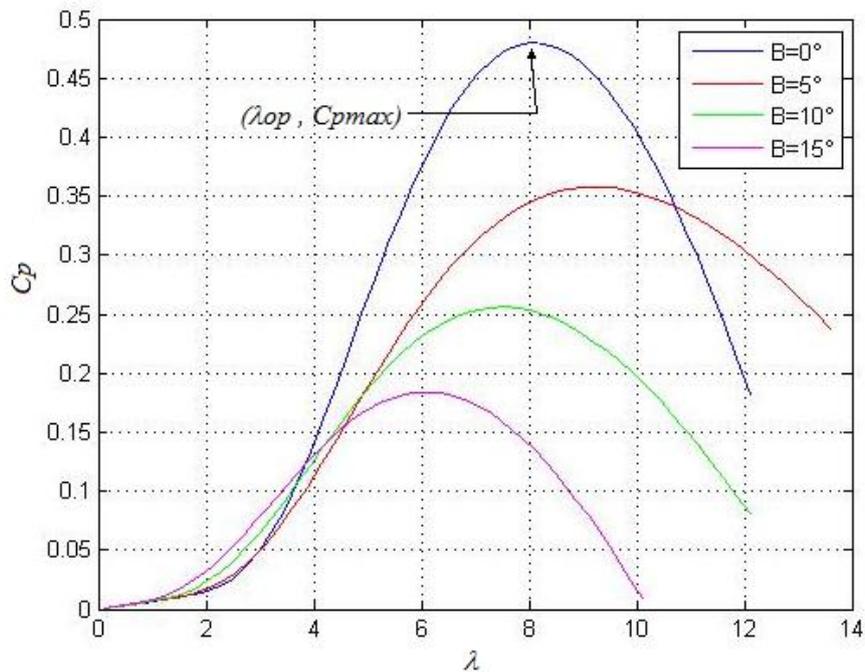


Figure II.17. Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ

La figure II.17 ci-dessus représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation (II.25) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β ; on remarque que si, pour un angle constant, on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à $\lambda_{optimal}$ à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure montre aussi que le $\lambda_{optimal}$ qui donne un C_{pmax} correspondant à un angle d'inclinaison des pales $\beta=0$. Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable.

En effet, afin de maintenir $\lambda=\lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de la vitesse du vent (II.25); le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% par rapport à un fonctionnement à vitesse fixe.

D'après la caractéristique donnée par la figure II.19, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités, d'où l'intérêt de faire fonctionner la turbine à une vitesse variable [63].

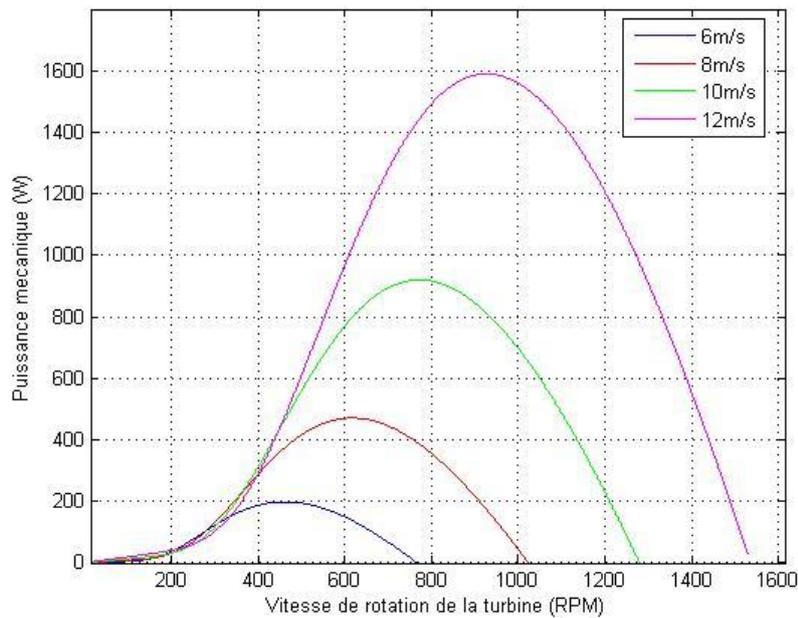


Figure II.18 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne de 2m de diamètre.

II.4.2. Machine Synchrone à Aimant Permanent

La MSAP comporte au stator un enroulement triphasé représenté par les trois axes (A, B, C) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° et au rotor des aimants permanents assurant son excitation [80].

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses à savoir que :

- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- La distribution des forces électromotrice, le long de l'entrefer, est supposée sinusoïdale.
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.

L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistance ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux [6].

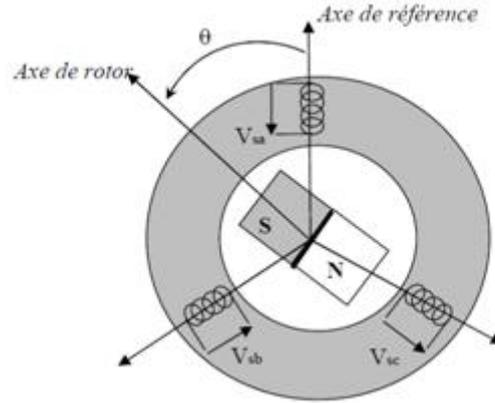


Figure II.19. Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent

II.4.2.1. Equations électriques et magnétiques

Les équations de la machine synchrone à aimants permanents utilisées sont :

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{dy}{dx} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

Où v_i i_i φ_i sont respectivement les tensions, les courants et les flux magnétiques des phases du stator de la machine ; R_s étant la résistance des enroulements.

Les couplages sont définis comme suit :

$$[\Phi_{abc}] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + [\Gamma(\theta)] \quad (II.29)$$

Où

θ : l'angle électrique;

L_{ii} : inductance propre des enroulements statorique ;

L_{ij} : inductance mutuelle ente les enroulements statorique.

$\Gamma(\theta)$: sont les flux rotoriques vus par les enroulements du stator. Ils représentent les amplitudes des flux induits dans les phases statoriques à vide.

$$\Gamma(\theta) = \varphi_{pm} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

φ_{pm} : flux des aimants permanents vu du stator [54]

A l'aide de la transformation de Park, qui permet le passage du système triphasé au système biphasé, on peut simplifier l'écriture de nos équations. La transformation de Park s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles, leurs composantes homopolaires, directe et en quadrature. Du point de vue physique, cette transformation est interprétée comme étant une substitution des enroulements immobiles (A, B, C) par des enroulements (d, q) tournant avec le rotor. Cette transformation rend les équations dynamiques des moteurs à courant alternatif plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse [80].

La transformation de Park est définie comme suit:

$$[X_{dq0}] = [K_\theta] \cdot [X_{abc}] \quad (II.31)$$

$$[X_{abc}] = [K_\theta]^{-1} \cdot [X_{dq0}] \quad (II.32)$$

Avec

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

Où X peut-être un courant, une tension ou un flux, et θ représente la position du rotor. Les termes Xd et Xq représentent les composantes longitudinale et transversale des variables sratoriques (courants, tensions ou flux).

En appliquant la transformation (II.33) au système (II.28), on obtient :

$$[V_{dq}] = [K_\theta][V_{abc}] = [K_\theta][R][I_{abc}] + [K_\theta] \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (II.35)$$

Ensuite, en se basant sur (II.34)

$$[V_{dq}] = [K_\theta][R][K_\theta]^{-1}[I_{dq}] + [K_\theta][K_\theta]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + [K_\theta] \left(\frac{d}{dt} [K_\theta]^{-1} \right) [\Phi_{dq}] \quad (II.36)$$

Du moment que $[R]$ est diagonale, alors :

$$[K_\theta][R][K_\theta]^{-1} = [R] \quad (II.37)$$

On a aussi :

$$[K_\theta] \left(\frac{d}{dt} [K_\theta]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = P \cdot \Omega_r \quad (II.39)$$

P : nombre de pôles du stator
 Ω_r : vitesse mécanique du rotor

$$[V_{dq}] = [R][I_{dq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + P\Omega_r [\Phi_{dq}'] \quad (II.40)$$

Avec :

$$[\Phi_{dq}] = \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_{pm} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

$$[\Phi_{dq}'] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\Phi_{dq}] = \begin{bmatrix} \varphi_q \\ -\varphi_d \end{bmatrix} \quad (II.42)$$

II.4.2.2. Equation mécanique

L'équation électromécanique est exprimée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \quad (II.43)$$

Avec :

Ω_r : vitesse mécanique du rotor ;

f : le coefficient d'amortissement ;

J : est la somme des moments d'inertie du générateur synchrone et de la charge;

C_r : le couple de charge.

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par :

$$C_{em} = P(\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (II.44)$$

II.4.2.3. Modèle d'état de la MSAP

En développant le système d'équations (II.40) et en se rappelant la relation l'équation électromécanique (II.44) on peut déduire la forme finale du modèle de la MSAP dans le référentiel $d-q$.

Soit :

$$\dot{X} = f(X) + BU + DC_r \quad (II.45)$$

Avec:

X vecteur d'état choisi pour la modélisation formé du courant direct i_d , courant en quadrature i_q et la vitesse mécanique du rotor Ω_r ;

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i_d \ i_q \ \Omega_r]^T \quad (II.46)$$

$$U = [u_d \ u_q]^T = [v_d \ v_q]^T \quad (II.47)$$

$f(x)$: Champs de vecteur définissant la dynamique non linéaire de la machine.

B : matrice d'entrée.

U: Vecteur de commande composé des tensions exprimées dans le repère de Park.

C_r : étant le couple de charge inconnu.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} x_1 + P \frac{L_q}{L_d} x_2 x_3 \\ -\frac{R_s}{L_q} x_2 - P \frac{\varphi_{pm}}{L_q} x_3 - P \frac{L_d}{L_q} x_1 x_3 \\ \frac{P\varphi_f}{J} x_2 - \frac{f}{J} x_3 + \frac{P\varphi_{pm}}{J} (L_d - L_q) x_1 x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} c_r \quad (II.48)$$

II.4.3. Redresseur Triphasé à diodes

Le circuit illustré dans la figure (II.20), présente un pont de diodes triphasé parallèle double parfait.

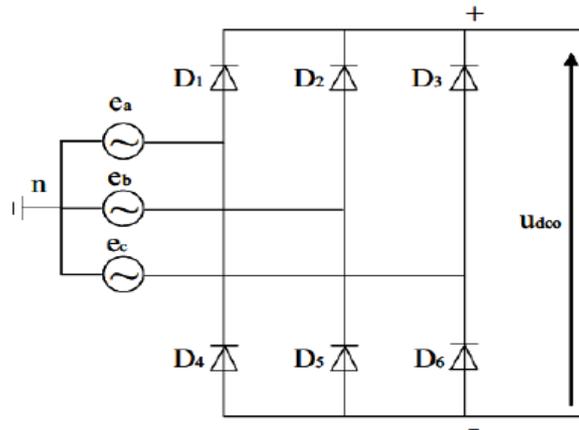


Figure II.20. Schéma d'un redresseur triphasé parallèle double à diode parfait

La tension redressée U_{dco} à vide est définie par l'expression suivante :

$$U_{dco} = \frac{3}{\pi} e_{ab}^{max} \approx 2.34 e_a \quad (II.49)$$

Ou e_a est la tension efficace par phase

II.5. Système de stockage électrique

II.5.1. Batterie

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique (pendant la charge), puis de la restituer par la suite (pendant la décharge) grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu.

Les technologies de batteries sont variées et, pour la modélisation, chacune présente des spécificités. Le modèle de batterie qu'on a opté s'appelle modèle de tension il fournit l'amplitude de la tension aux bornes de la batterie.

Par convention, la batterie est vue comme un générateur. Le courant de charge est négatif et celui de décharge positif. Pour le modèle de la figure II.21 [56], l'influence de la température est négligée.

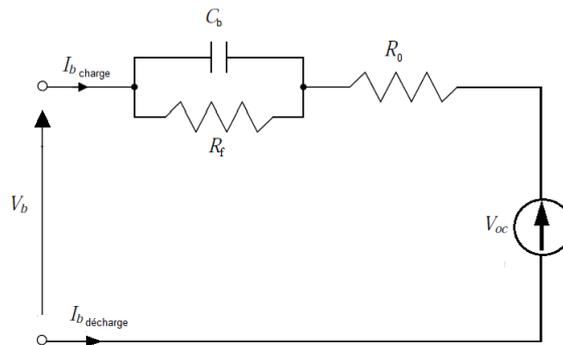


Figure II.21. Modèle électrique de la batterie.

En appliquant la loi des mailles on aura :

$$V_b = V_{oc} - R_0 I_b + V_{C_b} \quad (II.50)$$

La dynamique de tension de la batterie V_b en fonction du courant de la batterie I_b est donnée par la relation :

$$V_b = V_{oc} + R_0 I_b + R_f \left(1 - e^{-t/C_b R_f} \right) \quad (II.51)$$

V_{oc} est la tension à vide. La résistance R_0 , supposée constante, modélise la résistance interne de la batterie, tandis que la résistance R_f modélise la résistance de fuite, C_{bat} représente la surtension. Les valeurs des éléments constituant le modèle sont alors déterminées par des essais de charge et de décharge dans le but d'approcher les courbes de fonctionnement de la batterie.

Plusieurs batteries sont assemblées en série lorsque l'on désire disposer d'une tension plus grande que celle d'une seule batterie, et en parallèle, lorsque le courant requis dépasse la capacité d'une seule batterie [77].

II.5.2. Hacheur réversible en courant

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus continu.

Dans le cas du hacheur utilisé pour la charge/décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur réversible en courant est nécessaire comme l'indique la figure II.22 [80].

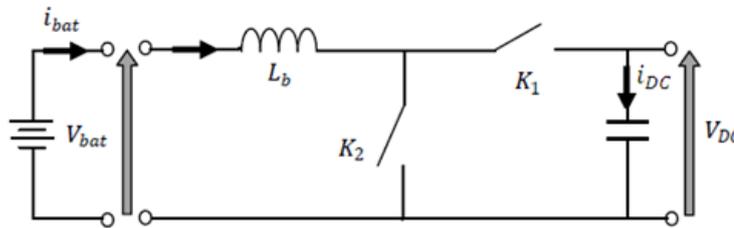


Figure II.22. Hacheur réversible en courant.

Sachant que la commande des interrupteur $K1$ et $K2$ est simultanée avec des rapports cycliques db et $1-db$ complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant en régime permanent est décrit par les équations suivantes [65]:

$$L_b \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - d_b V_{DC} \quad (II. 52)$$

$$i_{DC} = d_b i_{bat} \quad (II. 53)$$

II.5.3. Bus continue

Dans le système hybride, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur le bus à courant continu (CC). La régulation de la tension continue V_{CC} sur le bus continu est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant, connecté à un banc de batteries. Ainsi, le bus à CC est régulé à une valeur de tension constante en contrôlant le flux d'énergie entre les batteries et le bus.

Quand l'énergie fournie par les sources d'énergie renouvelable est insuffisante pour faire face à une augmentation soudaine de la charge, la tension du bus à CC devient inférieure à la valeur de référence. Dans ce cas, l'énergie manquante est obtenue à partir des batteries.

Quand il existe un excès d'énergie, il est utilisé pour recharger les batteries. L'architecture de ce système est présentée dans figure II.23.

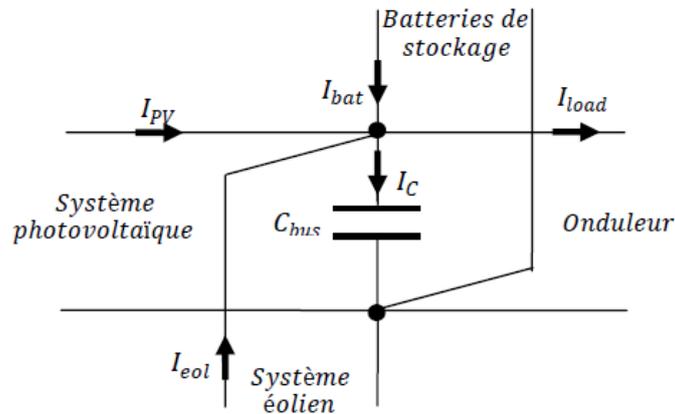


Figure II.23. Modèle du bus continu

Les courants dans le bus continu agissent directement sur la valeur de la tension du bus V_{DC} . On peut écrire:

$$I_C = I_{PV} + I_{eol} + I_{bat} - I_{load} \quad (II.54)$$

La tension V_{DC} est une fonction du courant I_C :

$$I_C = c_{bus} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (II.55)$$

La tension du bus continu V_{DC} doit être maintenue à une valeur de référence constante, à travers la commande du hacheur réversible en courant. Les batteries stockent de l'énergie électrique lorsqu'elle est excédentaire, et la restituent dans le cas inverse [80].

II.6. Générateur diesel

Comme indiqué précédemment un générateur diesel (GD) est en général constitué d'un moteur diesel (MD) et d'un générateur synchrone. Le générateur diesel proposé dans ce travail est composé d'un moteur diesel, d'une génératrice (MSAP), d'un convertisseur AC/DC (redresseur) et d'un hacheur pour adapter la tension continue redressée il est relié au bus continu dans le but de maintenir sa tension constante quelle que soit la variation de charge en cas d'absence d'énergie renouvelable et déchargent des batteries . Il est basé sur des blocs modulaires comme présenté dans la figure II.24. suivante :

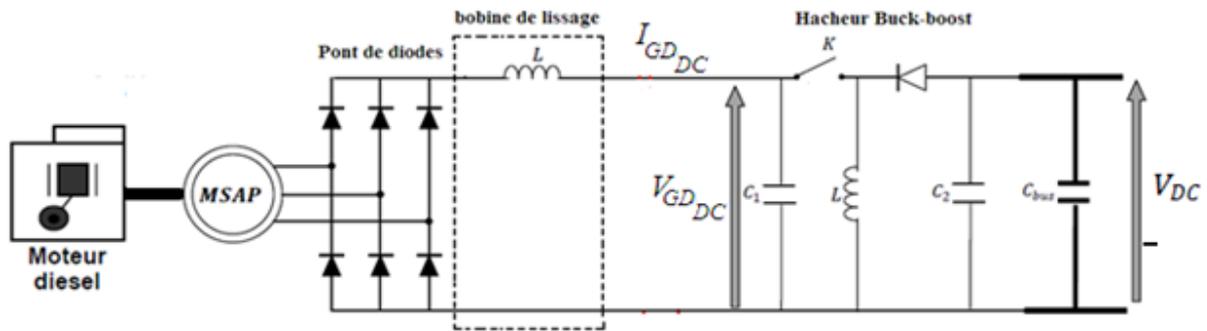


Figure II.24. Générateur diesel

II.6.1. Moteur diesel

Les moteurs diesel sont les moteurs à combustion interne les plus efficace [77], sa modélisation doit représenter au mieux la dynamique des différentes étapes de la conversion énergétique. Dans la littérature scientifique, les trois principales dynamiques généralement considérées sont : la dynamique de l'actionneur, la thermodynamique du moteur, et la mécanique du générateur diesel.

La dynamique de l'actionneur est la première à intervenir dans la modélisation. L'actionneur peut être, par exemple, une électrovanne de contrôle de débit de carburant entrant dans la chambre à combustion, pilotée par un système électronique [45].

Cette dynamique est approchée par un modèle du premier ordre avec le gain K_a , qui adapte la relation entre le couple et la consommation de carburant et une constante de temps τ_2 . Cette constante de temps dépend de la température du carburant. Les deux paramètres, K_a et τ_2 , sont variables, mais leur variation est négligeable pour des intervalles de temps courts [77].

$$\Phi(s) = \frac{K_a}{1 + s\tau_2} u(s) \tag{II.56}$$

Le couple produit par le moteur diesel T_d est une fonction du débit de carburant Φ .

$$T_d(s) = e^{-s\tau_1} \Phi(s) \tag{II.57}$$

Ce bloc inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant. Ce temps mort τ_1 peut être approché par :

$$\tau_1 = \frac{60h}{2n_c\Omega_d} + \frac{60}{4\Omega_d} \tag{II.58}$$

Où

$h = 2$ ou 4 pour des moteurs à deux ou quatre-temps;

n_c : le nombre de cylindres

Ω_d : la vitesse de rotation en tours par minute.

La mécanique du générateur diesel fait intervenir la relation fondamentale de la dynamique. Le couple moteur T_d produit par le moteur met en rotation le générateur synchrone. L'équation mécanique correspondante est détaillée dans la modélisation de la partie électromécanique de la MASP.

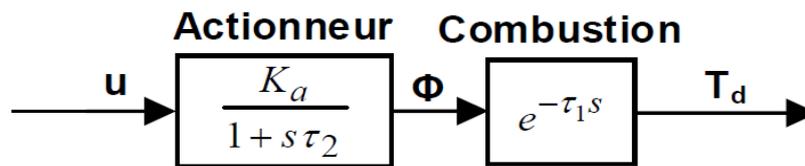


Figure II.25. Bloc-diagramme d'un moteur diesel simplifié

Le bus continu dans ce cas aura l'architecture suivante :

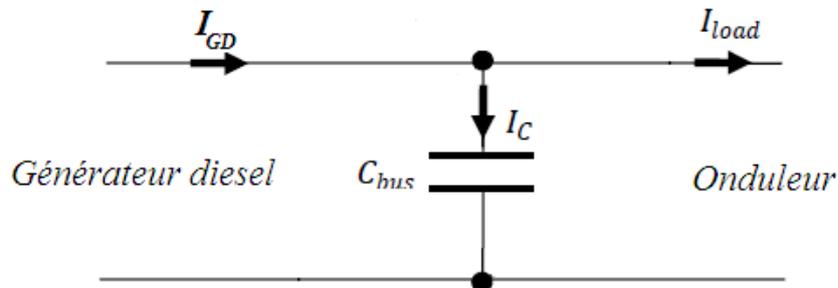


Figure II.26. Modèle du bus continu

Les courants dans le bus continu agissent directement sur la valeur de la tension du bus V_{DC} . On peut écrire:

$$I_c = I_{GD} - I_{load} \quad (II.59)$$

La tension V_{DC} est une fonction du courant I_c :

$$I_c = c_{bus} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (II.60)$$

La tension du bus continu V_{DC} doit être maintenue à une valeur de référence constante, à travers la commande du hacheur buck boost.

II.7. Onduleur monophasé et filtre de sortie

La connexion entre le bus continu et la charge est réalisée à l'aide d'un onduleur de tension monophasé. Un filtre de sortie est nécessaire pour éliminer les harmoniques générés par l'onduleur à cause de la commutation. Le schéma électrique de l'onduleur dans l'environnement système hybride est donné dans figure II.27.

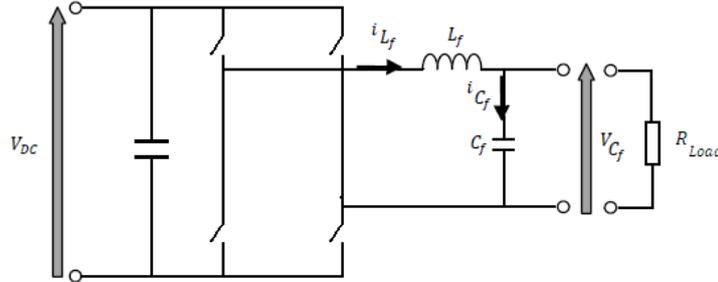


Figure II.27. Schéma électrique de l'onduleur monophasé

En appliquant la loi des mailles et la loi des nœuds sur le filtre de sortie. On obtient les équations suivantes :

$$V_{DC} = V_{L_f} + V_{C_f} \quad (II.61)$$

$$i_{L_f} = i_{C_f} + i_{load} \quad (II.62)$$

$$V_{DC} = L_f \frac{di_{C_f}}{dt} + \frac{L_f}{C_f R_{load}} i_{C_f} + V_{C_f} \quad (II.63)$$

$$\frac{dV_{C_f}}{dt} = \frac{i_{C_f}}{C_f} \quad (II.64)$$

En automatique, le choix des variables d'état n'est pas unique et dépend énormément de l'expérience acquise dans le domaine. Pour cela on a choisi le modèle donné dans les travaux de [16] et dont les variables d'état sont :

$$X = [X_1 \ X_2] = [i_{C_f} \ V_{C_f}]$$

Le modèle est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{V_{DC}}{L_f} u - \frac{1}{C_f \cdot R_{Load}} X_1 - \frac{1}{L_f} X_2 \\ \dot{X}_2 = \frac{1}{C_f} X_1 \end{cases} \quad (II.65)$$

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné et modélisé un SEH constitué par une éolienne, des panneaux PV, un générateur diesel et un système de stockage. Les sources d'énergie renouvelable et le générateur diesel sont connectés sur un bus à CC. Nous avons conçu sous l'environnement MATLAB/Simulink les modèles, de tous les éléments du SEH.

Les modèles des convertisseurs électriques élaborés dans ce chapitre seront utilisés pour commander et optimiser l'énergie que l'éolienne et les panneaux PV produisent. Dans le chapitre suivant, on va étudier la commande permettant la commande de tous les sous-systèmes de la maison, ainsi que l'optimisation de leurs énergies produites.

CHAPITRE III

COMMANDE HYBRIDE DU SEH

III.1. Introduction

Pour réaliser un SEH pour une maison en site isolé, il ne suffit pas seulement de produire de l'énergie, mais il faut l'optimiser aussi. Pour qu'un générateur photovoltaïque ou éolien délivre sa puissance maximale, il est nécessaire d'élaborer une commande MPPT. La tension du bus continu doit être stabilisée à travers la commande appliquée sur le convertisseur intercalé entre les batteries et le bus continu dans un premier temps, en cas d'absence d'énergie renouvelable le bus continu est stabiliser par une commande sur le générateur diesel. L'optimisation et la commande du système hybride d'une maison isolée dans ce travail sont assurées par une commande hybride.

Dans ce chapitre, d'une part, nous présenterons d'abord l'architecture et le fonctionnement du système de supervision pour une gestion automatique et efficace de l'énergie.

D'autre part, nous abordons les développements théoriques de la logique floue qui seront utilisées pour synthétiser les régulateurs flous.

Nous commencerons par l'application de la commande MPPT floue pour les systèmes à énergie renouvelable, puis par la régulation des différents sous systèmes en utilisant la logique floue.

III.2. Commande hybride

Généralement, les systèmes sont classés en 2 catégories : les systèmes à temps continu et les systèmes à temps discret. Cependant, certains systèmes échappent à cette classification. Mêlant à la fois le temps continu et le temps discret.

Plusieurs concepts de la commande hybride existent dans la littérature. Le concept le plus répandu est celui qui prend des valeurs continues et discrètes pour la commande d'un système. D'autres, décrivent la commande hybride comme une commande multi-niveaux hiérarchiques

Dans notre cas, la commande est appliqué sur un système multi-énergies dit aussi hybride (deux sources d'énergies de nature différentes) la commande conçu est considéré aussi comme une commande hybride, car elle combine deux commande, la première est une commande floue utilisé pour : l'optimisation des chaines de conversions photovoltaïques et éolienne, la stabilisation de la tension du bus continu, par batteries, la commande du générateur diesel et de l'onduleur. La deuxième est une commande toute ou rien par un contrôleur superviseur pour une bonne gestion d'énergie.

III.3. le système de gestion et de supervision

Vu le caractère aléatoire des conditions climatique (la température ambiante, l'éclairement, la vitesse du vent...) et de la consommation énergétique, un ajustement en temps « réel » est nécessaire, pour gérer automatiquement et de manière optimale l'énergie électrique produite par les différentes sources, Dans cette perspective un système de gestion d'énergie et de supervision est mis en œuvre, il est chargé de :

- Protéger les batteries contre les charges excessives;
- Protéger les batteries contre les décharges profondes ;
- Démarrer et arrêter automatiquement le générateur diesel de secours au besoin;
- Brancher et débrancher automatiquement les charges de dissipation (dump load) au besoin;
- Assurer une alimentation permanente à la maison ;

D'autre part, la protection des batteries dans les systèmes autonomes, contre la charge excessive et la décharge profonde est nécessaire, vu son coût relativement élevé d'où l'utilisation d'un contrôleur de charge est impérative.

Au faite une batterie au plomb de 12V, est constituée de 6 cellules de 2V. Généralement, on considère que ce type d'accumulateur est déchargé, lorsque la tension par cellule est inférieure à 1.8V. Lorsque la tension par cellule est supérieure à 2.4V, la batterie est considérée surchargée.

Pour assurer la protection des batteries dans notre SEH, la tension aux bornes de celles-ci doit être comprise entre 75 V et 100 V pour des batteries de tension nominale de 84v (7*12V) ce qui correspond à un état de charge min et un autre max.

En effet, lorsque la tension aux bornes des batteries est comprise entre 75V et 100V, le superviseur branche les batteries et le système d'énergie renouvelable à l'habitat. Ensuite, il débranche le générateur diesel puis il le met à l'arrêt.

Si la tension des batteries est inférieure à 75V, le superviseur démarre le générateur diesel, le connecte à l'habitat, puis déconnecte les batteries et le système d'énergie renouvelable de la maison pour protéger ces dernières contre une décharge profonde.

Enfin, lorsque la tension aux bornes des batteries est supérieure à 100V, le superviseur assure la protection de ces dernières contre une charge excessive. A cet effet, il connecte les batteries à une charge de dissipation (dump load). Ainsi, les batteries en plus d'alimenter l'habitation, alimentent cette charge. Cette charge peut être un chauffe-eau, un

dispositif de chauffage de l'habitation, ou même une autre batterie. La figure suivante montre l'architecture globale de notre système hybride d'une maison en site isolé :

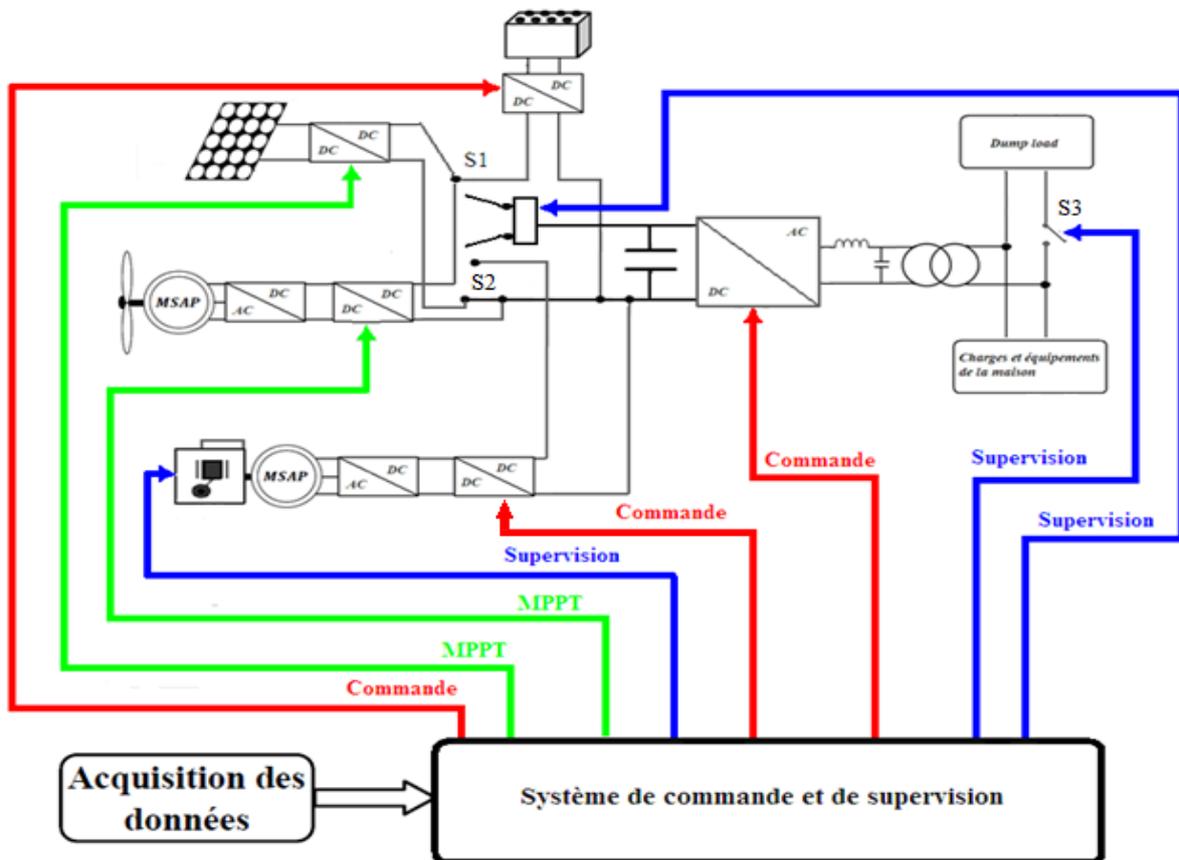


Figure III.1. Architecture du système hybride proposé.

Sur la base du cahier de charge et des modes de fonctionnement définis plus haut, une architecture fonctionnelle du superviseur a pu être établie. La figure III.2 ci-dessous présente son organigramme où :

- E1 est la sortie du comparateur de tension minimale, ($E1=1$ si $V_{bat} > 75V$);
- E2 est la sortie du comparateur de tension maximale, ($E2=1$ si $V_{bat} > 100V$);
- E3 est la sortie du détecteur de démarrage du GD ;
- S1 commande le relais de connexion/déconnexion entre les batteries et le système d'énergie renouvelable avec la maison ;
- S2 commande le relais de connexion/déconnexion entre le GD avec la maison ;
- S3 commande le démarrage et l'arrêt du générateur diesel ;
- S4 commande le branchement et le débranchement de la Dump Load;
- S5 signal d'erreur sur le GD.

GD = le générateur diesel

DL = dump load

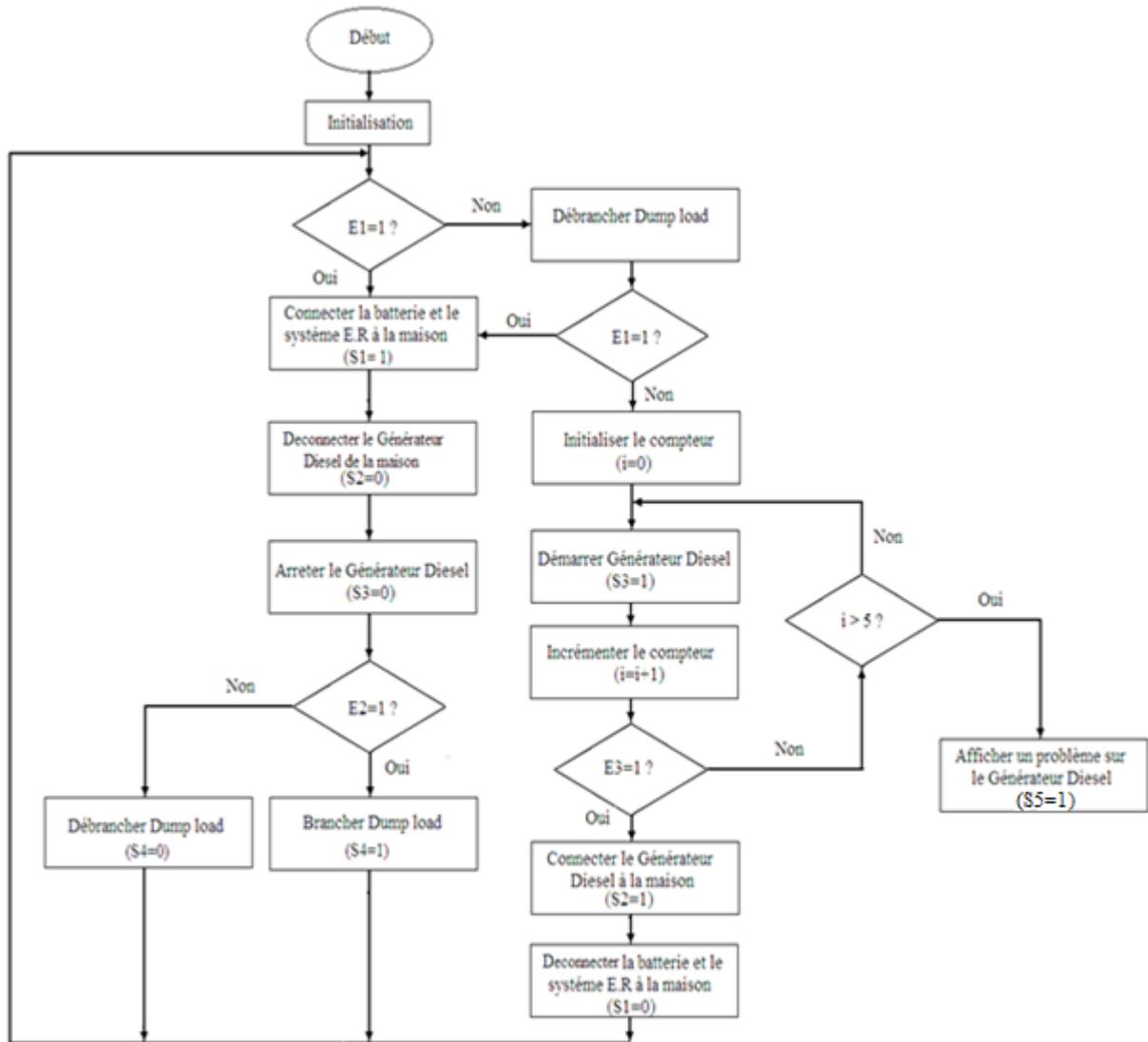


Figure III.2. Organigramme de supervision et gestion efficace.

Nous avons aussi conçu ce programme par state flow de MATLAB qui est chargé de suivre le cahier de charge présenté, les figure III.3. Et III.4 montrent la conception de l’organigramme précédent dans l’environnement state flow:

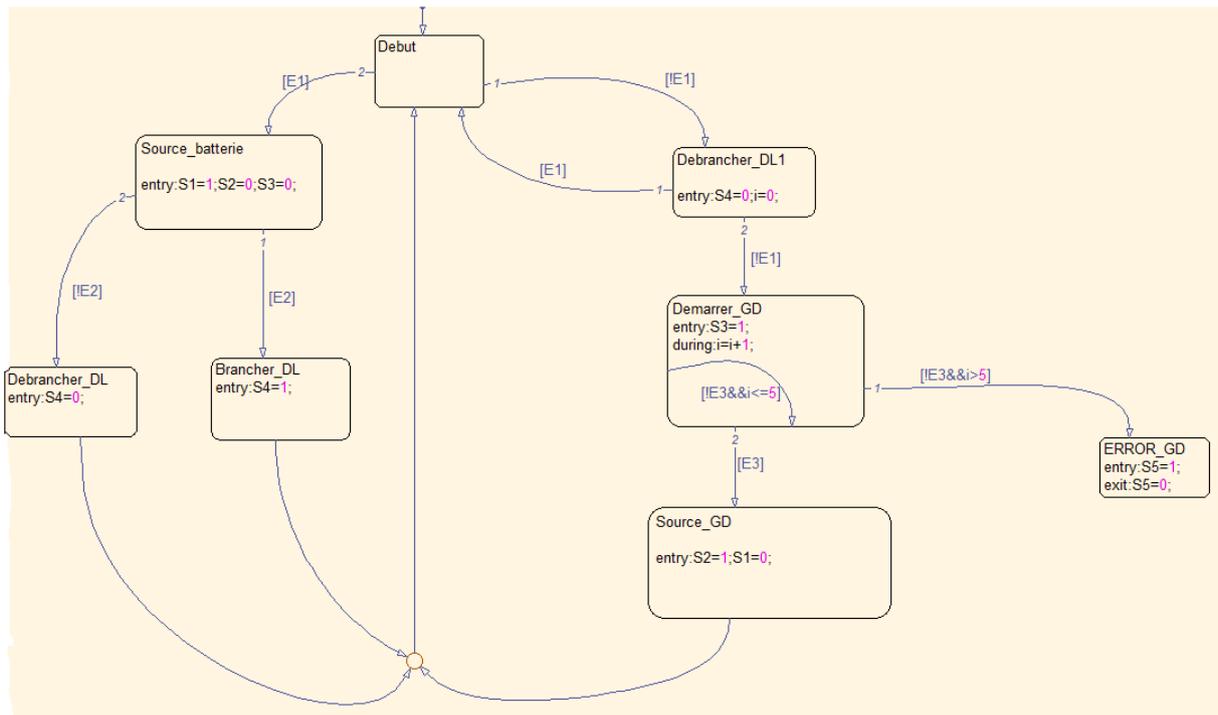


Figure III.3. Conception de l’organigramme de gestion dans l’environnement state flow.

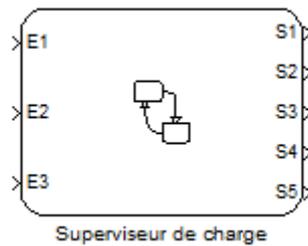


Figure III.4. Les entrées sorties du système de gestion sous l’environnement state flow.

La simulation du fonctionnement de ce contrôleur est présentée dans le chapitre suivant.

III.4. Le contrôleur flou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale

III.4.1. Poursuite du point de puissance maximal

La Poursuite du point de puissance maximale, ou le MPPT (Maximum Power Point Tracking), est un mécanisme de contrôle et de poursuite qui est utilisé dans les systèmes photovoltaïques et éoliens pour maximiser la puissance délivrée par le générateur, en poursuivant continuellement leur point de puissance maximale. Sachant que la caractéristique du générateur photovoltaïque dépend de l’ensoleillement et de la température, et que celle de

l'éolien dépend de la vitesse du vent. Le point de puissance maximum n'est pas évident à atteindre [80]. La figure III.5 montre une vue générale d'un système qui peut être photovoltaïque ou éolien doté d'un contrôleur MPPT.

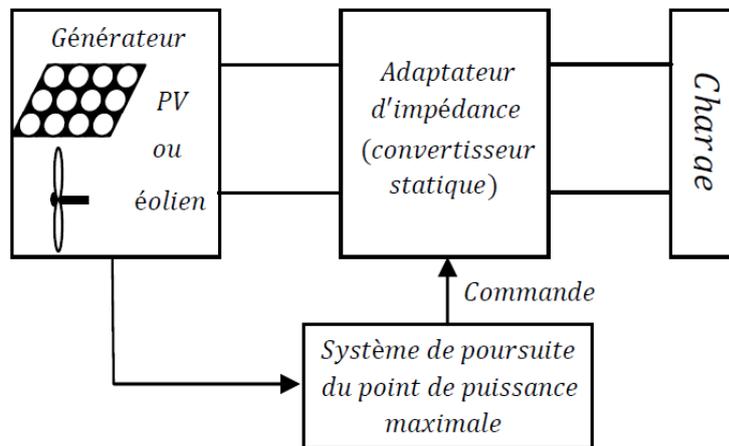


Figure III.5. Vue Générale d'un système photovoltaïque ou éolien doté d'un MPPT.

L'approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique pour effectuer le transfert optimal d'énergie. La commande de ce convertisseur permettra de faire fonctionner le système en un point où le générateur délivre le maximum de puissance. Plusieurs méthodes de recherche du point de puissance maximale peuvent être envisagées, nous sommes intéressés dans ce travail par une des méthodes intelligentes pour la commande du MPPT, il s'agit de la logique floue type Takagi-Sugeno-Kang.

III.4.2. MPPT appliqué sur les systèmes photovoltaïques

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et de leurs faible rendement (entre 12% et 17%), des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit la charge [80].

Comme nous pouvons le constater sur la figure (III.6). la caractéristique du générateur PV, ainsi que le PMM, dépend des variations de l'éclairement et la température. On remarque que la puissance maximale est proportionnelle à l'ensoleillement, contrairement à la température. En plus, le point de puissance maximale reste sur la même verticale pour un changement d'ensoleillement mais change dans l'espace (P-V) pour un changement de température

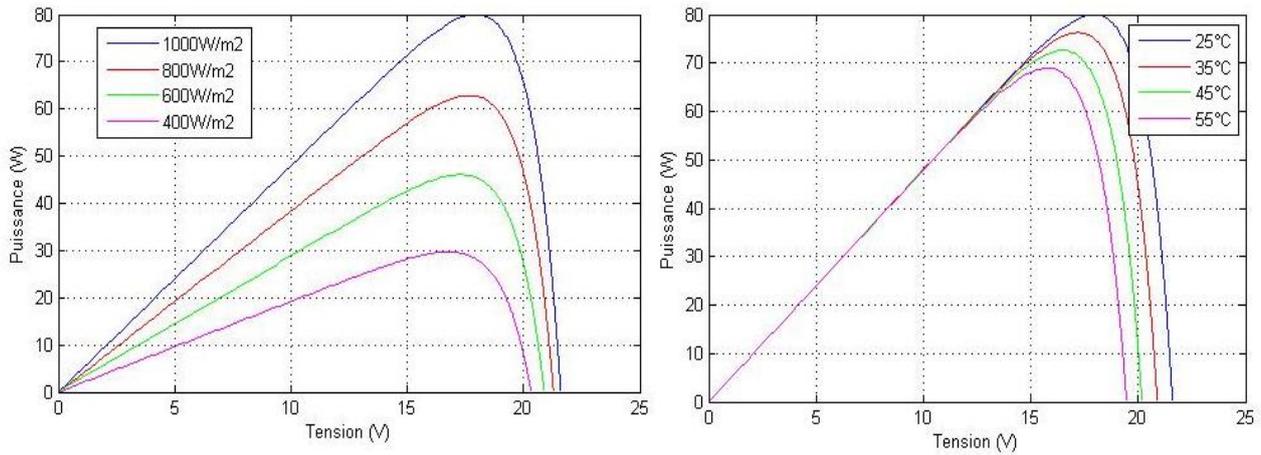


Figure III.6. Exemple de caractéristiques puissance/tension d’un générateur photovoltaïque, à gauche pour différents éclaircissements, à droite pour différentes températures de jonction.

On constate aussi d’après la figure (III.7) que le fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé, il existe un seul point sur la caractéristique (I-V) d’un panneau photovoltaïque pour lequel la puissance maximale est produite [77], ce point correspond à une charge optimale placée aux bornes du panneau solaire.

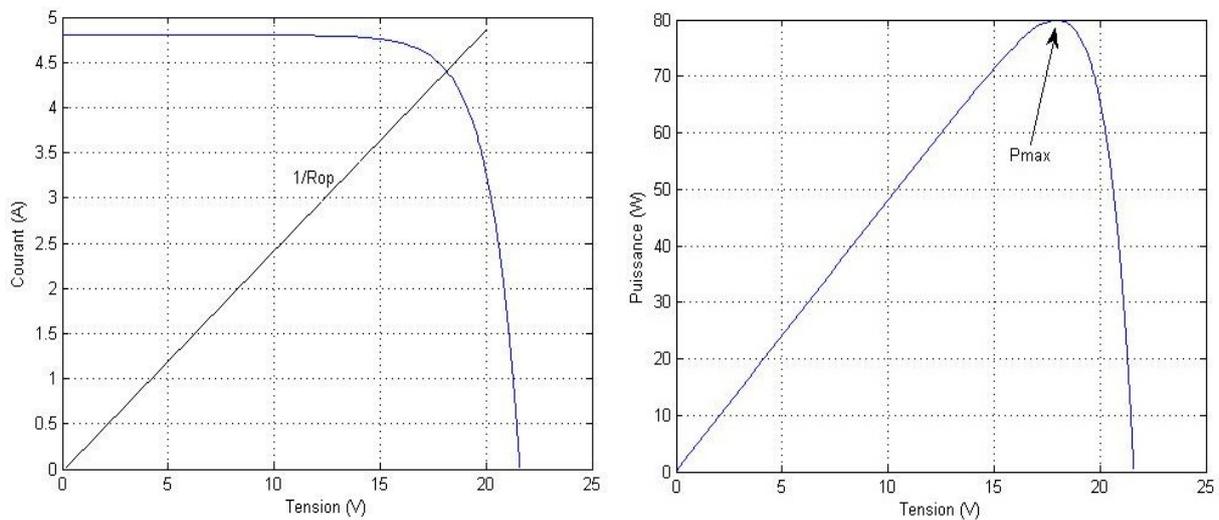


Figure III.7.Caractéristique Courant/Tension Puissance/Tension d’une cellule PV

Pour optimiser le rendement énergétique du système PV, une solution est l’utilisation d’une commande MPPT (Maximum Power Point Tracker). Celui-ci permet de suivre le point de puissance maximale en contrôlant la tension ou le courant des panneaux.

On peut distinguer deux méthodes MPPT, le premier MPPT est à puissance de référence et le deuxième est avec un régulateur itératif [6].

Dans la première méthode, la tension de référence pour laquelle la puissance est maximale n'est pas obtenue avec un algorithme de recherche, mais par des données fournies par le constructeur ou obtenues par mesures réalisées par l'utilisateur, On aura alors pour G (l'éclairement) et T (la température) donnés, V_{ref} (la tension de référence) pour laquelle la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

La deuxième méthode se base sur des algorithmes, de recherche itérative, qui permettent de trouver, le point de fonctionnement maximal. La puissance extraite du générateur est calculée à partir des mesures du courant et de la tension, la multiplication de ces deux grandeurs donne la puissance. Le sens de variation de la puissance est connu par le calcul approximatif de la dérivée $dP = P(k) - P(k - 1)$ sur un temps d'échantillonnage. Ces méthodes peuvent être basées sur les techniques intelligentes nouvellement introduites dans le monde de contrôle des MPPT. Il s'agit des réseaux de neurones et de la logique floue.

III.4.3. MPPT flou appliqué sur le système photovoltaïque

L'objectif de la commande est d'extraire et de poursuivre la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque pour différentes insolation et différentes valeurs de température.

Dans ce but; on va commander le convertisseur DC/DC de type Buck-Boost par un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang. Le hacheur est intercalé entre la source d'entrée (le générateur PV) et la charge, comme dans la figure (III.8).

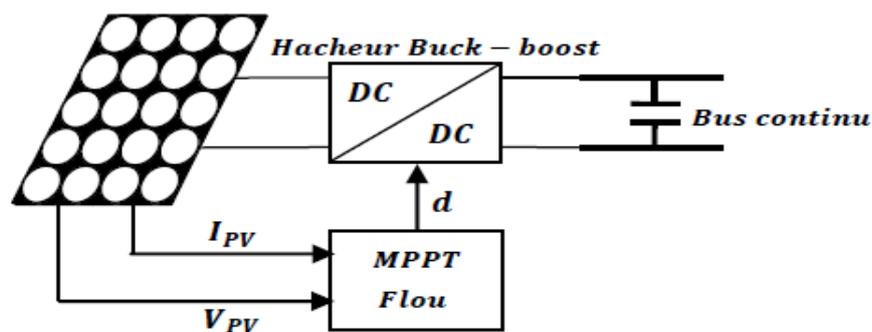


Figure III.8. Schéma (synoptique) du système photovoltaïque avec MPPT flou.

Le régulateur flou synthétisé dans notre application est de type Takagi-Sugeno-Kang d'ordre zéro, il possède deux entrées : l'erreur $e(k)$ et l'approximation de sa dérivée $\Delta e(k)$, la sortie est la commande $u(k)$.

D'après l'annexe A, ce régulateur comporte les blocs suivants : fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire ensuite l'inférence où

ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin Agrégation des sorties. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure III.9. (G_E , $G_{\Delta E}$ et G_U sont les gains d'entrées et de sortie).

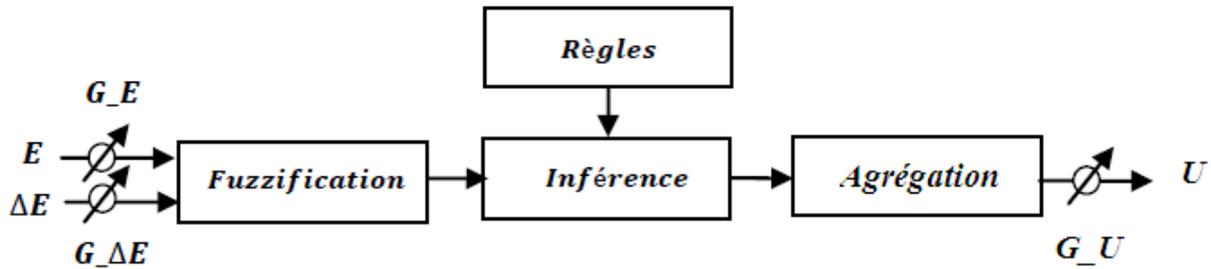


Figure III.9. Structure de base du contrôleur flou TSK

Fuzzification : La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément. La puissance peut être calculée ainsi:

$$P_{PV}(k) = I_{PV}(k).V_{PV}(k) \tag{III.1}$$

On peut exprimer respectivement l'erreur $e(k)$, l'approximation de sa dérivée $\Delta e(k)$ et la commande $u(k)$ par :

$$E_{PV}(k) = \frac{P_{PV}(k) - P_{PV}(k - 1)}{V_{PV}(k) - V_{PV}(k - 1)} \tag{III.2}$$

$$\Delta E_{PV}(k) = E_{PV}(k) - E_{PV}(k - 1) \tag{III.3}$$

$$u(k) = d_{PV}(k) \tag{III.4}$$

Où

$P_{PV}(k)$, $I_{PV}(k)$, $V_{PV}(k)$ sont respectivement: la puissance, le courant et la tension du générateur photovoltaïque. $d_{PV}(k)$ Représente le rapport cyclique du hacheur.

D'après l'entrée $E_{PV}(k)$ on peut savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe puissance-tension (la position du point de fonctionnement par rapport au MPP).

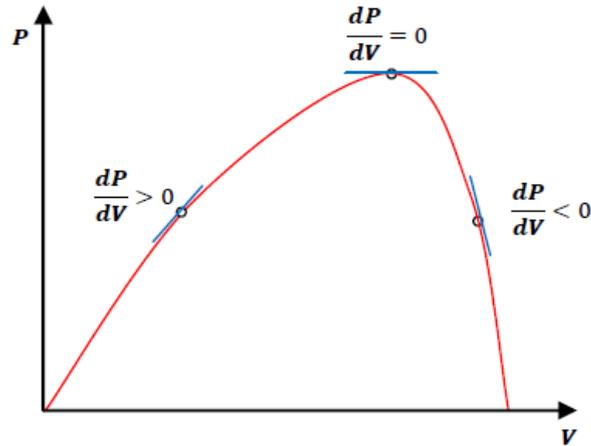


Figure III.10. Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement.

- Si $E_{PV}(k)$ est positif, le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale.
- Si $E_{PV}(k)$ est négatif, le point de fonctionnement est à droite du point de puissance maximale.
- $E_{PV}(k)$ est nul, le point de fonctionnement est au point de puissance maximale.

D'après l'entrée $\Delta E_{PV}(k)$ on peut déterminer la variation de l'erreur de l'entrée du contrôleur flou qui représente la direction du point de fonctionnement.

Dans ce cas, pour atteindre le point de puissance maximale on doit :

- Pour pousser vers la droite le point de fonctionnement qui se situe à gauche du point de puissance maximale, il faut augmenter la tension.
- Pour pousser vers la gauche le point de fonctionnement qui se situe à droite du point de puissance maximale, il faut diminuer la tension.
- Pour maintenir le point de fonctionnement qui se situe sur le point de puissance maximale, il faut garder la même tension.

Pour un hacheur Buck-Boost, l'augmentation du rapport cyclique $d_{PV}(k)$ provoque l'augmentation de la tension et vice versa.

En utilisant les bases des sous ensembles flou on peut exprimer les variables d'entrées en termes de variable linguistiques et la variables de sortie en terme de conclusions constantes; de façon à développer une commande $u(k)$ qui corespond au rapport cyclique du hacheur et donc $u(k) \in [0, 1]$.

Chacune des deux entrées possède 5 valeurs linguistiques ces dernières sont écrites en étiquettes comme suit:

PG : Positif Grand, *PP* : Positif Petit, *Z* : Zéro, *NP* : Négatif Petit, *NG* : Négatif Grand.

Nous aboutissons donc ainsi à une base de règles comprenant 25 règles. Les figures (III.11 et III.12) montrent les fonctions d'appartenances des 5 sous ensembles flous des variables d'entrées. Chaque variable est limitée par une valeur minimale L_{min} , et une autre maximale L_{max} qui lui correspond.

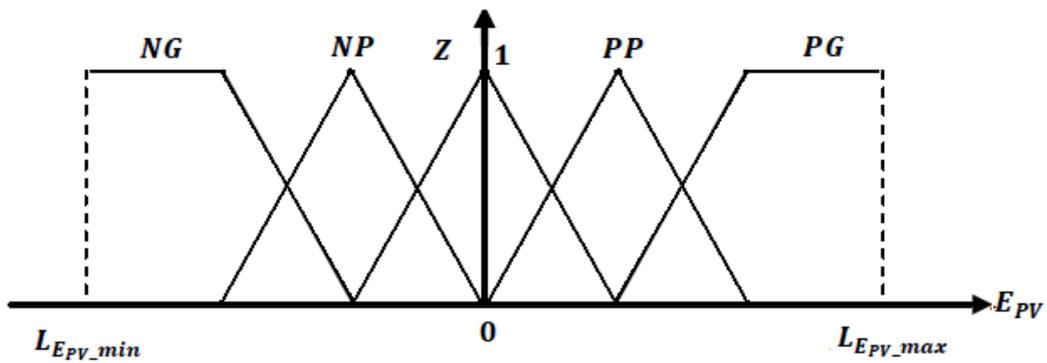


Figure III.11. Fonctions d'appartenances de l'entrée E_{PV}

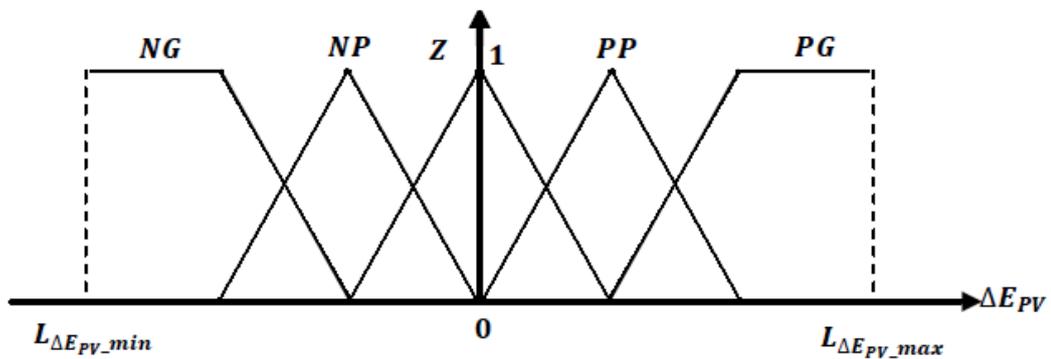


Figure III.12. Fonctions d'appartenances de l'entrée ΔE_{PV}

Les valeurs attribuées aux conclusions numériques ont été choisies après de nombreux essais, on a choisi 5 conclusions numériques dans un intervalle limité par une valeur minimale $L_{d_{PV} min}$ une autre maximale $L_{d_{PV} max}$, figure (III.13) :

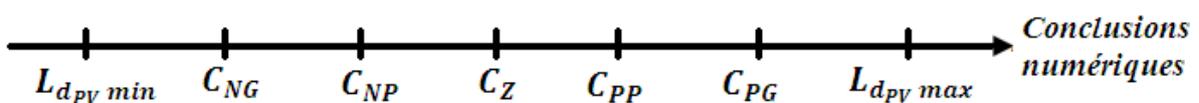


Figure III.13. Conclusions numériques de la sortie d_{PV}

L'inférence : La table (III.1) représente la matrice d'inférence du régulateur ou les entrées sont : l'erreur E_{PV} et la variation de l'erreur ΔE_{PV} . La sortie est d_{PV} .

Les règles de contrôle doivent être désignées de façon à ramener toujours la variable d'entrée E_{PV} (l'erreur de réglage) à zéro. c.à.d. il faut que : $E_{PV} \cdot \Delta E_{PV} < 0$:

d_{PV}		ΔE_{PV}				
		NG	NP	Z	PP	PG
E_{PV}	NG	C_{NG}	C_{NG}	C_{NG}	C_Z	C_Z
	NP	C_{NP}	C_{NP}	C_{NP}	C_Z	C_Z
	Z	C_{PP}	C_Z	C_Z	C_Z	C_{NP}
	PP	C_Z	C_Z	C_{PP}	C_{PP}	C_{PP}
	PG	C_Z	C_Z	C_{PG}	C_{PG}	C_{PG}

Tableau III.1. Table d'inférence du MPPT flou.

Les règles sont de la forme

Règle 1 : SI (E_{PV} est NG) ET (ΔE_{PV} est NG) ALORS $d_{PV} = C_{NG}$

Règle 25 : SI (E_{PV} est PG) ET (ΔE_{PV} est PG) ALORS $d_{PV} = C_{PG}$

La valeur finale du signal de commande est donnée après agrégation des sorties individuelles et multiplication par le facteur d'échelle.

III.4.4. MPPT appliqué sur les systèmes éoliens

Un système de conversion d'énergie éolienne est composé de la turbine éolienne ayant sa propre caractéristique. Celle-ci dépend des paramètres de construction définissant ainsi son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. La voilure est connectée à une génératrice [54].

La courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique « au gré du vent » : on parle ainsi de maximisation de la puissance extraite, voire de MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour chaque vitesse du vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la figure III.14 donne les courbes

caractéristiques d'une turbine éolienne dans le plan puissance - vitesse de rotation de la voileure. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent V_v donnée.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale, donnée par l'équation (III.5). Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout instant de fonctionnement du système éolien.

La nécessité de ce type d'optimisation énergétique est d'autant plus important pour les applications de petites puissances telles que dans le cadre de l'intégration à l'habitat, on doit alors souvent faire face à des gisements fortement instationnaires en raison de la rugosité des sites (cas de sites urbains). La présence de ces turbulences nécessite de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée quelle que soit la vitesse du vent considérée.

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \rho S V_v^3 \quad (\text{III.5})$$

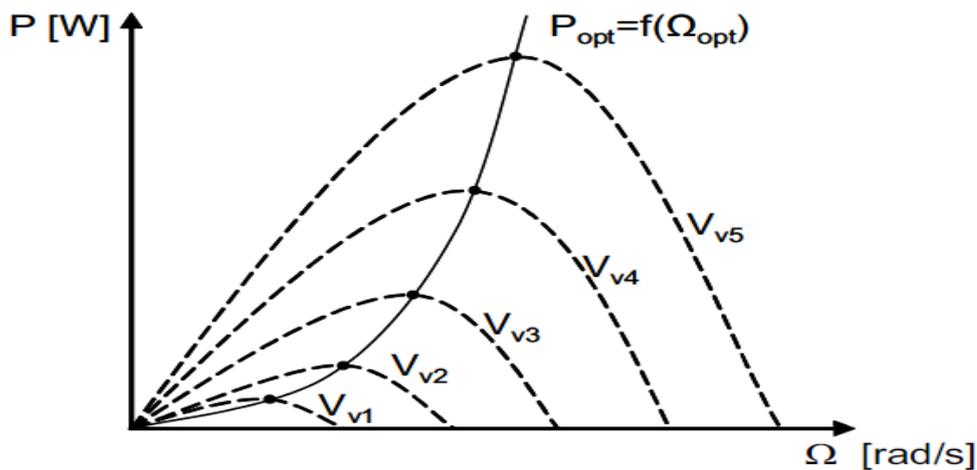


Figure III.14. Caractéristiques de la voileure dans le plan puissance – vitesse

Pour s'approcher de ce but une commande spécifique doit être utilisée. Pour cela, deux approches sont souvent appliquées :

- La première façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de la voileure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale (Fig.III.14) comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.
- La seconde, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p(\lambda)$ n'est pas connue. Dans cette condition, est utilisée une méthode qui permet de trouver le MPPT.

a) Maximisation de puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

Cette façon de procéder consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de la vitesse du vent. Cette façon de procéder exige au constructeur de la voilure des essais de caractérisation (extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil de pales [6].

Dans le cas d'une génératrice synchrone à aimant permanent, la commande de la vitesse de rotation du générateur éolien, afin d'atteindre le MPP, peut être réalisée de deux manières :

- **Contrôle direct** : un contrôle direct de la puissance éolienne est possible à partir d'une structure de redressement MLI à six interrupteurs, et d'un capteur mécanique (vitesse de rotation et position), il est possible d'autopiloter la machine électrique afin de la contrôler en vitesse ou en couple.

- **Contrôle indirect** : un contrôle indirect de la puissance éolienne est aussi possible par l'utilisation d'une chaîne de conversion plus simple et moins coûteuse, à base de pont de diodes triphasé et d'un hacheur classique en aval. La commande du hacheur permet de contrôler le courant de charge. Contrairement au cas précédent ; le contrôle de la charge mécanique de la turbine ou bien de sa vitesse s'effectue de façon indirecte à travers le pont de diodes [54].

Pour savoir la vitesse de référence Ω_{opt} pour laquelle on atteint le MPP. On définit les équations suivantes :

La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation (II.25) est égale à :

$$V_v = \frac{R_t \Omega_t}{\lambda} \quad (\text{III. 6})$$

En insérant cette équation dans l'expression (II.24) on obtient la fonction de la puissance en fonction de la vitesse de rotation :

$$P(\Omega) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\Omega) \cdot R^3 \Omega^3 \quad (\text{III. 7})$$

Cette équation permet de tracer la famille des courbes de la Figure (III.14). La puissance éolienne à vent donné est donc directement liée à la vitesse de rotation imposée par la charge mécanique. Une régulation en vitesse permettant de contrôler la puissance éolienne peut donc être utilisée.

Si on suppose maintenant que le point optimal est atteint (la paire « λ_{opt} ; $C_{P_{opt}}$ » est vérifiée), alors d’après l’équation (III. 7), le calcul de la vitesse optimale est possible à partir de la valeur de la puissance maximale :

$$\Omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{P_{opt}}{K_{opt}}} \tag{III. 8}$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_{P_{opt}} \cdot R^3}{\lambda_{opt}^3} \tag{III. 9}$$

A partir de ces équations il est possible de « traquer » le point de fonctionnement optimal maximisant la puissance. A l’aide d’une simple mesure de puissance, la vitesse de référence peut être calculée selon le schéma de la Figure III.15.

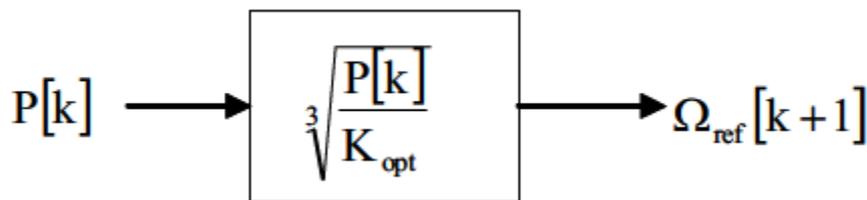


Figure III.15. Vitesse de référence en fonction de la puissance.

La convergence de la recherche de point maximal de puissance est illustrée selon la Figure (III.16)

1. en mesurant la puissance P_1 à la vitesse de rotation Ω_1 , la vitesse de référence est calculée selon l’équation (III.9) ce qui équivaut à trouver une vitesse $\Omega_{ref} = \Omega_2$ correspondante au point (Ω_2, P_1) de la courbe optimale $P_{opt} = f(\Omega_{opt})$.
2. après une période de calcul, l’état du système équivalent à (Ω_2, P_2) est atteint (puisque le caractéristique $P(\Omega)$ est connu) et la vitesse de référence Ω_3 est calculée.
3. après plusieurs itérations, selon la puissance du régulateur de vitesse, le point optimal (Ω_{opt}, P_{MPP}) est atteint .

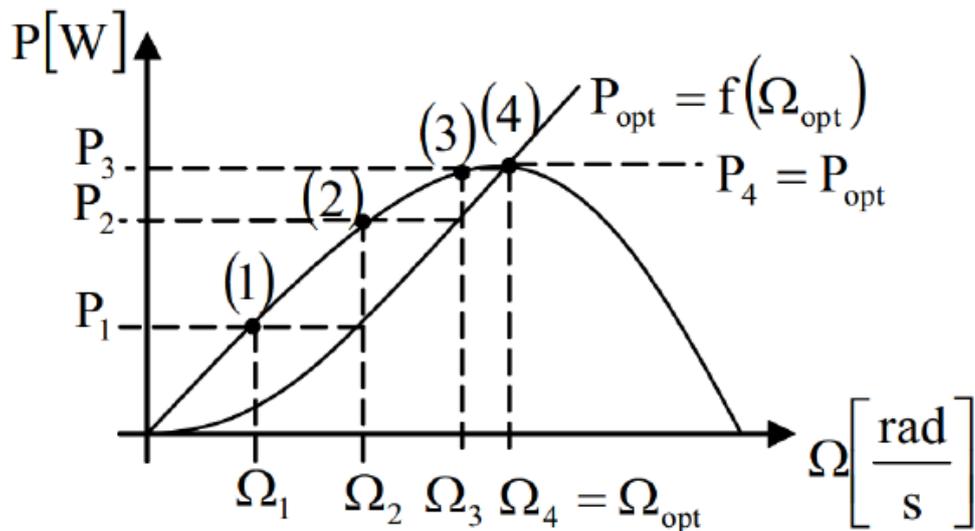


Figure III.16. Convergence vers le MPP par contrôle en vitesse

b) Maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique $C_p(\lambda)$ plusieurs travaux ont été publiés pour le pilotage des éoliennes. En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des règles de comportement à tenir afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de la puissance totale ΔP et de la vitesse de rotation $\Delta \Omega$ [6]. Par exemple : si on mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, on doit continuer à accélérer la voilure ($\Delta \Omega_{ref} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$ [77]. L'utilisation d'un dispositif MPPT basé sur des méthodes intelligentes de l'automatique comme la logique floue doit donc être mis en place.

III.4.5. MPPT flou appliqué sur le système éolien

La génératrice synchrone à aimant permanent est connectée à un hacheur élévateur-abaisseur (buck-boost) à travers un pont triphasé de diodes (contrôle indirect). La puissance éolienne est maximisée par la commande MPPT flou appliquée sur le hacheur. La méthode MPPT flou utilisée dans ce travail est basée sur les travaux de [54, 80]. C'est une méthode qui ne nécessite aucun capteur mécanique, ni de vitesse de rotation, ni de vitesse de vent. Des mesures de la puissance et de la tension continue à la sortie de pont de diodes suffisent pour poursuivre le MPP.

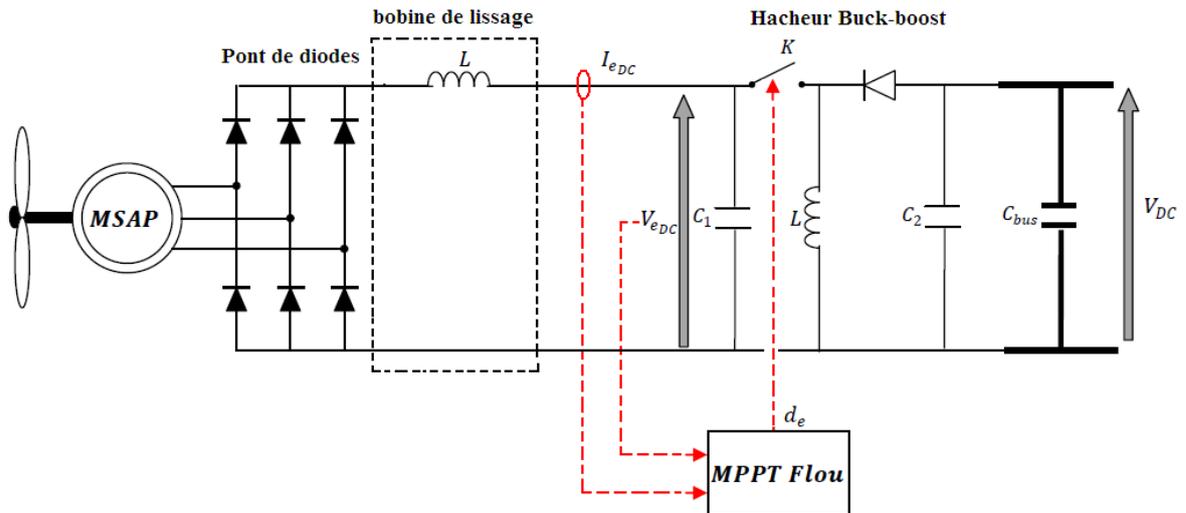


Figure III.17. Schéma de la chaîne de conversion éolienne avec MPPT flou

Ayant ces deux grandeurs : puissance éolienne P_e et la tension continue après le pont de diodes V_{eDC} . On peut extraire le maximum d'énergie éolienne en poursuivant le MPP sur la caractéristique Puissance-Tension continue du pont de diodes (P_e en fonction de V_{eDC}) comme illustrée dans la figure III.18 [54].

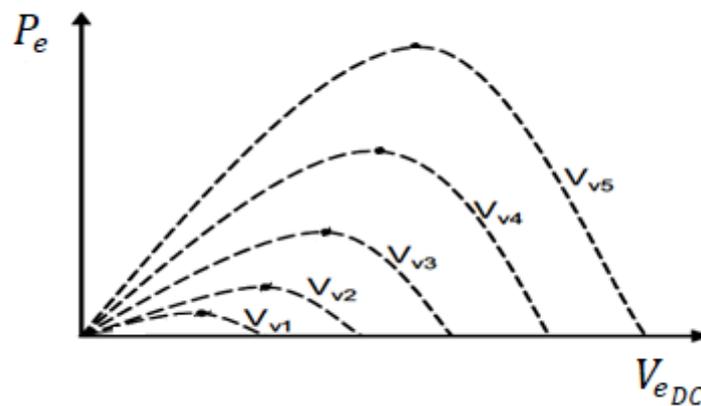


Figure III.18. Caractéristique P_e en fonction de V_{eDC}

On remarque que la caractéristique $P_e - V_{eDC}$ de l'éolienne se semble beaucoup à celle du générateur photovoltaïque $P_{PV} - V_{PV}$ (illustrée précédemment dans la figure III.6).

Pour cette raison, le principe de suivi du MPP par un contrôleur flou type Takagi- Sugeno-Kang sera le même.

Le choix des variables d'entrées du contrôleur flou sera, comme pour le système photovoltaïque, l'erreur (E_e) et la variation de l'erreur (ΔE_e) et la commande $u(k)$ à des instants échantillonnés (k), exprimées comme suit :

$$E_e(k) = \frac{P_e(k) - P_e(k-1)}{V_{eDC}(k) - V_{eDC}(k-1)} \quad (\text{III. 10})$$

$$\Delta E_e(k) = E_e(k) - E_e(k-1) \quad (\text{III. 11})$$

$$u(k) = d_e(k) \quad (\text{III. 12})$$

Comme dans le contrôleur MPPT flou du système photovoltaïque, l'erreur $E_e(k)$ détermine la position du point de fonctionnement par rapport au MPP, et le changement de l'erreur $\Delta E_e(k)$ la direction du point de fonctionnement. La commande $d_e(k)$ représente le rapport cyclique du hacheur.

Les fonctions d'appartenances des variables d'entrées, les conclusions constantes de la variable de sortie ainsi que la table d'inférence du régulateur flou sont les mêmes que celles qui sont utilisé pour le système photovoltaïque. Seulement, on change les limites minimales L_{min} et maximales L_{max} de chaque entrée et sortie car elles dépendent du système éolien :

$L_{E_e min}$ Et $L_{E_e max}$ pour l'erreur E_e .
 $L_{\Delta E_e min}$ Et $L_{\Delta E_e max}$ pour la variation de l'erreur ΔE_e .
 $L_{d_e min}$ Et $L_{d_e max}$ pour la sortie d_e .

Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E_e converge toujours vers zéro, c.à.d. il faut que : $E_e(k) \cdot \Delta E_e(k) < 0$.

La valeur finale du signal de commande est donnée après agrégation des sorties individuelles et multiplication par le facteur d'échelle.

III.5. Le contrôleur flou appliqué à la stabilisation du bus continu

La régulation de tension du bus continu se fera grâce à l'élément de stockage, la batterie, qui, en stockant ou en restituant l'énergie, maintiendra l'équilibre production – consommation [23]. Cette régulation est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant connecté au banc de batteries.

Quand l'énergie fournie par les sources renouvelable est insuffisante pour faire face à une augmentation soudaine de la charge, la tension du bus continu devient inférieure à la valeur de référence. Dans ce cas, l'énergie manquante est obtenue à partir des batteries. Au contraire, quand il existe un excès d'énergie, il est utilisé pour recharger ces dernières.

La tension du bus continue V_{DC} doit être maintenue à la valeur de référence V_{DCref} . On peut assurer cette régulation en utilisant un régulateur flou type TSK, qui agit sur le rapport cyclique du hacheur réversible en courant, comme montré dans la figure (III.19).

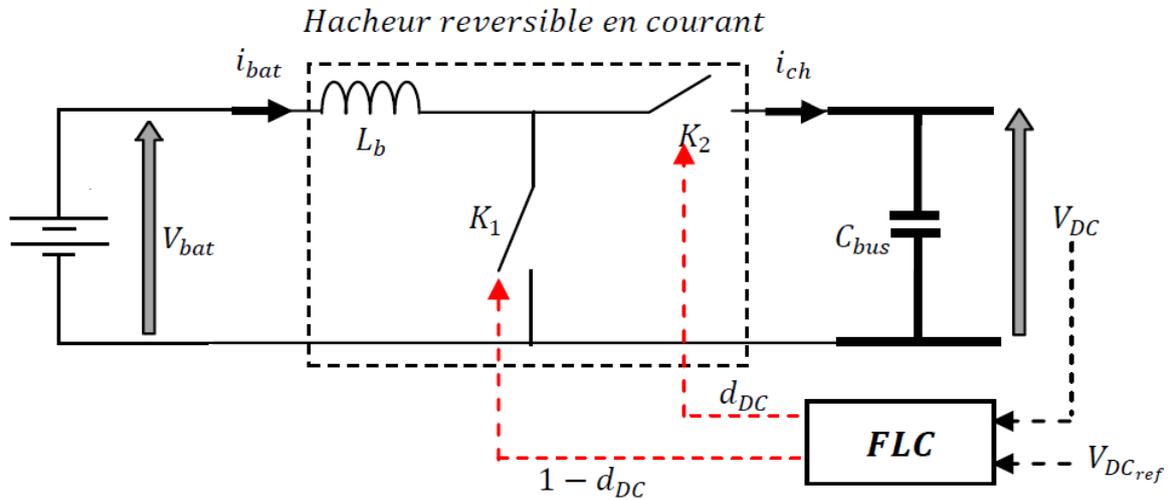


Figure III.19. Principe de régulation de la tension du bus continu par un contrôleur flou

Les entrées du régulateur flou sont choisies de la façon suivante :

L'erreur E_{DC} qui est représentée l'écart entre la tension V_{DC} du bus continu et la tension de référence V_{DCref} à des instants échantillonnés (k), elle est définie par :

$$E_{DC}(k) = V_{DC}(k) - V_{DCref}(k) \tag{III. 13}$$

Le changement de l'erreur ($\Delta E_{DC}(k)$)

$$\Delta E_{DC}(k) = E_{DC}(k) - E_{DC}(k - 1) \tag{III. 14}$$

La commande $u(k)$ représente le rapport cyclique du hacheur réversible en courant et donc $u(k) \in [0, 1]$.

$$u(k) = d_{DC}(k) \tag{III. 15}$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées, les conclusions constantes de la variable de sortie ainsi que la table d'inférence du régulateur flou sont les mêmes que celles qui sont utilisées précédemment dans les régulateurs flous assurant les MPPT. Avec une adaptation des limites des variables d'entrées et la sortie :

$L_{E_{DC}min}$ Et $L_{E_{DC}max}$ pour l'erreur E_{DC} .

$L_{\Delta E_{DC}min}$ Et $L_{\Delta E_{DC}max}$ pour la variation de l'erreur E_{DC} .

$L_{d_{DC}min}$ Et $L_{d_{DC}max}$ pour la sortie d_{DC} .

Les règles de contrôle sont désignées de sorte que la variable d'entrée E_{DC} converge toujours vers zéro, c.à.d. il faut que : $E_{DC}(k) \cdot \Delta E_{DC}(k) < 0$.

La valeur finale du signal de commande est donnée après agrégation des sorties individuelles et multiplication par le facteur d'échelle.

III.6. Le contrôleur flou appliqué au générateur diesel

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, et pour satisfaire la disponibilité d'énergie électrique pour la charge un générateur diesel est utilisé comme source de secours.

Dans notre application, le générateur diesel est connecté à un hacheur élévateur-abaisseur à travers un pont triphasé de diodes, le hacheur Buck boost est connecté au bus continu dans le but de maintenir la tension du bus constante quelle que soit la variation de charge.

Sachant que pour un hacheur buck-boost l'augmentation de son rapport cyclique provoque l'augmentation de la tension et vice versa.

On peut assurer cette régulation en utilisant un régulateur flou, qui agit sur le rapport cyclique du hacheur buck-boost comme montré dans la figure (III.20).

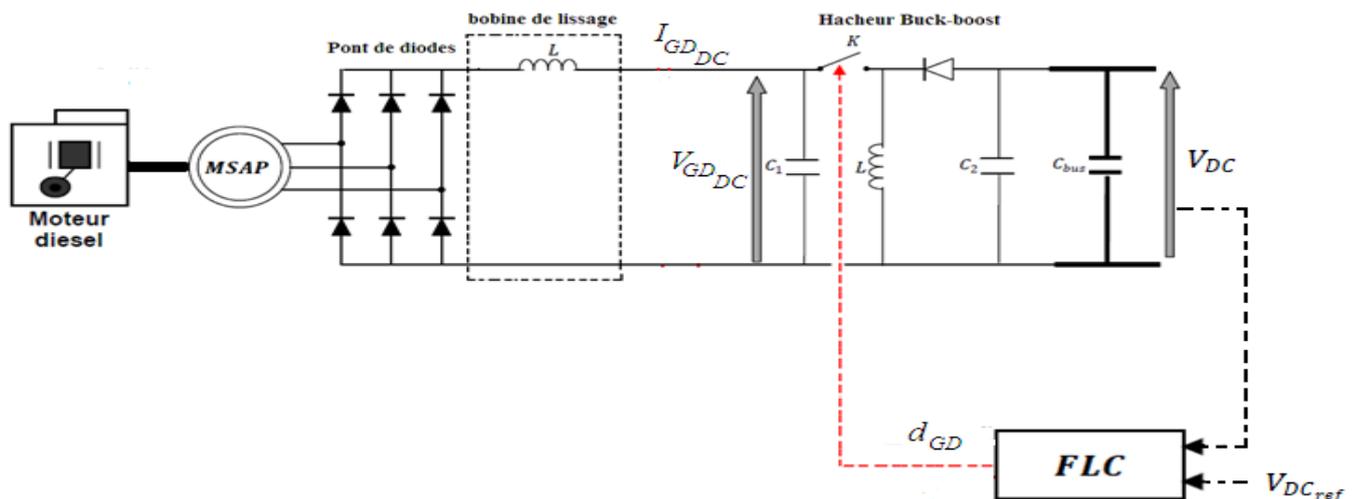


Figure III.20. Schéma de commande du générateur diesel par contrôleur flou

Les entrées et la sortie du régulateur flou sont choisies de la façon suivante :

L'erreur E_{DC} qui représente l'écart entre la tension V_{DC} du bus continu et la tension de référence $V_{DC_{ref}}$ à des instants échantillonnés (k), elle est définie comme suit :

$$E_{DC}(k) = V_{DC}(k) - V_{DC_{ref}}(k) \quad (\text{III. 16})$$

Le changement de l'erreur ($\Delta E_{DC}(k)$)

$$\Delta E_{DC}(k) = E_{DC}(k) - E_{DC}(k-1) \quad (\text{III. 17})$$

La commande $u(k)$ représente le rapport cyclique du hacheur buck-boost et donc $u(k) \in [0, 1]$.

$$u(k) = d_{GD}(k) \quad (\text{III. 18})$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées, les conclusions constantes de la variable de sortie ainsi que la table d'inférence du régulateur flou sont les mêmes que celles qui sont utilisées précédemment dans les régulateurs flous assurant les MPPT. Avec une adaptation des limites des variables d'entrées et la sortie :

$L_{E_{DC}min}$ Et $L_{E_{DC}max}$ pour l'erreur E_{DC} .

$L_{\Delta E_{DC}min}$ Et $L_{\Delta E_{DC}max}$ pour la variation de l'erreur E_{DC} .

$L_{d_{GD}min}$ Et $L_{d_{GD}max}$ pour la sortie d_{GD} .

Les règles de contrôle sont désignées de sorte que la variable d'entrée E_{DC} converge toujours vers zéro, c.à.d. il faut que : $E_{DC}(k) \cdot \Delta E_{DC}(k) < 0$.

La valeur finale du signal de commande est donnée après agrégation des sorties individuelles et multiplication par le facteur d'échelle.

III.7. Le contrôleur flou appliqué à l'onduleur monophasé

La connexion entre le bus continue et les équipements de la maison (charges) est réalisé à l'aide d'un onduleur monophasé. Les performances de ces équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation et donc le rôle de l'onduleur est d'assurer une tension alternative à fréquence et amplitude constantes quelle que soit la charge, et de diminuer au maximum les harmoniques sur les courants et les tensions.

Pour cela plusieurs stratégies de commandes se sont développées comme la commande par la modulation de la largeur d'impulsion (MLI), La commande par mode de glissements ...

Dans notre application, la tension de sortie de l'onduleur V_{C_f} doit suivre une tension sinusoïdale de référence $V_{C_f Ref}$.

On peut assurer cette régulation en utilisant un régulateur flou, qui agit sur les durées de commutation des interrupteurs.

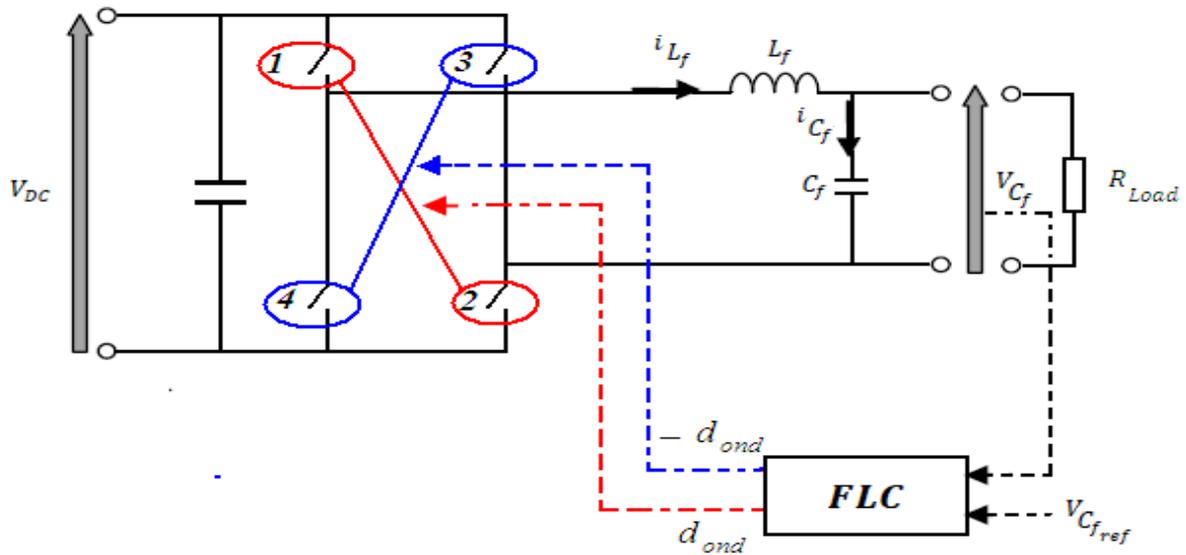


Figure III.21. Schéma de commande de l'onduleur par contrôleur flou.

Les entrées et la sortie du régulateur flou sont choisies de la façon suivante :

L'erreur (E_{C_f}) qui représente l'écart entre la tension V_{C_f} de sortie de l'onduleur et la tension sinusoïdale de référence $V_{C_f,Ref}$ à des instants échantillonnés (k), elle est définie comme suit :

$$E_{C_f}(k) = V_{C_f}(k) - V_{C_f,Ref}(k) \quad (III. 19)$$

Le changement de l'erreur ($\Delta E_{C_f}(k)$)

$$\Delta E_{C_f}(k) = E_{C_f}(k) - E_{C_f}(k - 1) \quad (III. 20)$$

La commande $u(k)$ représente un rapport cyclique pour les deux alternances positive et négative donc $u(k) \in [-1, 1]$. c.à.d.

$$u(k) = d_{ond}(k) \quad (III. 21)$$

Si $d_{ond}(k) \in [0, 1]$ donc c'est la durée de fermeture des interrupteurs (1et 2).

Si $d_{ond}(k) \in [-1, 0]$ donc c'est la durée de fermeture des interrupteurs (3et 4).

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées, les conclusions constantes de la variable de sortie ainsi que la table d'inférence du régulateur flou sont les mêmes que celles qui sont utilisées précédemment dans les régulateurs flous assurant les MPPT. Avec une adaptation des limites des variables d'entrées et la sortie :

$L_{E_{C_f}min}$ Et $L_{E_{C_f}max}$ pour l'erreur E_{C_f}

$L_{\Delta E_{C_f}min}$ Et $L_{\Delta E_{C_f}max}$ pour la variation de l'erreur ΔE_{C_f}

$L_{d_{ond}min}$ Et $L_{d_{ond}max}$ pour la sortie d_{ond} .

Les règles de contrôle sont désignées de sorte que la variable d'entrée E_{C_f} converge toujours vers zéro, c.à.d. il faut que : $E_{C_f}(k) \cdot \Delta E_{C_f}(k) < 0$.

La valeur finale du signal de commande est donnée après agrégation des sorties individuelles et multiplication par le facteur d'échelle

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné l'architecture et l'algorithme de fonctionnement du système de supervision pour gérer automatiquement et de manière optimale l'énergie électrique produite dans le système hybride, nous avons vu l'application de la commande par logique floue dans l'optimisation des générateurs photovoltaïques et éoliens en poursuivant leur point de puissance maximale.

D'autre part nous avons aussi vu comment, synthétiser un régulateur flou en vue, de la stabilisation de la tension du bus continu par batterie et par le générateur diesel. Enfin, la tension de sortie de l'onduleur, qui doit répondre à certaines normes et exigences, a été aussi commandée par un régulateur flou.

CHAPITRE IV
RESULTATS DE SIMULATION

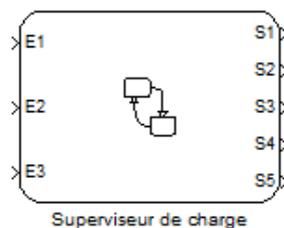
IV.1. Introduction

Les logiciels de simulations sont des outils puissants qui testent et évaluent l'exécution théorique des systèmes. La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé. Pour ce but nous avons effectué les simulations sous l'environnement MATLAB/SIMULINK qui est un standard dans le domaine de l'ingénierie, La simulation et le calcul numérique.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation du SEH pour la maison isolée avec la commande hybride. Nous commençant par l'analyse et le comportement du système de gestion et de supervision pour des différentes situations, nous évaluons ensuite la méthode MPPT floue appliquée sur les systèmes photovoltaïque et éolien, passant à la stabilisation de la tension du bus continu par batteries de stockages et générateur diesel. Finalement, des simulations de la tension de sortie de l'onduleur monophasé, commandé par le même régulateur flou et des tests de robustesse sur les différents sous-systèmes.

IV.2. Simulation du système de supervision

En présente dans cette section la simulation du système de supervision, pour cela on suppose certaines situations (entrées E_i), et on suit le comportement du superviseur (sorties S_i) face à cette dernières par rapport au cahier de charge donné, ce qui permet donc d'évaluer la commande toute ou rien



- E1 est la sortie du comparateur de tension minimale ($E1=1$ si $V_{bat} > 75V$);
- E2 est la sortie du comparateur de tension maximale ($E2=1$ si $V_{bat} > 100V$);
- E3 est la sortie du détecteur de démarrage du GD;
- S1 commande le relais de connexion/déconnexion entre les batteries et le système d'énergie renouvelable et la maison;
- S2 commande le relais de connexion/déconnexion entre le GD et la maison;
- S3 commande le démarrage et l'arrêt du générateur diesel;
- S4 commande le branchement et le débranchement de la Dump Load;
- S5 signal d'erreur sur le GD.

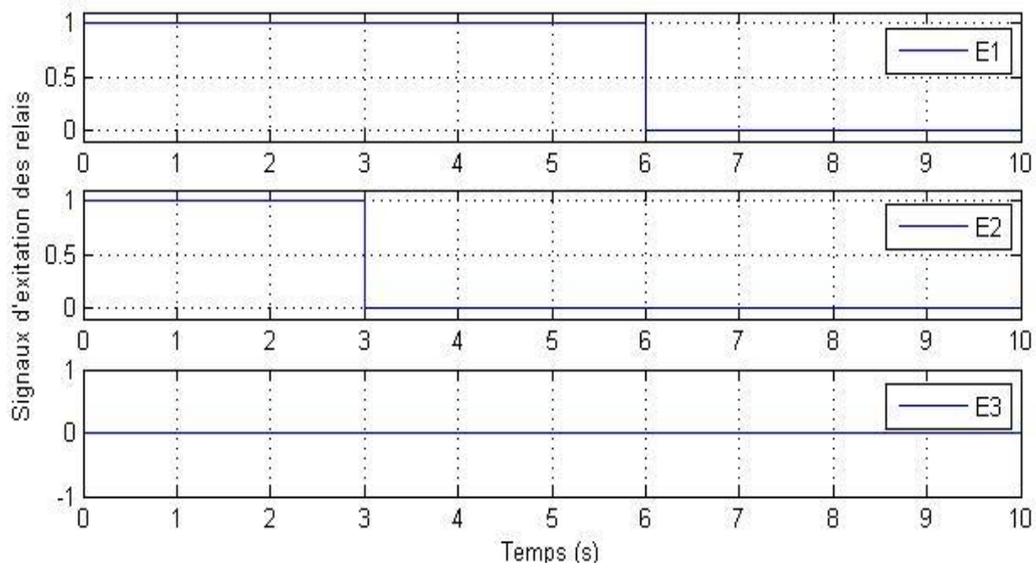


Figure IV.1. Entrées d'évaluation du système de supervision

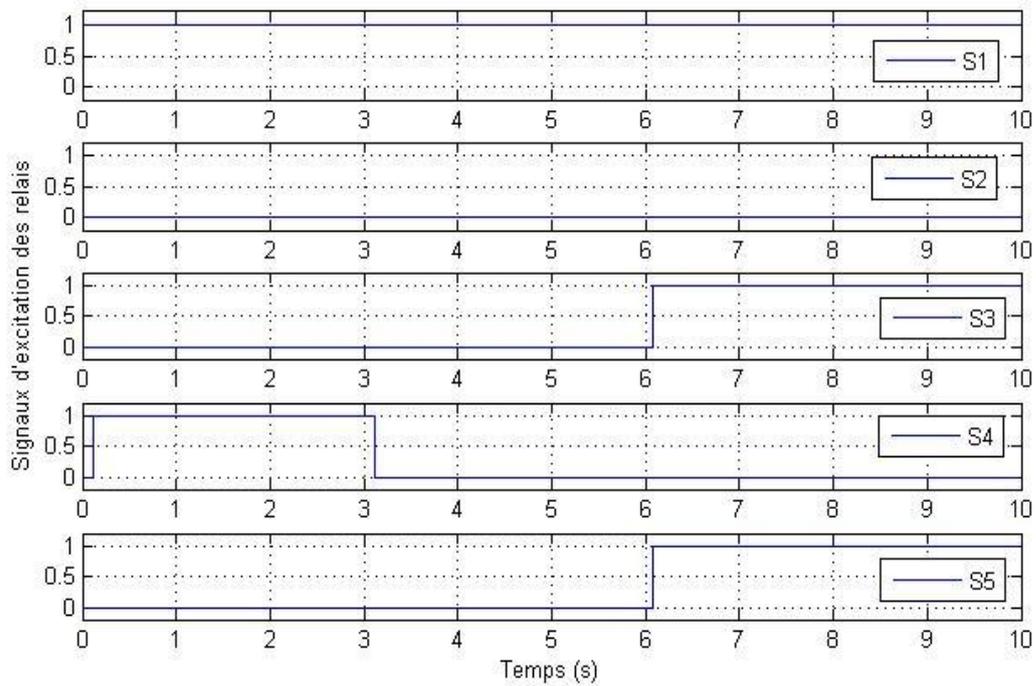


Figure IV.2. Le comportement du système de supervision

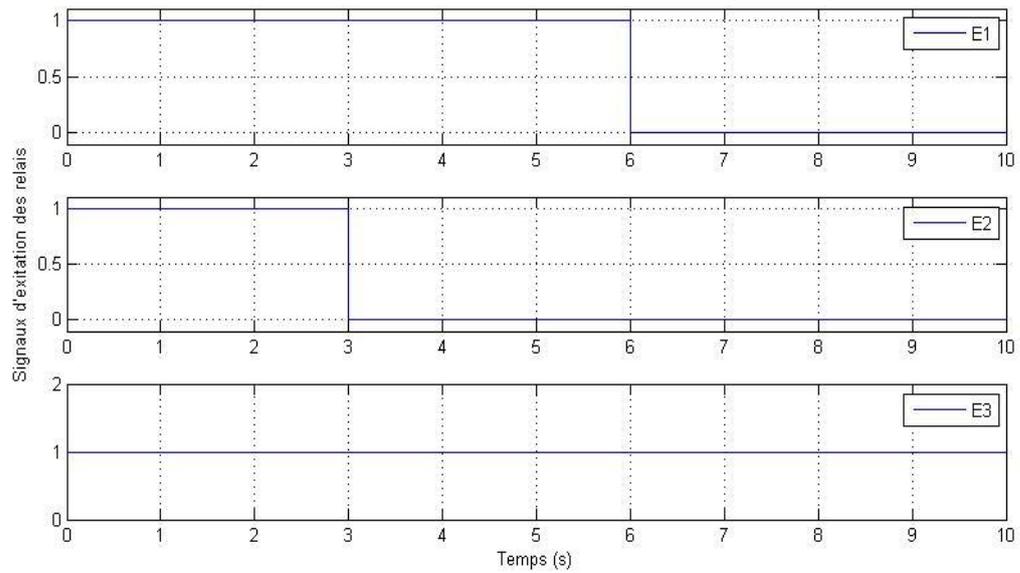


Figure IV.3. Entrées d'évaluation du système de supervision

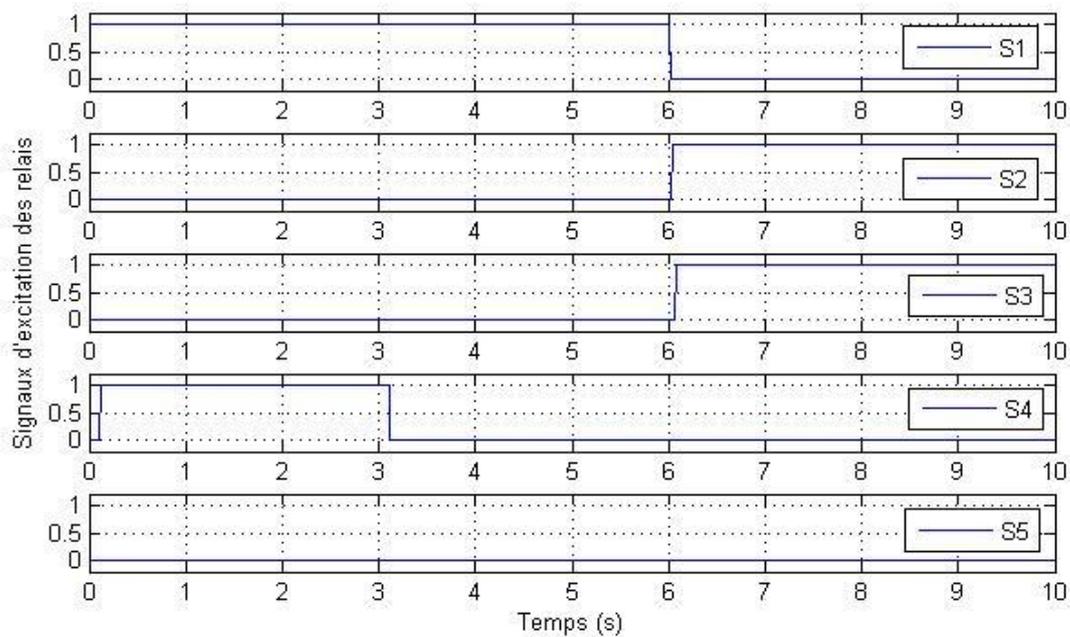


Figure IV.4. Le comportement du système de supervision

D'après ces résultats on voit que le système de supervision suit le cahier de charge pour chaque condition d'entrée, d'où l'efficacité de la commande toute ou rien utilisé

IV. 3. Simulation de la chaine de production photovoltaïque

IV.3.1. Comportement du système photovoltaïque sans contrôleur MPPT

Pour simuler le système sans contrôleur MPPT fluo, le générateur photovoltaïque a été branché directement sur le bus continu. Le but de cette simulation est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale. La figure (IV.6) montre le fonctionnement du système sans contrôleur MPPT.

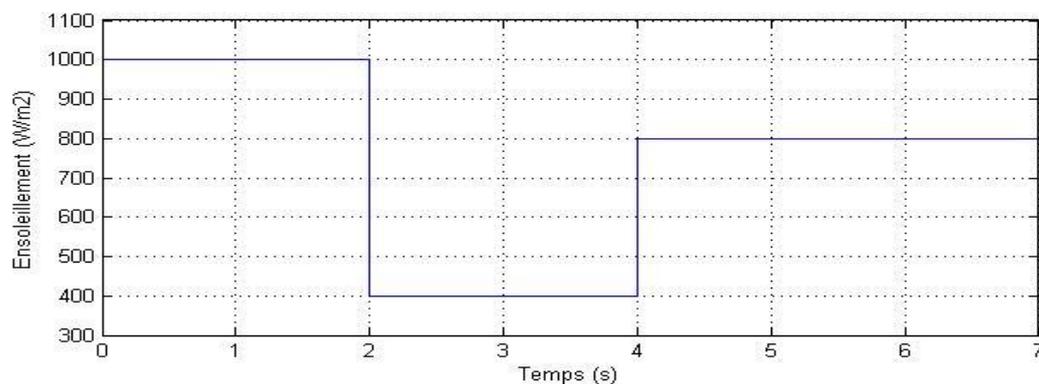


Figure IV.5. Profile d'ensoleillement (W/m²)

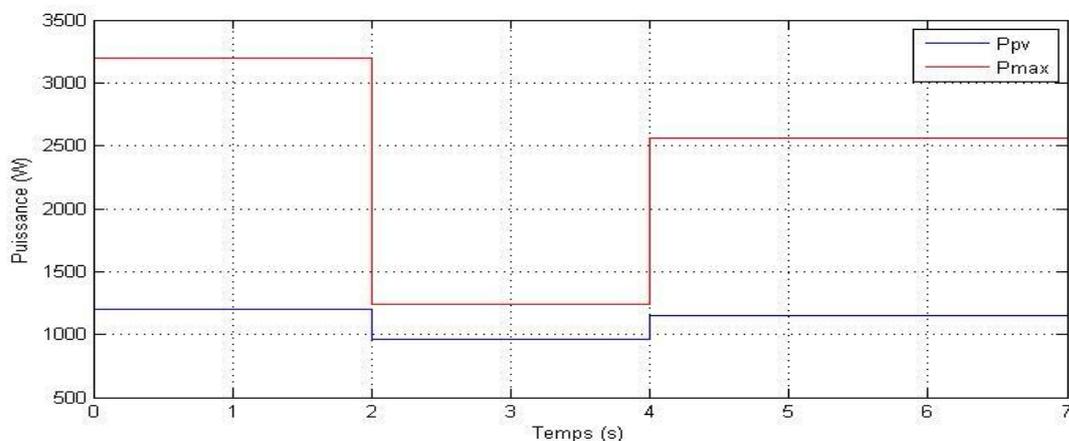


Figure IV.6. Comportement du système sans contrôleur MPPT (T=25°C)

Les résultats de simulation obtenus sur la figure (IV.6) montrent le décalage entre la puissance maximale et celle obtenue. On confirme donc la nécessité d'introduire un contrôleur MPPT pour le système PV.

IV.3.2. Fonctionnement du système photovoltaïque sous des conditions constantes

Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : (25°C , 1000 W/m^2).

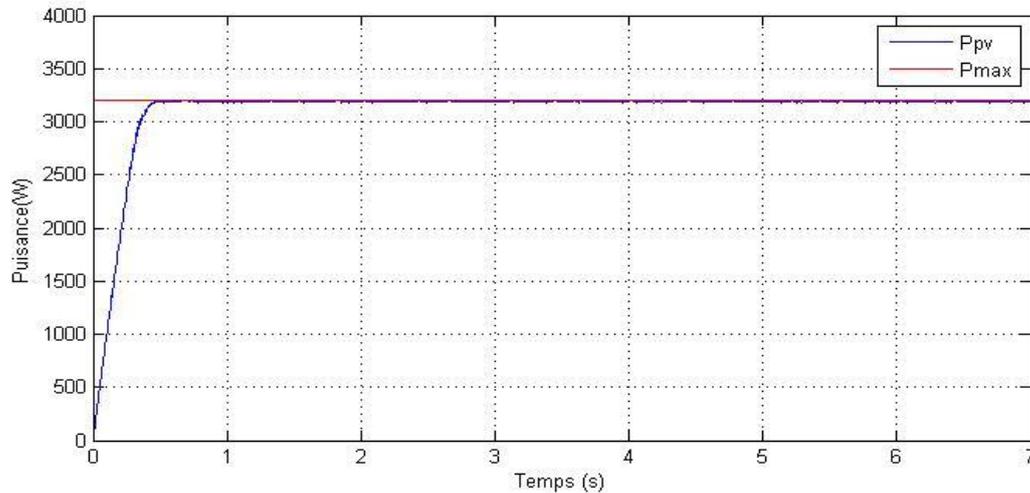


Figure IV.7. Réponse du système PV à $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$

IV.3.3. Fonctionnement sous des conditions météorologiques variables

a) Comportement du système face à un changement de l'éclairement

Afin d'évaluer l'efficacité du mécanisme de poursuite, le système photovoltaïque est soumis à des variations des conditions météorologique. Les ombres des structures, de la végétation, et des nuages auront comme conséquence des changements soudains de l'ensoleillement et de la température.

Pour voir le comportement du système PV face aux changements de l'ensoleillement on va lui faire subir une variation brutale de l'ensoleillement (en échelon) et lente (en rampe).

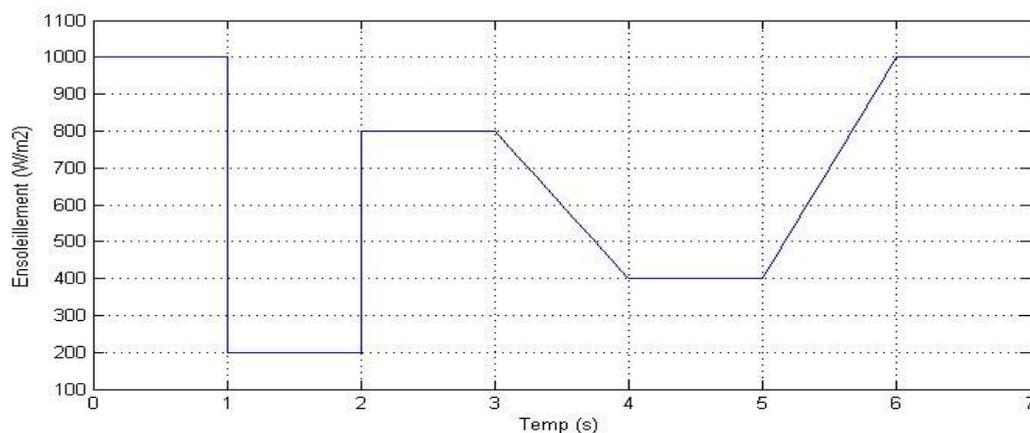


Figure IV.8. Profil d'ensoleillement (W/m^2)

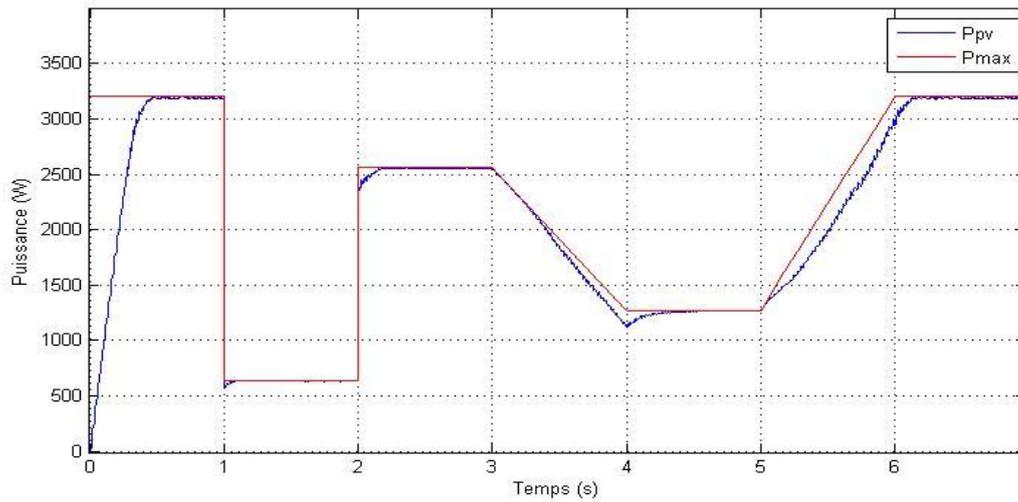


Figure IV.9. Réponse du système photovoltaïque à des variations de l’ensoleillement (T= 25 °C)

b) Comportement du système face à un changement de température

En plus de l’ensoleillement, la température de la cellule solaire est un facteur important qui influe sur les caractéristiques du panneau solaire.

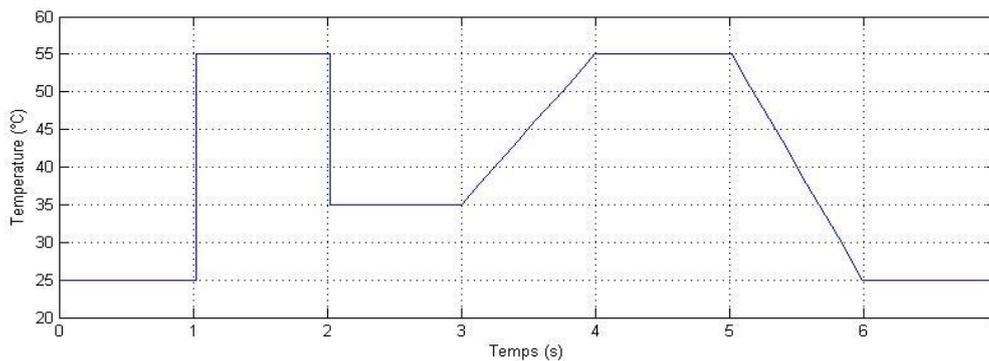


Figure IV.10. Profile de la température (°C)

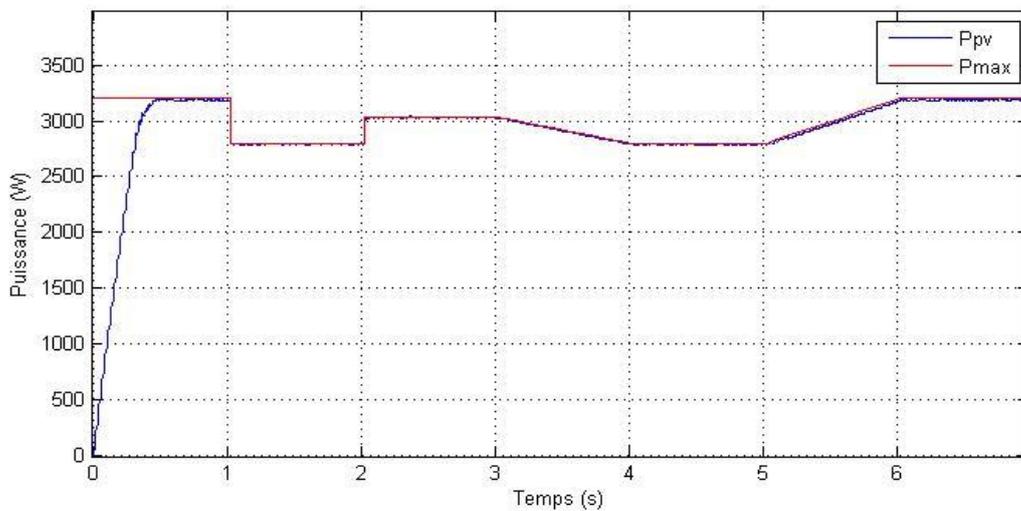


Figure IV.11. Réponse du système photovoltaïque à des variations de la température. (G=1000W/m2)

Nous constatons d'après ces résultats que le système PV poursuit son point de puissance maximale quelle que soit les conditions météorologiques grâce à l'introduction du contrôleur MPPT flou d'où l'efficacité de ce mécanisme de poursuite.

IV.4. Simulation de la chaine de production éolienne

IV.4.1. Fonctionnement du système éolien sans MPPT

Comme on a fait pour le système photovoltaïque, on va simuler le système éolien sans commande MPPT, pour bien confirmer sa nécessité, on branche donc le système éolien directement sur le bus continu pour une vitesse du vent égale à 5.5 m/s. la figure suivante montre le fonctionnement du système sans contrôleur MPPT.

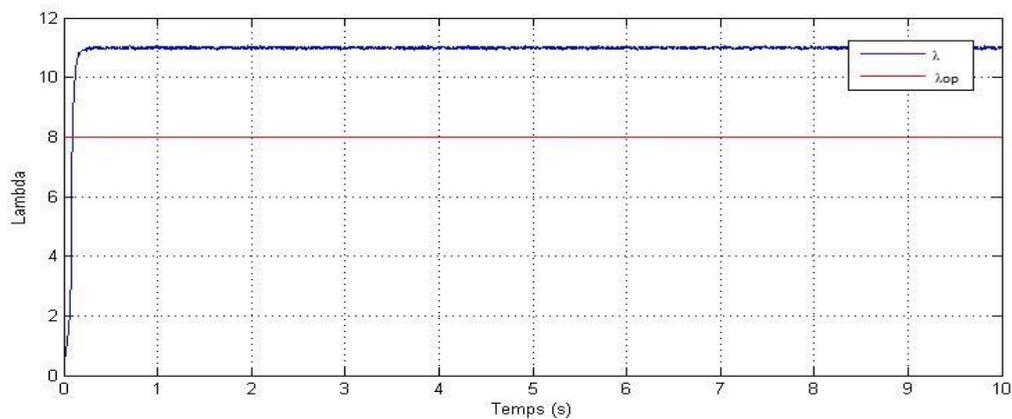


Figure IV.12. Vitesse spécifique

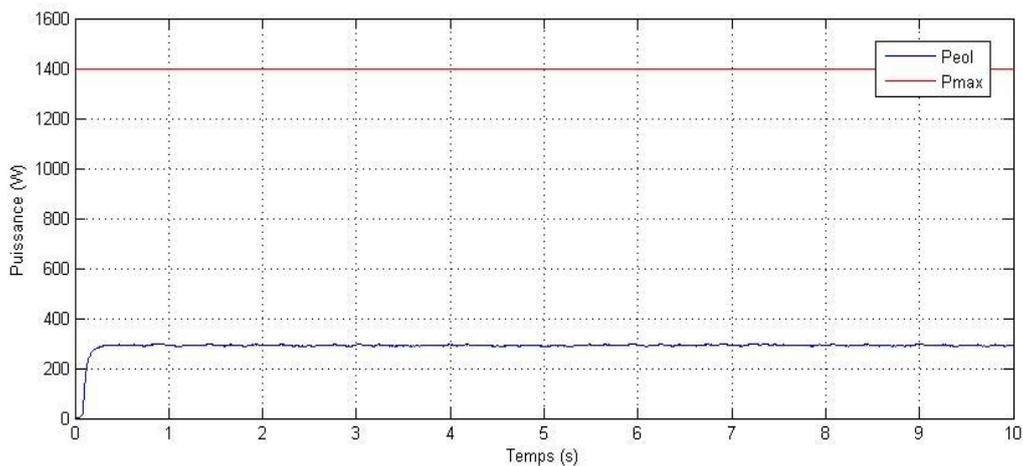


Figure IV.13. Comportement du système éolien sans MPPT

Les résultats de simulation obtenus sur la figure (IV.13) montrent le décalage entre la puissance maximale et celle obtenue, Ça se voit aussi à travers la vitesse spécifique λ qui doit atteindre sa valeur optimale 8. On confirme donc la nécessité d'introduire un contrôleur MPPT pour le système éolien.

IV.4.2. Fonctionnement du système éolien sous des conditions constantes

Dans cette section nous figurons la puissance et la vitesse spécifique λ du système éolien sous des conditions constantes à une vitesse du vent égale à 5.5 m/s.

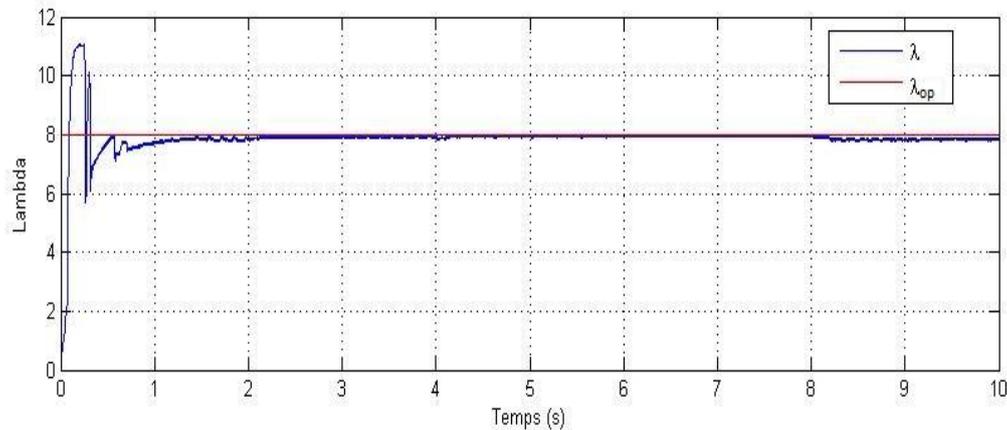


Figure IV.14. Vitesse spécifique

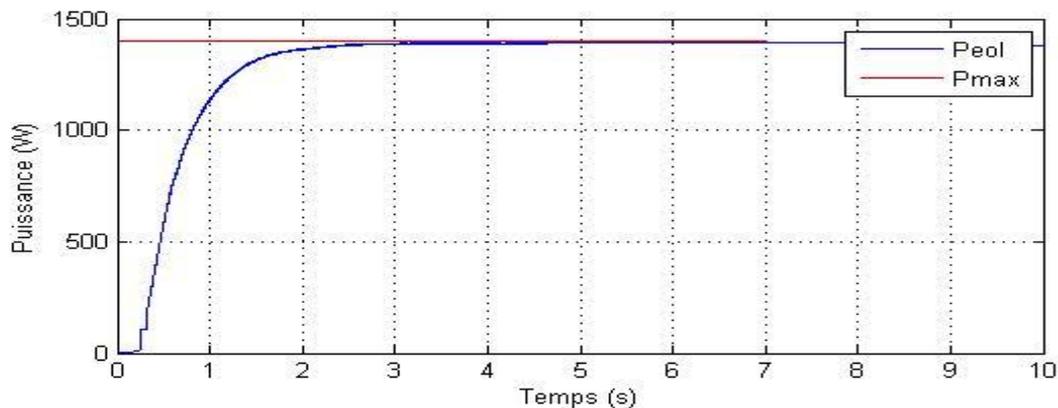


Figure IV.15. Comportement du système éolien à une vitesse du vent de 5.5 m/s.

La puissance délivrée par le générateur éolien a atteint son maximum au bout de 3s, ça ce voit à travers la figure illustrant la puissance, et se vérifie à travers la vitesse spécifique λ . Cette dernière atteint sa valeur optimale 8 qui correspond à un coefficient de puissance $C_{P_{max}} = 0.48$ pour l'angle d'inclinaison des pales choisi, $\beta=0$.

IV.4.3. Fonctionnement sous des variations de la vitesse du vent

Pour tester l'efficacité de la stratégie de commande permettant à l'éolienne de poursuivre son point de puissance maximale, un test a été fait sous un profil du vent à vitesse variable.

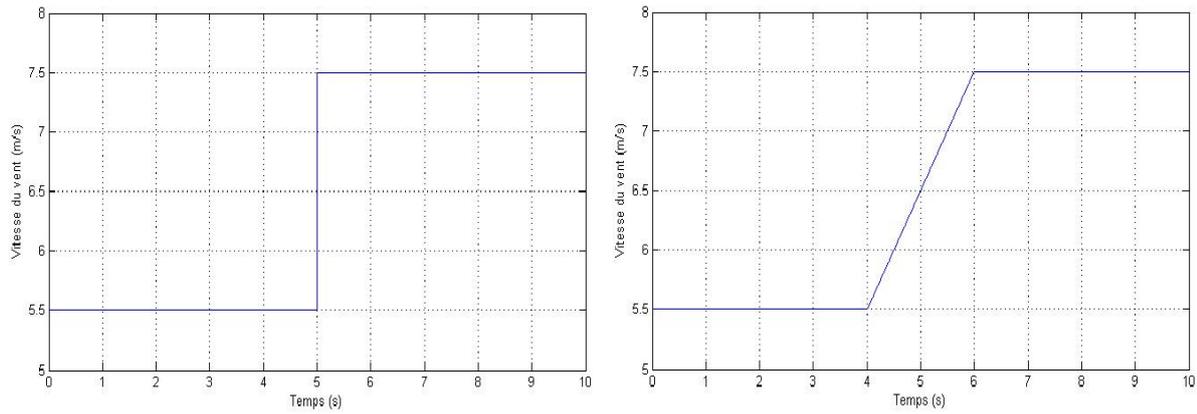


Figure IV.16. Vitesse du vent (m/s) (à gauche variation brusque, à droite lente)

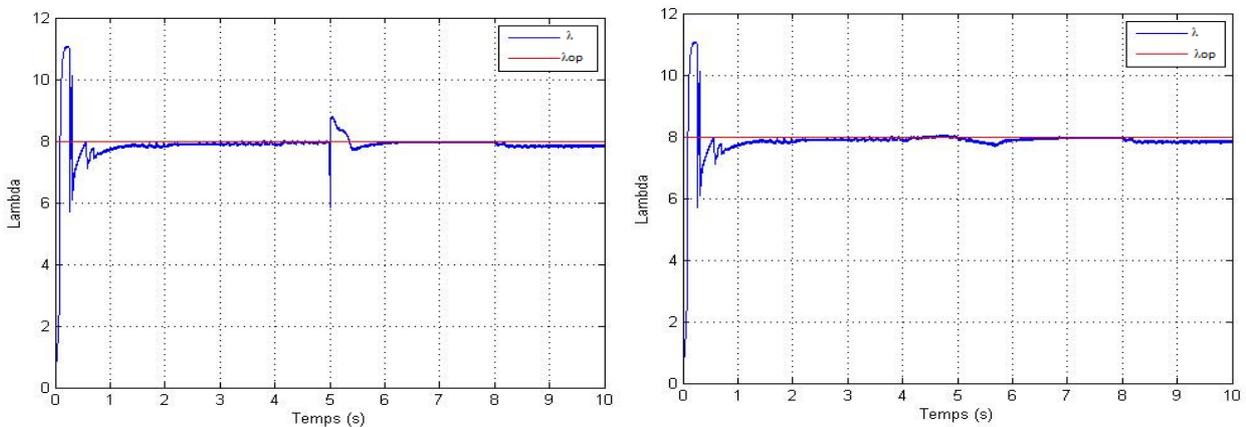


Figure IV.17. Vitesse spécifique

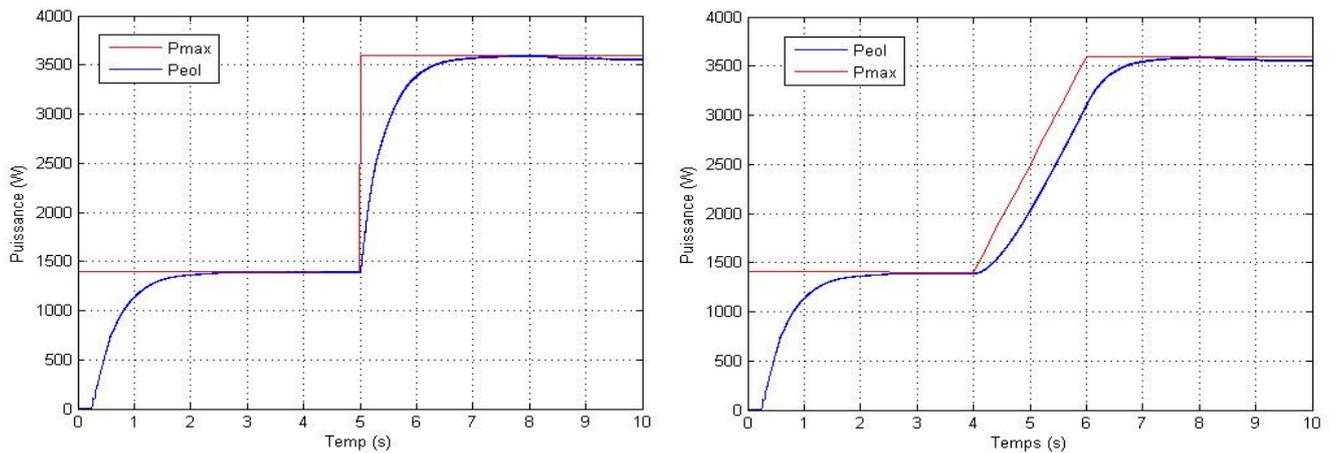


Figure IV.18. Puissance électrique produite par la chaîne éolienne face à une variation brusque (à gauche) et lente (droite) de la vitesse du vent

Nous constatons d’après ces résultats que le système éolien poursuit son point de puissance maximale quelle que soit la vitesse du vent grâce à l’introduction du contrôleur MPPT flou d’où l’efficacité de ce mécanisme de poursuite

IV.5. Simulation du bus continu (Test de robustesse)

Comme on a vu précédemment, le nombre des batteries a été choisi pour avoir une tension nominale égale à 84V. Suivant ce choix, la tension du bus continu doit être maintenue à une tension de 70 V ; c'est la fonction du régulateur flou. Il doit la stabilisée, malgré les chutes de tension soudaines provoquées par les appels des courants de charges.

Le maximum de courant de charge présenté dans la figure de simulation suivante est 20 A. Ce qui correspond à une charge maximale de 1300 W de puissance sans pertes dans les convertisseurs. Tout en supposant que les énergies renouvelables ne délivrent aucune puissance.

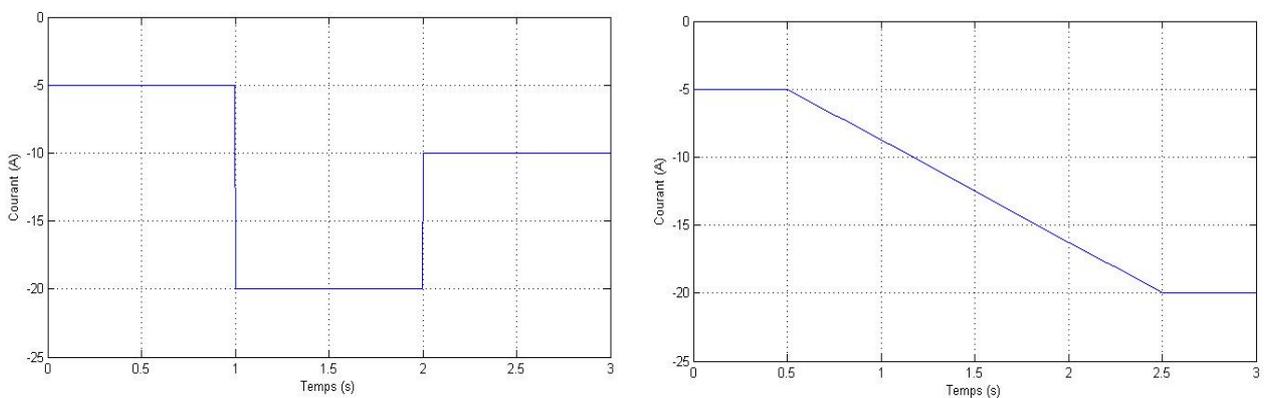


Figure IV.19. Courant de charge (A) (à gauche variation brusque, à droite lente)

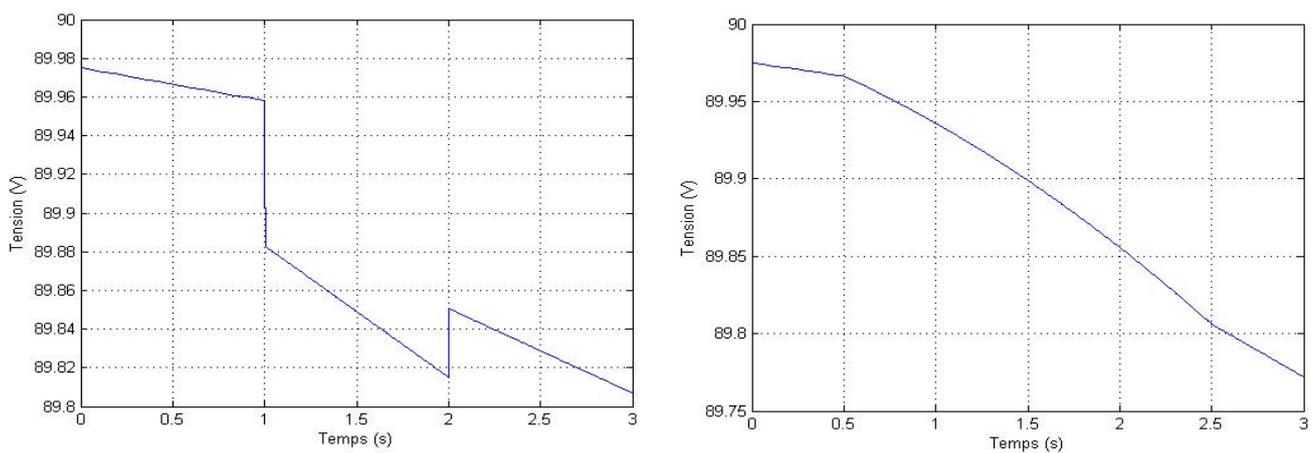


Figure IV.20. Tension de la batterie (V)

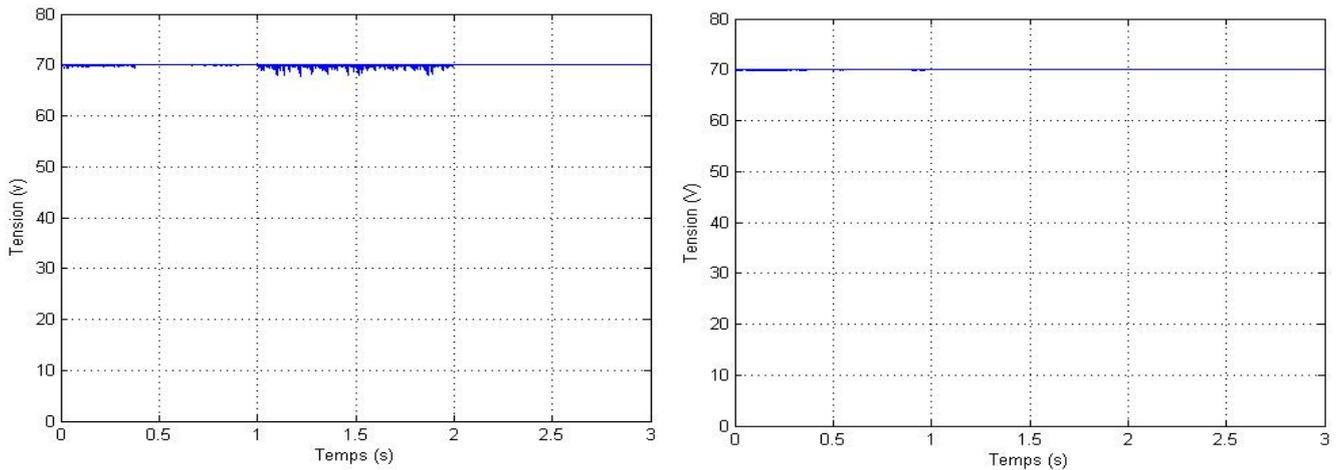


Figure IV.21. Tension du bus continu (V) face à des variations brusques (à gauche) et lente (à droite) de courant de charge.

Nous constatons d’après ces résultats que la tension du bus continu maintient sa valeur de référence quelle que soit le courant de charge appelé.

IV.6. Simulation du Groupe Diesel

On présente dans cette section les grandeurs importantes du générateur diesel (tension de sortie, vitesse de rotation) tout en vérifiant l’efficacité de la commande floue sur la stabilisation de bus continu par ce dernier à 70V, face à une variation de courant de charge.

IV.6.1. Simulation sous un courant de charge constant

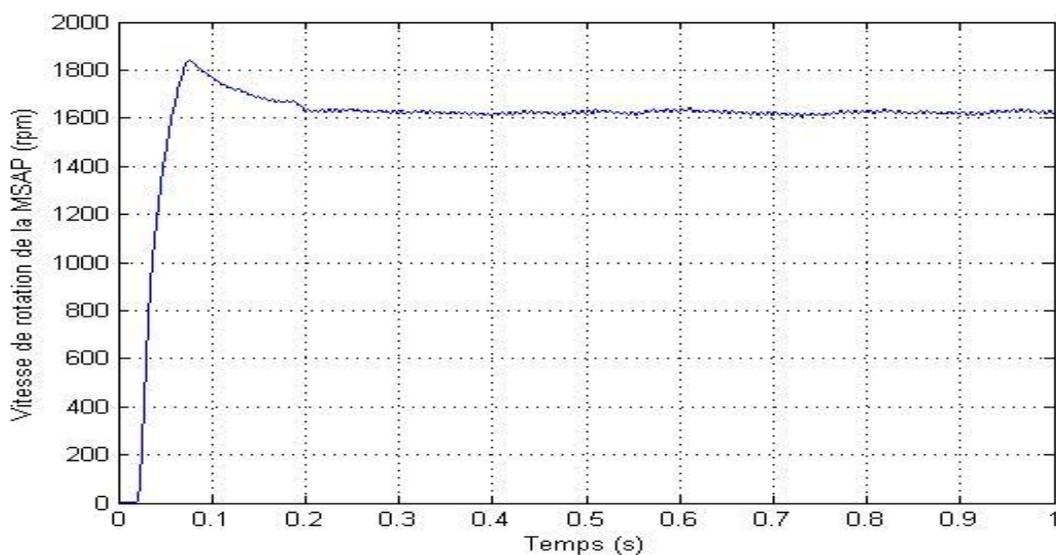


Figure IV.22. Comportement du GD sous condition constante de courant de charge

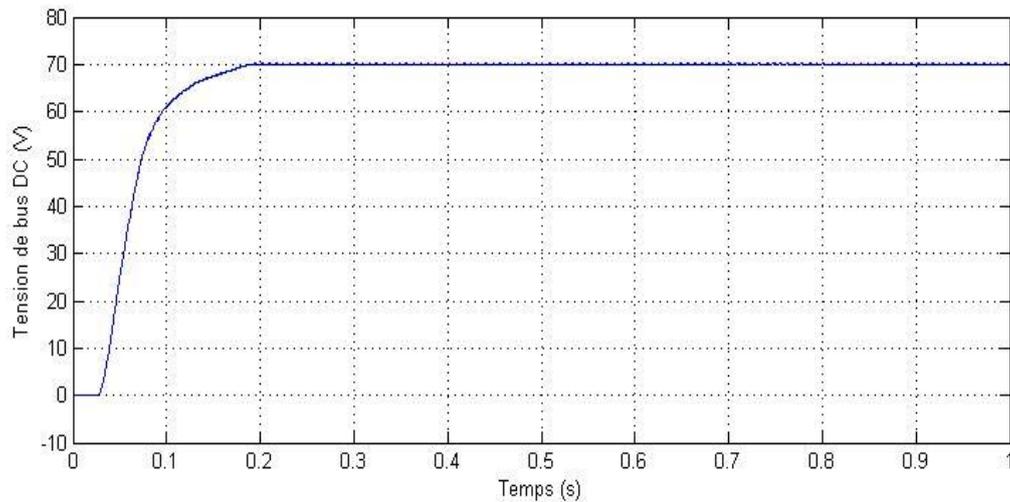


Figure IV.23. Tension à la sortie de convertisseur DC/DC

On voit qu'après un régime transitoire, le générateur diesel délivre une vitesse constant ce qui permet de maintenir la tension du bus continu constante.

IV.6.2. Test de robustesse face à une variation de courant de charge

Dans ce test, on fait monter le courant de charge de 25% à 0.5s.

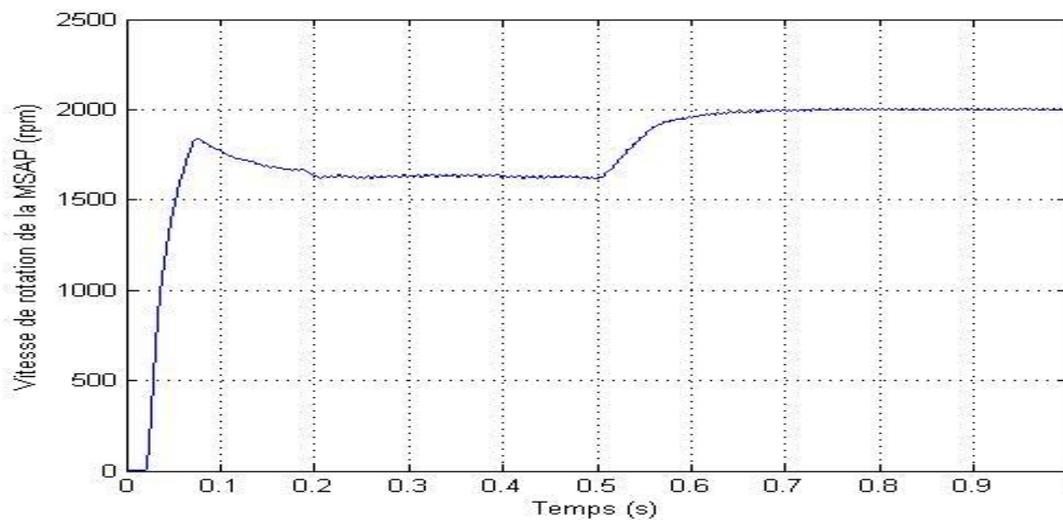


Figure IV.24 Comportement du GD sous condition variable de courant de charge

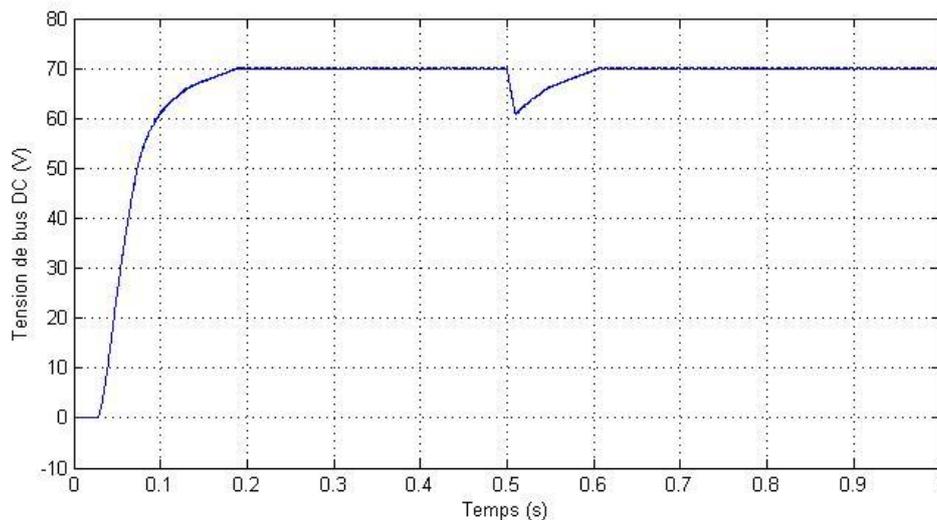


Figure IV.25.Tension à la sortie de convertisseur DC/DC

Ce résultat montre que le générateur diesel maintien la tension du bus continu à sa valeur de référence après une augmentation du courant de charge, grâce à la commande floue du hacheur buck-boost qui augmente la vitesse de la MSAP.

IV.7. Simulation de la tension de sortie de l'onduleur

Dans cette section, des simulations de la tension de sortie de l'onduleur ont été effectuées. La tension d'entrée de l'onduleur est de 70V, il est commandé pour délivrer une tension sinusoïdale de 24V d'amplitude et de 50 Hz de fréquence, malgré les variations de courant de charge ou la tension de la tension d'entrée (tension du bus continu).

IV.7.1. Test de robustesse face à une variation de la tension de bus DC

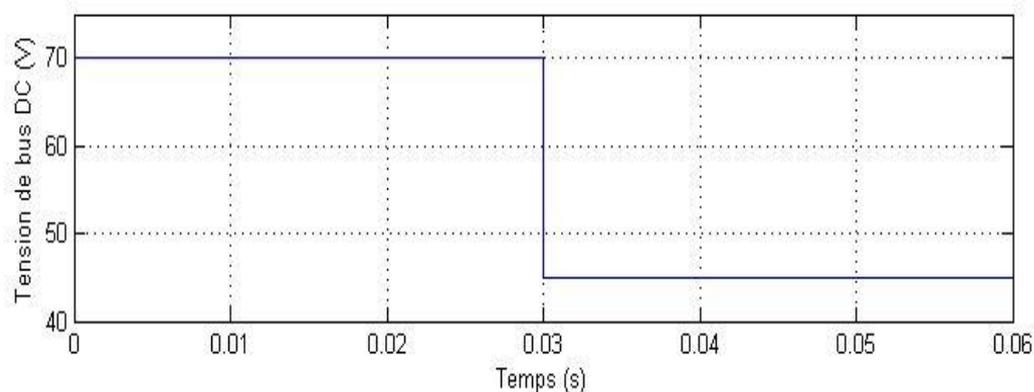


Figure IV.26.Tension de bus continu

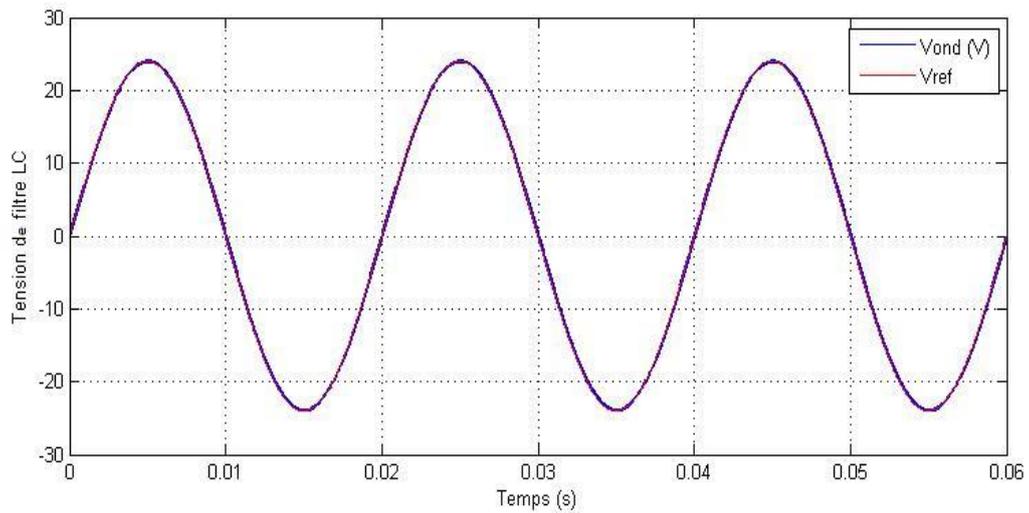


Figure IV.27. Comportement de la tension de filtre face aux variations de la tension de bus continu

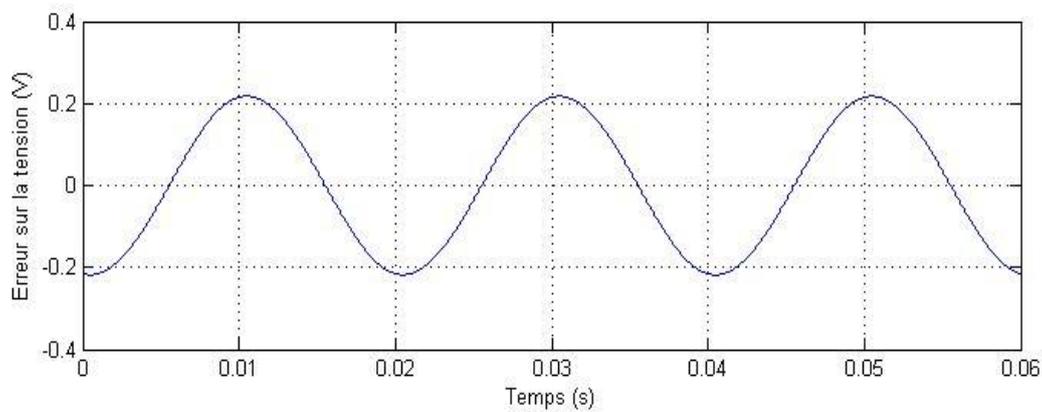


Figure IV.28. Erreur sur la tension de filtre face aux variations de la tension de bus continu

IV.7.2. Test de robustesse face à une variation du courant de charge

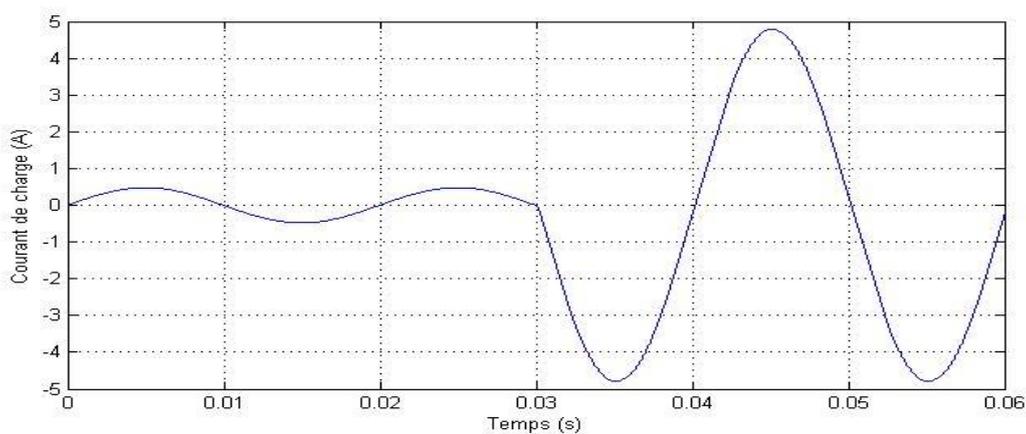


Figure IV.29. Courant de la charge

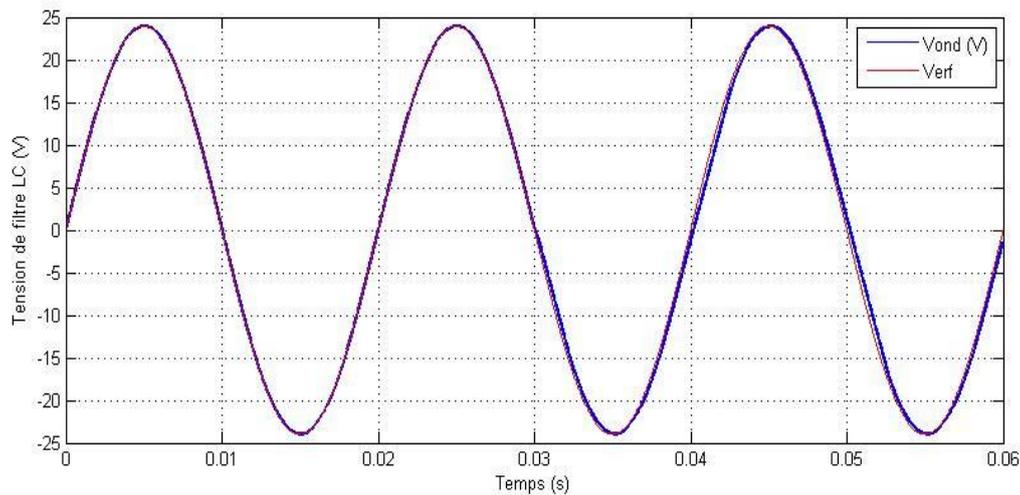


Figure IV.30. Comportement de la tension de filtre face aux variations de courant de la charge

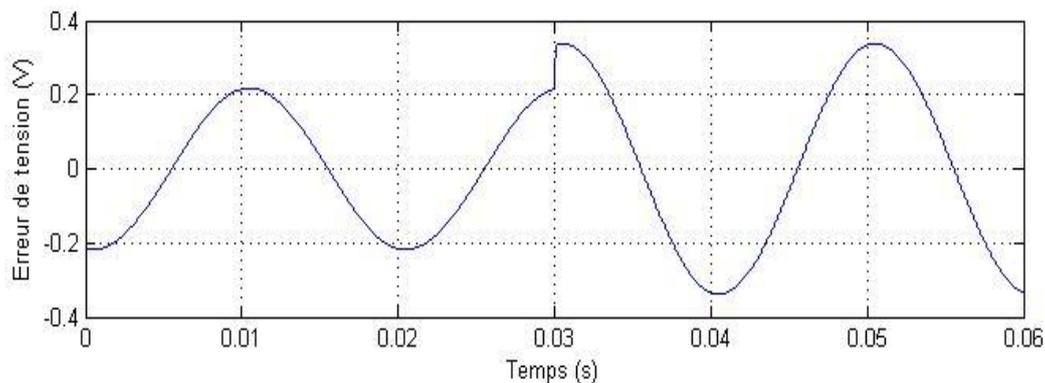


Figure IV.31. Erreur sur la tension de filtre face aux variations de courant de la charge

Les résultats de simulation de la commande sont satisfaisants. La commande a montré sa robustesse par rapport aux changements brusques de la charge, et de la tension d'entrée.

IV.8. Conclusion

Les résultats figurantes dans ce chapitre nous permettent de valider les concepts théoriques de chaque commande appliquée pour les différents sous système du SEH (hacheur, onduleur, bus continu, etc.) de mètre en ouvre la robustesse de la commande floue et d'évaluer en particulier l'efficacité des systèmes de poursuite du point de puissance maximale utilisés par les sources d'énergie renouvelable se pendant les variations météorologique.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire concerne un système hybride dans un site isolé capable d'un fonctionnement autonome, des améliorations dans la conception et le fonctionnement de ces systèmes dans le cadre de l'habitat sont nécessaires pour rendre plus compétitive l'intégration des sources d'énergies alternatives dans le bilan des systèmes globaux de production d'énergie et pour un meilleur respect de l'environnement. Aujourd'hui, il est nécessaire d'apporter des changements à nos habitations, responsables de 47% de la consommation énergétique mondiale et 25% des émissions de gaz à effet de serre.

L'étude réalisée dans ce mémoire s'est portée sur le concept d'un système hybride d'une maison isolée. Dans ce contexte, une commande par logique floue a été développée afin de commander et optimiser notre système hybride constitué par une éolienne, des panneaux PV, générateur diesel et batteries de stockage dans le but d'analyser son comportement et maîtriser ses performances.

Après un rappel sur les SEH en général, Les différents concepts et définitions des maisons performantes, rencontrés dans la littérature, nous nous sommes intéressés à un Système Hybride d'une maison isolée du type Eolien/Photovoltaïque/Diesel et Batteries de stockage Pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables, le dimensionnement l'optimisation ainsi qu'une stratégie de fonctionnement des composants ont été réalisés en tenant compte de la charge et de la disponibilité des ressources renouvelables. Ensuite, les modèles de simulation pour les sources du SEH, les éléments d'interconnexion et le système de stockage ont été développés.

Comme précisé précédemment, un des objectifs des systèmes hybrides est d'assurer la continuité de l'énergie demandé par la charge, un ajustement est donc nécessaire, pour gérer automatiquement et de manière optimale l'énergie électrique produite, pour cela et sur la base d'un cahier de charge et un mode de fonctionnement bien définis, nous avons conçu une architecture de supervision et l'implémenté dans l'environnement State Flow /MATLAB.

Le capteur photovoltaïque a été choisi pour faire partie de notre système d'énergie hybride. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on a équipé notre générateur PV d'un système MPPT pour qu'il puisse délivrer le maximum de puissance, pour cela on a intercalé un hacheur élévateur-abaisseur entre le générateur et le bus continu. Ce dernier est commandé par un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang.

Notre étude s'est focalisée aussi sur l'éolien urbain, secteur qui nécessite un fort degré d'optimisation de l'efficacité énergétique, notamment dans le cadre de habitat. La machine synchrone à aimant permanent a été choisie comme génératrice car elle est la mieux adaptée pour les applications de petites puissances et en site isolé du réseau électrique. Pour maximiser la récupération de l'énergie contenue dans le vent et dans un souci de simplification et de minimisation des coûts, on a choisi une structure simple basée sur un pont de diodes et un hacheur connecté au bus continu. Après une modélisation de toute la chaîne de conversion éolienne proposée, une recherche opérationnelle du point de puissance maximale (MPPT) a été développée grâce à un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang qui commande le hacheur utilisé.

La modélisation des composants du système de stockage d'énergie a aussi été réalisée. Un modèle de batterie simplifiée relatif au système de stockage électrochimique (batteries plomb-acide) ainsi que celui du hacheur réversible en courant et celui du bus continu, ont été adoptés.

La charge et la décharge des batteries sont contrôlées à travers un hacheur réversible en courant, ce dernier est commandé par un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang pour stabiliser la tension sur le bus continu, bus sur lequel sont connectés les sources d'énergie renouvelable et l'onduleur qui permet le couplage aux équipements de la maison.

Le générateur diesel a été aussi présenté dans notre travail, il a été modélisé en tenant compte de tous ses éléments qui sont : le moteur diesel, la machine synchrone à aimant permanent et le régulateur de tension. Ce générateur diesel va être utilisé comme source de secours, pour stabiliser la tension sur le bus continu en cas de décharge des batteries et absence de l'énergie renouvelables. Pour cela on a choisi la structure basée sur un pont de diodes et un hacheur connecté au bus continu. La régulation de la de tension face à la variation des charges est assurée par un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang qui commande le hacheur utilisé.

Comme précisé précédemment, un autre objectif des systèmes hybrides est de générer aux équipements de la maison une énergie électrique de qualité. Pour cela un onduleur monophasé a été modélisé avec un filtre LC pour lisser la puissance convertie. Pour assurer une tension alternative à fréquence et amplitude constantes quelle que soit la charge, on a commandé ce dernier par un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang.

Les simulations ont permis de tester les performances de la commande floue du point de puissance maximale utilisées, pour différentes conditions météorologiques. Elles ont mis en évidence un comportement bien stable du bus continu, d'abord par les batteries en présence des variations de sources et de charges, ensuite par le générateur diesel en cas d'absence des énergies renouvelables et décharge des batteries.

La commande de l'onduleur monophasé par un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno-Kang a montré sa robustesse lors de la simulation, que ce soit par rapport aux variations de la charge ou par rapport à la variation de la tension du bus continu.

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

- Dimensionnement optimal des composants du système hybride par un logiciel approprié spécialisé dans le calcul technique et économique pour une gestion adéquate de l'énergie et une diminution des coûts de revient ;
- Utilisation des algorithmes évolutionnels en vue de l'optimisation du régulateur développé ;
- Elaboration de nouvelles fonctions, modèles et relations comme l'établissement d'une relation entre la vitesse du vent et la production électrique qui est particulièrement difficile à estimer en milieu urbain ;
- Etablir des collaborations solides avec les organismes concernés dans les énergies renouvelables pour donner à ce type de travaux une dimension plus réaliste et pour mieux contribuer à nos objectifs de développement durable ;
- Validation expérimentale des résultats issus de l'optimisation et la gestion, par implantation de la commande floue ainsi que le superviseur sur un système d'énergie hybride réel d'une maison isolée ;
- Intégrer à ce système hybride des techniques de la domotique (régulation de l'éclairage et du chauffage, sécurité, communication....) ainsi que d'autres sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire thermique.

ANNEXES

Logique Floue

A.1. Présentation de la logique floue

Aujourd'hui, la logique floue est de grande actualité. L'opinion courante est qu'il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglages et de prise de décision [17].

La base théorique de la logique floue est la notion d'appartenance, dans tous les ensembles, cette notion a un caractère très important, ce qui diffère entre les ensembles classiques et les ensembles flous, c'est que dans les ensembles classiques la notion est de type tout ou rien, c'est-à-dire qu'un élément appartient ou n'appartient pas, la notion floue est d'un type différent, par un assouplissement de la notion d'appartenance, elle consiste à exprimer les résultats comme probabilité plutôt que comme certitude, l'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité qui permet de traiter des informations imprécises et incertaines, ou bien de classer des informations dont les frontières sont mal définies [34], elle se rapproche ainsi du raisonnement humain qui peut décider et agir de façon pertinente malgré le flou des informations disponibles. La logique floue trouve sa justification dans un certain nombre de constatations :

- La connaissance que l'être humain a propos d'une situation quelconque est généralement imparfaite, souvent incertaine.
- L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives ; ainsi, dans le monde technique ou industriel, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans avoir besoin de modéliser le système.
- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement. Ainsi, la majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler. Cette difficulté découle de la complexité du système dynamique dont il faut assurer la conduite, des non linéarités, des contraintes et des objectifs de commande multiples et souvent contradictoires, des erreurs de modélisation, des bruits de mesure, etc. Il est donc difficile, voire impossible d'élaborer des modèles sous forme d'équations mathématiques, et de ce fait, le calcul d'une loi de commande qui répond aux objectifs désirés devient de plus en plus difficile [35].

Les méthodes de réglages conventionnels se basent sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de fonction de transfert ou d'équation

d'état. Cela nécessite souvent des notions assez avancées de mathématique en plus, pour des procédés non linéaires difficiles à modéliser, l'économie du modèle peut s'avérer importante en temps qu'en coût.

On conçoit donc l'intérêt de faire entrer l'approche floue dans la régulation ou l'asservissement des processus industriels, pour lesquels les informations disponibles sont souvent imprécises, dans des boucles de régulation parfois incomplètes [36]. L'idée de base consistait à exploiter l'expérience des opérateurs humains pour construire une loi de commande. Un jeu de règles floues traduit alors le comportement des opérateurs en termes de stratégie de commande. Depuis, diverses applications ont été développées avec succès pour des processus industriels dans le domaine de la supervision des procédés, du diagnostic et du calcul de commande.

Si la base de connaissance est incomplète, peu fiable, ou carrément inexistante la synthèse des régulateurs flous peut s'avérer délicate et nécessiter des essais de simulation assez longs à cause des tâtonnements indispensables pour dimensionner correctement le contrôleur flou [35].

A.1.1 Historique de la logique floue

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières études du concept d'incertitude par des chercheurs américains. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous-ensembles flous soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation des phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équations différentielles. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société F.L.Smids-Fuller.

Dans les années 80, on note l'apparition d'un nouveau type de contrôleurs flous: les contrôleurs flous de Takagi-Sugeno-Kang (T.S.K) (chercheur japonais) où les conclusions sont fonctionnelles. Les sociétés Japonaises commencent donc à utiliser la logique floue dans des produits industriels machines à laver, appareils photographiques, caméscopes ...) pour résoudre des problèmes de réglage et de commande [80].

A.1.2 Terminologie de la logique floue

a) Variable linguistique

Ce sont des variables dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou phrases exprimés en langage naturel [35], la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues (quelque, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit...). Les expressions de ce genre forment les valeurs linguistiques que peut prendre une variable linguistique de la logique floue. Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance [17].

b) Ensembles flous et fonctions d'appartenances

Un ensemble flou A est défini sur un référentiel U , par une fonction d'appartenance notée μ_A , qui appliquée à une variable linguistique u de U , retourne un degré d'appartenance $\mu_A(u)$ à A . Un ensemble flou, peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées $A = \{(u, \mu_A(u)) / u \in U\}$.

Les ensembles flous ont le grand avantage de constituer une représentation mathématique des termes linguistiques. Pour les fonctions d'appartenance, on peut choisir diverses formes. Cependant, en pratique, pour des raisons de simplicité, les fonctions d'appartenance les plus souvent utilisées sont les fonctions triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes et sigmoïdes [35] représentées sur la figure III.5

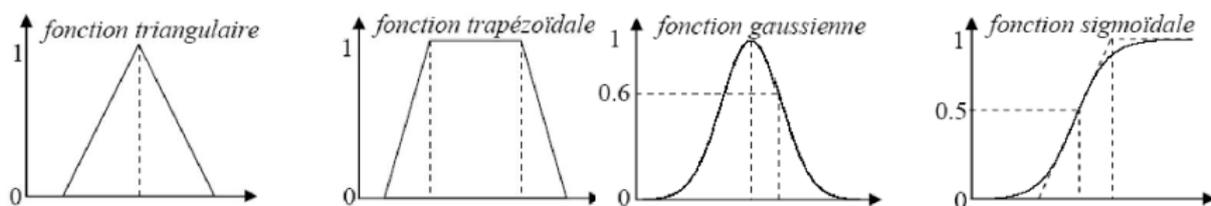


Figure A.1. Fonctions d'appartenance usuelles.

c) Univers de discours et classes d'appartenances

L'univers de discours est le domaine physique U associé à la variable linguistique u , c'est en fait l'ensemble de toutes les valeurs numériques que peut prendre la variable numérique associée à la variable linguistique u . Par exemple U peut être défini comme étant l'intervalle $[0 \dots 150]$ pour la variable linguistique âge [58].

d) Opérateurs de la logique floue

Comme pour les ensembles classiques, on peut définir différentes opérations sur les ensembles flous [80]. Les opérateurs appliqués aux ensembles flous sont définis à partir de leurs fonctions d'appartenance. Soient A et B deux ensembles flous définis dans le référentiel U avec les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B respectivement. Pour toute $u \in U$ On définit les opérations suivantes :

- **Complémentation** : $\overline{\mu_A(u)} = 1 - \mu_A(u)$
- **Intersection** : $\mu_{A \cap B}(u) = \text{Min}(\mu_A(u), \mu_B(u))$
- **Union** : $\mu_{A \cup B}(u) = \text{Max}(\mu_A(u), \mu_B(u))$

A.1.3. Structure de base d'un contrôleur flou

Un système flou peut être interprété selon deux points de vue : mathématique ou logique. D'un point de vue mathématique, un système flou est une fonction non linéaire reliant un vecteur de données d'entrée à un vecteur de sortie et, de point de vue logique, un système flou est un système de prise de décisions, à base de connaissances particulières composé de quatre modules principaux, à savoir : la base de règles, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification. Le régulateur flou n'est qu'un cas particulier de systèmes flou destiné à calculer la commande.

a) Fuzzification

La fuzzification, consiste à attribuer à la valeur numérique de chaque entrée, à l'instant t, sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies. Donc à transformer l'entrée réelle en un ensemble flou [80].

b) Les règles floues

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue est d'exprimer la connaissance humaine sous forme de règles floues décrivant le comportement du système. Ces règles constituent une base de connaissance, elles sont de forme Si...Alors... . Chaque règle à deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...
- Partie conséquence (conclusion), exprimée par Alors...

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquence exprime l'action que doit exécuter l'opérateur pour le contrôle du système [80].

c) Inférences

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par les règles linguistiques qui sont combinées en utilisant les connexions (et) et (ou) [80]. Ces règles vont permettre de passer d'un degré d'appartenance d'une grandeur d'entrée ou régissante au degré d'appartenance d'une grandeur de sortie ou commande [35].

d) Défuzzification

La défuzzification qui est la transformation inverse de la fuzzification, elle permet de passer d'un degré d'appartenance d'une commande à la valeur à donner à cette commande (passer d'une commande floue à une commande numérique), Si l'on choisit des systèmes de type Sugeno d'ordre zéro, cette étape peut être sautée car les conclusions sont directement numériques. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, dont la plus utilisée est celle du centre de gravité.

Méthode du (centroïde) : Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous, elle calcule le centre de gravité de la fonction d'appartenance issue de la variable de sortie :

$$y = \frac{\int y \cdot \mu_y(y) \cdot dy}{\int \mu_y(y) \cdot dy} \quad (\text{A. 1})$$

Le schéma de la régulation floue est le suivant :

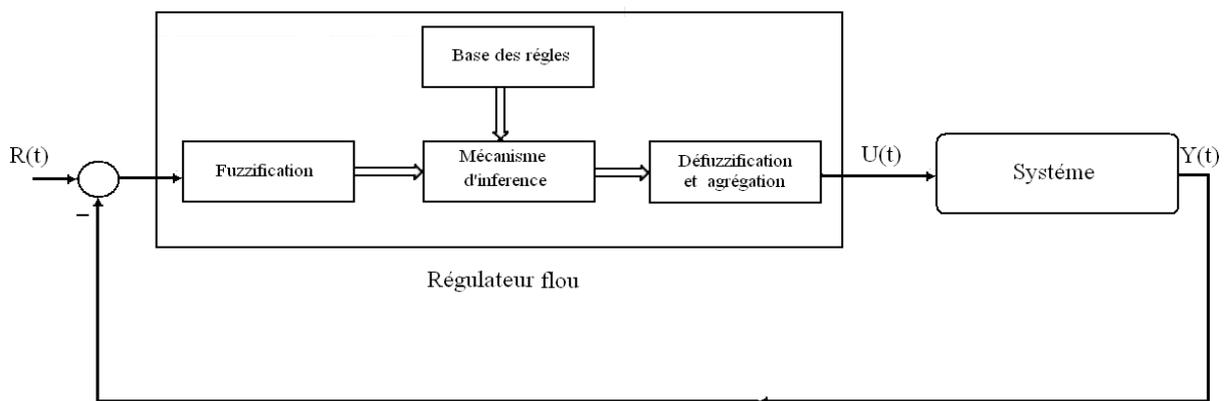


Figure A.2. Schéma de base de la régulation floue.

En fonction de l'expression des conclusions des règles, on distingue deux grandes familles de systèmes flous: systèmes flous à conclusions symboliques (systèmes de Mamdani) et systèmes flous à conclusions fonctionnelles (systèmes flous de Takagi-Sugeno-Kang).

A.1.3.1. Système floue de Mamdani :

Les systèmes de Mamdani utilisent des conclusions symboliques de même nature que les prémisses [35], pour un système MISO à n entrées et une sortie, un modèle de Mamdani est constitué d'une base de règles de la forme suivante [58] :

Règle i : SI (x_1 est A_1^i) et (x_2 est A_2^i) et ... et (x_n est A_n^i) Alors (u est C_1)

Règle n : SI (x_1 est A_1^n) et (x_2 est A_2^n) et ... et (x_n est A_n^n) Alors (u est C_n)

Où : $x_1 \dots x_n$ sont les variables d'entrées, u est la variables de sortie, $A_1^i \dots A_n^i, C_1 \dots C_n$ sont des termes linguistiques.

A.1.3.2. Système floue de Takagi Sugeno kang

Les modèles de cette classe sont appelés modèle de Takagi-sugeno-kang (TSK), les systèmes de (TSK) utilisent des prémisses de règles symbolique, alors que les conclusions sont en général fonctionnelles. Pour un système MISO à n entrées et une sortie, un modèle TSK est constitué d'une base de règles de la forme suivante [58]:

Règle i : SI (x_1 est A_1^i) et (x_2 est A_2^i) et ... et (x_n est A_n^i) Alors $u = f_i(x_1, \dots, x_n)$

Où : $x_1 \dots x_n$ sont les variables d'entrées, u est la variables de sortie, $A_1^i \dots A_n^i$ sont des termes linguistiques, la fonction f_i , relie les entrées à la sortie elle peut être linéaires ou non linéaires.

A.1.3.2.1. Méthode de calcul

On considère une collection de règles de la forme précédente .Soit une entrée ($x_1 \dots x_n$), à l'instant t , pour calculer la sortie y il nous faut :

a) Calcul des sorties individuelles : la sortie de chaque règle i est donnée par sa conséquence c'est-à-dire :

$$u_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$$

Chaque règle à un degré d'activation également appelé poids noté w_i .

b) Agrégation des sorties individuelles : la valeur finale de la sortie résultante de l'ensemble des règles est donnée par la moyenne des sorties individuelles pondérées par le degré d'activation des règles :

$$u = \frac{\sum_i w_i \cdot u_i}{\sum_i w_i} \quad (\text{A. 2})$$

Dans la littérature les fonctions f_i sont souvent des fonctions linéaires, soit :

$$f_i(x_1, \dots, x_n) = b_{i0} + b_{i1} x_1 + b_{i2} x_2 + \dots + b_{in} x_n$$

Où b_{i0}, \dots, b_{in} sont des coefficients constants. Chaque règle peut alors être vue comme un modèle local, linéaire selon les variables d'entrée x_1, \dots, x_n .

Lorsque $b_{i1} = b_{i2} = \dots = b_{in} = 0$, le système est dit « Modèle flou TSK d'ordre zéro » ou système flou à conséquence singleton. Ainsi la valeur numérique de la sortie de ce modèle sera donnée par [7] :

$$u = \frac{\sum_i w_i \cdot b_{i0}}{\sum_i w_i} \quad (\text{A. 3})$$

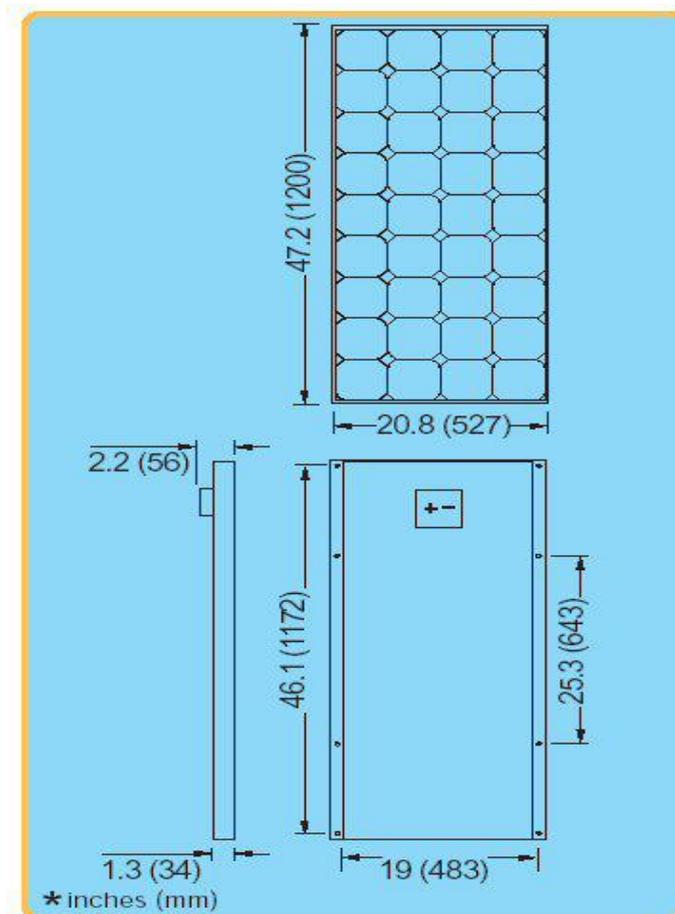
Les systèmes flous de Takagi-Sugeno occupent actuellement une place prépondérante dans la synthèse des contrôleurs, ils fournissent une expression analytique simple de la sortie générée en fonction des entrées considérées [35], ils permettent d'approcher le comportement d'un système complexe par une collection de modèles locaux[58], d'autre part la nature fonctionnelle des conclusions (les règles n'ont pas de signification sémantique claire) et donc ces modèles ne permettent pas d'intégrer l'expérience humaine comme dans le cas des règles de Mamdani [58].

Paramètres des composants du SEH

B.1. Paramètres du Panneau PV (Shell SQ75)

Type	Shell SQ75
I_{sc}	4.8V
V_{oc}	21.7A
I_{mpp}	4.4A
V_{mpp}	18V
P_{mpp}	80W
α	0.005A/°C
β	-0.06V/°C

B.1.2. Spécifications mécaniques du panneau PV



B.2. Paramètres de la MSAP et de la turbine éolienne

Puissance nominale	3.6 Kw
Vitesse nominal	450 rpm
Pairs de pôles	17
Résistance statorique	0.958 Ω
Inductance statorique	5.25 mH
Flux efficace	0.8Wb
Coef de frottement	0.06 $\frac{N.m.s}{rad}$
Inertie du rotor	0.05 $N.m.s$
Rayon de la turbine	3
λ optimale	8

B.3. MSAP du Générateur diesel

Puissance nominale	1.8Kw
Vitesse nominal	2000 rpm
Résistance statorique	1.13
Inductance statorique	2.7
Flux efficace	0.15
Coef de frottement	0.06
Inertie du rotor	0.1

B.4. Valeurs des condensateurs et inductances des différents convertisseurs

Inductance de convertisseur Buck-Boost	5 mH
Condensateur de convertisseur Buck-Boost	6 μ F
Inductance du hacheur réversible en courant	5 mH
Condensateur du bus continu	3000 μ F
Inductance de filtre LC	3 mH
Condensateur de filtre LC	1500 μ F

B.5. Paramètres de la batterie

Capacité nominale	28 Ah
Tension nominale	12V

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABDELLI Abdenour, Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive, Thèse de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2007.
- [2] Adjoudj Mohamed, Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne, *Université Djillali Liabes BP 89 SIDI BEL ABBES, Algérie 22000*
- [3] Aiche-Hamane ,A. Khellaf, Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie, Rev. Energ. Ren.CDER: ICPWE 147-152,2003.
- [4] Aït Cheikh, B. Hadj Aïssa, M. Becherif , Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire, Ecole Nationale Polytechnique ,Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 421 – 443.
- [5] Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir ,A. Zerguerras, Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 387 – 395, Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [6] Ameziane Sadek, Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien, Mémoire de Magister Université de Batna 2009.
- [7] AOUCHE Abdelaziz, REJECTION DES PERTURBATIONS DANS LES SYSTÈMES NON LINÉAIRES : ÉTUDE COMPARATIVE, Mémoire de Magister, UNIVERSITÉ * MOHAMED BOUDIAF * DE M'SILA, 2006.
- [8] Bayram Tounsi, Etude comparative de groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanents et conversion statique, Thèse de Doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2006.
- [9] Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug , H. Benalla, Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienneRevue des Energies Renouvelables, Université Mentouri de Constantine ,2010.
- [10] BELAKEHAL Soltane, Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 2010.
- [11] Belhachat,C. Larbes, L. Barazane S. Kharzi , Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT, Laboratoire des dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque.2007.
- [12] Belhadj Mohammed ,Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2008.

- [13] BELHAMEL Maïouf ,Bulletin des **énergies renouvelables**, Publication du Centre de développement des Energies Renouvelables ISSN 1112-3850 Décembre 2002.
- [14] Bellarbi Samir, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie pour un système éolien de petite puissance, *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 57 – 67.*
- [15] BOITIER, Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques, LAAS-CNRS ; Université de Toulouse, France.
- [16] F. Boudjema, “Commande par mode glissement : Application aux convertisseurs multicellulaires,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1991.
- [17] BUHLER Hansrued, réglage par logique floue, presses polytechniques et universitaires romandes.
- [18] Chennoufi Halim, Lamri, Nemmour Ahmed Lokmane , Khezzar Abdelmalek , Contrôle d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne par la commande directe du couple, *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 115 – 124.*
- [19] CHERFA BOUKHTOUCHE Farida, ETUDE ET REALISATION D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE CONNECTEE AU RESEAU DE DISTRIBUTION ELECTRIQUE BT, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2004.
- [20] COURTECUISSSE Vincent , Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique, Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [21] D .KOUSSA, M.BELHAMEL, ETUDE TECHNICO- ECONOMIQUE D'UN SYSTEME HYBRIDE (EOLIEN – PHOTOVOLTAÏQUE-DIESEL) DE PRODUCTION D'ELECTRICITE SANS INTERRUPTION, Route de l'observatoire BP.62, CDER, Bouzaréah, Alger.
- [22] Daoud A., Midoun A, Commande Floue de la Charge d'une Batterie dans une Installation Photovoltaïque , Laboratoire d'Electronique de Puissance et Energie Solaire Institut d'Electronique, Rev. Energ. Ren.: ICPWE 2003.
- [23] DAVIGNY Arnaud, Thèse de Doctorat, Participation aux services système de fermes d'éoliennes a vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie, Université des sciences et technologies de Lille, 2007.
- [24] DJOUDI Abdelhak , Commandes Non Linéaires d'une Eolienne à Base d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pilotée Par un Convertisseur Matriciel , Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.

- [25] FEKIH, CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE POUR LES REGIONS HUMIDE, SEMI-ARIDE ET ARIDE DE L'ALGERIE. APPLICATION A L'EVAPORATION DES BARRAGES, Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, Faculté de physique, U.S.T.H.B, 2010.
- [26] Gairaa , Benkacali , Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 129 – 136*, Unité de Recherches Appliquées en Energies Renouvelables, 2008.
- [27] GAMA Amor, Etude et Réalisation d'un banc d'essai Hybride Photovoltaïque Thermodynamique, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [28] GERGAUD Olivier, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [29] Guechchati, Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2 223 – 232* Faculté des Sciences, Université Mohammed, 2010.
- [30] GUYOT Yasmine, GIAVITTO Arthur, LE PENNEC Axel, LES BÂTIMENTS À BILAN ÉNERGÉTIQUE POSITIF, PÔLE MANAGEMENT DE L'ENTREPRISE ENVIRONNEMENT, Ecole Nationale Supérieure des Mines, 2009.
- [31] HASHATEL Achour, « Étude Comparative des aéromoteurs pour un choix approprié d'éolienne destinée à la production de l'énergie électrique », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2004.
- [32] HASNI Yamina, « Réseau électrique hybride autonome : Supervision et gestion des sources », International Renewable Energy Congress ,2010 – Sousse, Tunisia.
- [33] Hatti , « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », IEEE Member, Centre de Recherche Nucléaire de Birnie, B.P 180 Ain Oussera 17200, Djelfa Algérie, 2008
- [34] IKHLEF Boualem, « Contribution à l'Etude de la Supervision Industrielle Automatique dans un Environnement SCADA », Mémoire de Magister, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES, 2009.
- [35] ILLOUL Rachid, « Modélisation, simulation et commande par logique floue d'une colonne d'absorption », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'ALGER, 2009.
- [36] KARA-ZAITRI, MESSAOUDI Nouar, « Commande Neuro-Floue d'une suspension active de véhicule », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [37] KHARZI née BOUDJEMA Souhila, « Etude d'un dispositif de protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2005.

- [38] KHIARI, « MPPT control of Photovoltaic pumping system based on discrete Sliding mode », LPV Laboratory /CRTE n B.P. 95 Hammam-Lif 2050 Tunisie, TUNISIA, International Renewable Energy Congress, 2010.
- [39] Kelvin Tan, Syed Islam, « OPTIMUM CONTROL STRATEGIES FOR GRID-CONNECTED WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM WITHOUT MECHANICAL SENSORS », Australian Cooperative Research Centre for Renewable Energy Ltd
- [40] Kesraoui, Bencherouda , Mesbahi , « Power Control of a PMSG based Wind Turbine System Above Rated Wind Speed », International Renewable Energy Congress November 5-7, 2010 – Sousse, Tunisia.
- [41] KHELLAF, « Revue des Énergies Renouvelables : Bilan d'un parcours », Bulletin des Energies Renouvelables CDER - N°4 Decembre 2003
- [42] Koussa, « Système Hybride (Eolien, Solaire) pour l'Alimentation Electrique d'une Charge à usage Domestique », Rev. Energ. Ren.: Zones Arides CDER (2002) 1-8.
- [43] Lahouel Dalila, « Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire de Magister, Université de BATNA, 2009.
- [44] LAVERDURE Nicolas, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat, *INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE*, 2005.
- [45] LECHAT Isabelle, « *EMULATION D'UN GENERATEUR DIESEL* », MEMOIRE DE STAGE, Université de La Réunion, 2008
- [46] Lepage Richard, « Contribution à la commande d'un système hybride JEDSAC (Éolien-Diesel-Air comprimé) ». Projet de recherche, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, 2010.
- [47] M. Koussa , M. Haddadi , A. Malek , « Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque », Revue des Energies Renouvelables CDER, Vol. 10 N°1 75 – 92, 2007.
- [48] M.Belhadj, « Modélisation d'un système de stockage Chargé par un système PV », Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, 03-04, Université de Bechar, Algérie, Novembre 2010.
- [49] Maatallah Taher, « Etude de la préfaisabilité des systèmes d'énergie hybride autonome dans la région de Tunis », Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, Tunisie ,2009.
- [50] MAKHEBI Charaf-eddine, TOUMERT Mhand, « Etude et réalisation d'un régulateur analogique et numérique de la charge/décharge d'une batterie associée à un système photovoltaïque », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.

- [51] Melis David, « Les économies d'énergie dans le secteur des logements sociaux », Mémoire de Fin d'Etudes, Université Libre de Bruxelles Institut de Gestion de L'environnement et Aménagement du Territoire, 2011.
- [52] Merabti Halim, Etude des systèmes flous à intervalle, Mémoire de magistère, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2008.
- [53] MESSAI FEYROUZ, « Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable », Mémoire de Magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2009.
- [54] MIRECKI Adam, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.
- [55] MOHAND OUSAID Abdenbi, ZIADI Zakaria, « Optimisation d'un Générateur Photovoltaïques par Réseaux de Neurones Artificiels », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [56] MORSLI Abdelkader, « Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des supercondensateurs », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.
- [57] MULTON Bernard, GERGAUD Olivier, BEN AHMED Hamid, « ÉTAT DE L'ART DANS LES AÉROGÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES », LÉSiR Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan.
- [58] NAKOULA Yassar, « APPRENTISSAGE DES MODELES LINGUISTIQUES FLOUS, PAR JEU DE REGLES PONDEREES », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE ASVOIE, 1997.
- [59] NECHE Kamel, « Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque », Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [60] Ould Mahmoud Abdel Kadet, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes », Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, 2008
- [61] Ould Mohamed Yahya, Ould Mahmoud, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », Centre de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables 'CRAER', Université de Nouakchott, Mauritanie, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 473 – 483,2008.
- [62] Ould Mohamed Yahya , « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) », *Revue des Energies Renouvelables.CDER Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.*
- [63] REDJEM Radia, « *Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne* », Mémoire de Magister UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.

[64] Rekioua, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4* 623 – 633, Université A. Mira, 2008.

[65] REZKALLAH Miloud, « AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE FOURNIE AU RÉSEAU AUTONOME HYBRIDE ÉOLIEN-DIESEL », OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2010

[66] RUELLE François, « Le standard (maison passive) en Belgique : potentialités et obstacles », Mémoire de fin d'études, Université Libre de Bruxelles Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire, 2008

[67] S.Rafa, H.Zeroug, L.Hocine, K.Boudjit, « Simulation sur Matlab/Simulink et implémentation sur DSP/FPGA de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) alimenté par un onduleur de tension à Modulation vectorielle (SVM) », Faculté d'Electronique et d'Informatique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. BP N°32 El Alia, Alger, Algérie.

[68] SAHEB-KOUSSA, Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien- photovoltaïque- diesel) de production d'électricité sans interruption, *CDER Afrique SCIENCE 05(1) (2009) 23 – 38* ISSN 1813-548X.

[69] Saheb Koussa, « Système éolien pour l'alimentation d'une charge à usage domestique », *Revue des Energies Renouvelables .CDER Vol. 10 N°1 (2006) 127 – 138*.

[70] Saheb – Koussa, M. Belhamel, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) » ,*Revue des Energies Renouvelables CDER ICRESD-07 Tlemcen* ,2007.

[71] Saheb-Koussa, M. Haddad, M. Belhamel, « ETUDE DE FAISABILITE ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE (EOLIEN – PHOTOVOLTAÏQUE – DIESEL) A FOURNITURE D'ENERGIE ELECTRIQUE TOTALEMENT AUTONOME », *Revue des Sciences Fondamentales et Appliquées CDER*, 2010.

[72] Serhoud Hicham , Benattous Djilani , « Sliding mode control of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Array », EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications 2-4 ,Institute of Science Technology, November 2010, Ghardaïa, Algeria.

[73] Tangka J.K., « Conception et réalisation d'un module électronique de contrôle de charge et de gestion optimale de l'énergie pour systèmes énergétiques hybrides éolien-diesel, photovoltaïque-diesel et éolien-photovoltaïque-diesel (MECCGOPSEH) », Université de Dschang, Cameroun, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 591 – 602*.

[74] TOUAFEK Khaled, « Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2005.

[75] TRAN Duc-Hoan, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse », validation expérimentale, Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2010.

[76] Tritschler Philipp , « Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergies pour un système à pile à combustible embarquée dédié à l'application agricole », Thèse de Doctorat, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2010.

[77] VECHIU Lonel, « MODELISATION ET ANALYSE DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVLABLES DANS UN RESEAU AUTONOME », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DU HAVRE, 2005.

[78] Yettou, Larbès, « Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaires », Revue des Energies Renouvelables CDER Vol. 14 N°1 27 – 46,2011.

[79] YOUNSI Sami, « Evaluation de différentes configurations d'une ferme éolienne dans un système hybride connecté au réseau », Institut Supérieur des Etudes Technologique de Sfax.

[80] ZIADI Zakaria, « Commande Hybride d'une Maison à Energie Positive », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.