



Département d'Automatique

Laboratoire de commande des processus

MÉMOIRE DE MAGISTER

En vue d'obtention du diplôme de magister en

Automatique

Option : Commande et conduite des systèmes d'énergie électrique

Présenté par :

ATOUI Adil

Ingénieur d'état en université de M'sila

Thème

MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN SYSTEME HYBRIDE ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE ALIMENTANT UN SITE ISOLÉ

Président :	M^{me}. H. SAHRAOUI	MCA à l'ENP
Directeur de mémoire :	M. E.M. BERKOUK	Professeur à l'ENP
Examineurs :	M. L. NEZLI	MCA à l'ENP
	M. F. BOUCHAFA	MCA à l'USTHB

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes chers *parents*,
- Toutes mes sœurs et leurs *époux*,
- Toute ma *famille*,
- Ma femme et sa *famille*,
- Tous mes chers *amis*,
- Et tous *les collègues* de travail.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué sous la direction de monsieur **EL.M.BERKOUK**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes vifs sentiments de gratitude, pour le soutien ainsi que l'intérêt qu'il a accordé à ce travail.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à madame **H.SAHRAOUI** Maître de conférence à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens également à remercier monsieur **L. NEZLI**, Maître de conférence à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, ainsi que monsieur **F. BOUCHAFA**, Maître de conférence à l'USTHB de BabEzzouar, d'avoir accepté de juger ce mémoire.

Figure I.1 : la répartition des modes de production d'électricité à l'échelle mondiale 7

Figure I.2 : Le pourcentage d'énergie renouvelable dans les pays d'Afrique du Nord 8

Figure I.3 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol 11

Figure I.4 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de Juillet 13

Figure I.5 : La structure générale d'un système hybride

Figure I.6 configuration du générateur diesel

Figure I.7 système de supervision

Figure I.8 ; Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75KW

Figure I.9 Diagramme des priorités des charges

Figure I.10 Classification des perturbations du point de vue qualité de l'énergie

Figure II.1 ; la structure d'un système photovoltaïque

FigureII.2 Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque

Figure II.3 Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque

FigureII.4 les caractéristiques $I=f(v)$ d'une cellule sous éclairage

FigureII.5 la mise en parallèle et en série des cellules photovoltaïque (le module photovoltaïque)

FigureII.6 Un générateur photovoltaïque qui se compose de deux modules photovoltaïques

FigureII.7 .les deux modèles de PV.(a) à une seule diode, (b) à deux diodes

FigureII.8 bloc correspondant à un module PV

Figure II.9 ; les caractéristiques $I=f(V)$ pour $E=1000W/m^2$ et $T^{\circ}=25^{\circ}C$

Figure II.10 ; les caractéristiques $P=f(V)$ pour $E=1000W/m^2$ et $T^{\circ}=25^{\circ}C$

Figure II.11 ; les caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes température

Figure II.12 ; les caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes température

Figure II.13 ; les caractéristiques $I=f(V)$ pour différents ensoleillement

Figure II.14 ; les caractéristiques $P=f(V)$ pour différents ensoleillement

FigureII.15 ; un générateur PV+ une charge R

FigureII.16: détermine les points de fonctionnement de PV pour différentes charges

FigureII.17 : l'adaptation d'impédance un générateur PV

FigureII.18 ; les différents convertisseurs statiques pour adapter la charge

FigureII.19 ; le hacheur série pour adapter une charge continue

FigureII.20 ; l'équivalent d'un hacheur série (loi thévenin)

FigureII.21 ; la marge d'adaptation d'impédance par le hacheur série

FigureII.22 ; le hacheur parallèle pour adapter une charge continue

FigureII.23 ; l'équivalent d'un hacheur parallèle (loi thévenin)

FigureII.24 ; la marge d'adaptation d'impédance par le hacheur parallèle

FigureII.25 ; l'équivalent d'un hacheur série-parallèle (loi thévenin)

FigureII.26 ; la marge d'adaptation d'impédance par le hacheur série-parallèle

FigureII.27 ; un système photovoltaïque avec un régulateur MPPT

FigureII.28 ; méthode de contre réaction de tension

FigureII.29 simulation un système photovoltaïque avec MPPT (hacheur série)

FigureII.30 simulation un système photovoltaïque avec MPPT (hacheur parallèle)

FigureII.31 simulation un système photovoltaïque avec MPPT (hacheur série- parallèle)

FigureIII.1 schéma global et les différentes conversions d'énergie incluent dans le système éolien

Figure III.2 : Aérogénérateur à axe verticale

Figure III.3 : Aérogénérateur à axe horizontal

Figure III.4 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Figure III.5 : Coefficient de puissance

Figure III.6 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs

Figure III.7 : La puissance mécanique pour différentes vitesses de vent

Figure III-8 : Les différentes zones de fonctionnement d'aérogénérateur

Figure III.9 : éolienne avec machine synchrone

Figure III.10 : éolienne avec machine asynchrone reliée directement au réseau

Figure III.11 : éolienne avec machine asynchrone double stator

Figure III.12 : éolienne avec machine asynchrone et convertisseur électrique

Figure III.13 Les différents convertisseurs électriques utilisés avec l'éolienne qui utilise la MADA

Figure III.14 La structure du stator et du rotor de la MADA

Figure III.15 Les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA

Figure III.16 représentation de la MADA dans le repère abc (a) et dq (b)

Figure III.17 Le principe de la commande vécotorielle

Figure III.18 Le principe de détermination des angles de transformation

Figure III.19 Le modèle simplifié de la MADA

Figure III.20 La régulation directe sans boucle interne du courant

Figure III.21 La régulation directe avec boucle interne du courant

Figure III.22 La régulation indirecte sans boucle externe de la puissance

Figure III.23 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

Figure III.24 Schéma globale d'un système de régulation des puissances de la MADA

Figure III.25 Les courbes des puissances statoriques et la tension, le courant rotoriques

Figure III.26 Le modèle simplifié de la MADA qui relie les tensions statoriques à les tensions rotoriques

Figure III.27 Le schéma de la régulation de la tension statorique de la MADA

Figure III.27 Le Schéma globale d'un système de régulation de la tension statorique de la MADA

Figure III.25 Les courbes des tensions, courants statoriques et rotoriques

Figure IV.1 ; la structure à bus AC d'un système hybride (charge isolée)

Figure IV.2 ; la structure à bus DC d'un système hybride (charge isolée)

Figure IV.3 ; la structure à bus mixte d'un système hybride (charge isolée)

Figure IV.4 ; la stratégie de commande d'un système hybride connecté au réseau

Figure IV.5 ; système hybride à bus DC avec une charge résistive (continue)

Figure IV.6 ; Modélisation bus continu

Figure IV.7 ; schéma détaillé pour un système hybride à bus DC et charge résistive

Figure IV.8 ; Algorithme de la commande

Sommaire

INTRODUCTION.....	5
CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART	7
I.1. Situation énergétique dans le monde.....	7
I.1.1. La production d'électricité dans le monde	7
I.1.2. Situation énergétique en Algérie	7
I.1.3. Développement des énergies renouvelables en Algérie	8
I.2. L'énergie éolienne.....	8
I.2.1. Définition.....	8
I.2.2. Avantage.....	9
I.2.3. Inconvénients.....	9
I.2.4. Potentiel éolien en Algérie	10
I.3. L'énergie Photovoltaïque	11
I.3.1. Définition.....	11
I.3.2. Potentiel solaire en Algérie.....	12
I.3.3. Avantages du photovoltaïque	13
I.3.4. Inconvénients du photovoltaïque.....	13
I.4. Le système Hybride.....	14
I.4.1. Etat de l'art	15
I.4.1.1. Principaux composants des SEH.....	18
I.4.1.2. Dimensionnement des SHE.....	23
I.4.1.3. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH.....	25
I.4.1.4. Commande des SEH.....	28
I.5. Conclusions	33
CHAPITRE II: LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	34
II.1. Le générateur photovoltaïque	34
II.1.1. La cellule photovoltaïque	34
II.1.2. L'effet photovoltaïque.....	34
II.1.3. Caractéristiques électriques d'une cellule PV	36
II.1.4. Le module photovoltaïque.....	37
II.1.5. Le générateur photovoltaïque	38

II.1.6.	Modélisation du module photovoltaïque	38
II.1.7.	Simulation du module Photovoltaïque (SM-110).....	42
II.1.7.1.	L'influence de l'ensoleillement et de la température sur le générateur PV ..	44
II.1.8.	Le point de fonctionnement d'un GPV	45
II.2.	La poursuite de point de puissance maximale	47
II.2.1.	L'adaptation d'impédance	47
II.2.2.	L'adaptation d'impédance par l'hacheur.....	48
II.2.2.1.	Hacheur série (dévolteur)	48
II.2.2.2.	Hacheur parallèle (survolteur).....	49
II.2.2.3.	Hacheur stockage inductif série-parallèle (BUCK-BOOST)	51
II.2.3.	Les algorithmes de MPPT (maximum power point tracking)	52
II.2.3.1.	Méthode à contre réaction de tension	53
II.2.3.2.	Méthode à contre réaction du courant	53
II.2.3.3.	Méthode d'algorithme "perturbation et observation".....	53
II.2.3.4.	Méthode d'algorithme "incrémental conductance"	54
II.2.4.	Simulation le MPPT sur un système PV SM-110	54
II.2.4.1.	Avec un hacheur série (Buck)	54
II.2.4.2.	Avec un hacheur parallèle (BOOST).....	59
II.2.4.3.	Avec un hacheur série-parallèle (BUCK-BOOST)	63
II.3.	Conclusion.....	66

CHAPITRE III: LE SYSTEME EOLIEN67

III.1.	Généralité sur les systèmes éoliens et ses conversions électromécaniques.....	67
III.1.1.	Définition de l'énergie éolienne	67
III.1.2.	Les différents types d'éoliennes	68
III.1.2.1.	Aérogénérateurs à axe vertical	68
III.1.2.2.	Aérogénérateurs à axe horizontal	68
III.1.3.	Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	69
III.1.3.1.	Loi de BETZ.....	69
III.1.3.2.	Production d'énergie mécanique	71
III.1.3.3.	Production optimale d'énergie	72
III.1.4.	Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	73
III.1.4.1.	Systèmes utilisant la machine synchrone	73
III.2.	Modélisation et stratégie de commande de la machine à asynchrone double alimentation.....	76

III.2.1.	Structure de la machine asynchrone double alimentation	77
III.2.2.	Fonctionnement en génératrice à vitesse variable	77
III.2.3.	Modélisation de la machine asynchrone double alimentation.....	78
III.2.4.	Commande vectorielle de la MADA	81
III.2.4.1.	Principe de la commande vectorielle.....	81
III.2.4.2.	Détermination des angles de transformation	82
III.2.5.	La régulation indépendante de la puissance active et réactive de la MADA	82
III.2.5.1.	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	82
III.2.5.2.	La structure de la commande.....	85
III.2.5.3.	Méthodologie de synthèse des régulateurs	87
III.2.5.4.	Simulation numérique de la commande de la puissance active et réactive de la MADA	88
III.2.6.	La commande de la tension statorique de la MADA (Mode isolé)	91
III.2.6.1.	Equation liant les tensions rotoriques avec les flux rotorique	91
III.2.6.2.	Equation liant les flux rotoriques avec les tensions statoriques	92
III.2.6.3.	Constatation le modèle	94
III.2.6.4.	Structure de la commande	94
III.2.6.5.	Méthodologie de synthèse des régulateurs PI:.....	94
III.2.6.6.	Simulation numérique	95
III.3.	Conclusion.....	98

CHAPITRE IV: LE SYSTEME HYBRIDE99

IV.1.	Le stockage dans un système hybride :	99
IV.1.1.	Les batteries.....	100
IV.2.1.	Par voie électrostatique.....	100
IV.2.2.	Par voie électromagnétique	101
IV.2.3.	Par voie mécanique.....	102
IV.2.3.1.	Le stockage sous forme d'énergie gravitaire	102
IV.2.3.2.	Le stockage sous forme de pression	102
IV.2.3.3.	Le volant d'inertie	102
IV.3.	Les différentes topologies du système hybride pour une charge isolée:.....	103
IV.3.1.	Architecture à bus AC	103
IV.3.1.1.	Avantage :.....	103
IV.3.1.2.	Inconvénients.....	103
IV.3.2.	Architecture à bus DC	104

IV.3.2.1.	Avantages:	104
IV.3.2.2.	Inconvénients.....	104
IV.3.3.	Architecture mixte : DC-AC	105
IV.3.3.1.	Avantages:	105
IV.3.3.2.	Inconvénients.....	105
IV.3.4.	La stratégie de commande et le MPPT du système hybride :.....	106
IV.3.4.1.	Le MPPT dans le système connecté au réseau :	106
IV.3.4.2.	Système connecté à une charge isolée.....	107
IV.4.	Le système hybride à étudier.....	107
IV.4.1.	La simulation du système avec une application du MPPT	108
IV.4.1.1.	Les sources d'énergie :	108
IV.4.1.2.	Le stockage.....	108
IV.4.1.3.	Les convertisseurs statiques.....	108
IV.4.1.4.	Le bus continu	109
IV.4.1.5.	La charge	109
IV.4.1.6.	L'Algorithme de commande :.....	112
IV.4.1.7.	Simulation de la régulation de la tensions V_{dc} avec V_c , E et P_{eol} variables.....	114
IV.4.1.8.	Simulation du chargement de la batterie	117
IV.5.	La conclusion	1121
CONCLUSION GENERALE.....		122
LES FIGURES		125
LA BIBLIOGRAPHIE.....		129
ANNEXES		131

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.

L'énergie de fission nucléaire souffre généralement d'une mauvaise image médiatique. Certes les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident, même très peu probable, seraient désastreuses. Le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux. De plus, l'accès à cette ressource aux pays en voie de développement nécessite des investissements lourds et un niveau de technicité qu'ils sont souvent loin d'avoir.

Les énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire. Elles ont tout l'immense avantage d'être d'origine naturelle, inépuisable, non polluante et très adaptées à la production décentralisée. Leur exploitation permettrait de fournir de l'électricité aux sites isolés, situés loin des réseaux électriques, et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui nécessitent un lourd investissement.

Le caractère aléatoire des ressources d'énergie renouvelables fait que le système autonome utilisant une seule source d'énergie renouvelable nécessite une large capacité de stockage afin de satisfaire les besoins de la charge en énergie et d'assurer une meilleure fiabilité de la production d'énergie. L'utilisation des systèmes hybrides, combinant plusieurs sources d'énergie, permet d'une part, de réduire les besoins de stockage et d'atténuer les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources et, d'autre part, de constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Les systèmes autonomes, associant un générateur photovoltaïque (PV), un générateur éolien et des batteries de stockage, peuvent constituer une excellente alternative. Grâce à la complémentarité des deux sources d'énergie, il est possible de profiter des avantages de chacune des deux, tout en minimisant leurs inconvénients.

L'objectif de ce mémoire est la modélisation et commande du système hybride (PV+éolien) alimentent un site isolé.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitre ;

Le chapitre 1 résume un état de l'art sur les systèmes à énergie renouvelable et particulièrement les systèmes hybrides

Le chapitre deux ; le système photovoltaïque sans stockage ; dans ce chapitre on montre ;

- Les différents organes entrants dans Le système photovoltaïque.
- Le principe de fonctionnement physique du système photovoltaïque (effet photovoltaïque) et l'influence des paramètres d'environnement (température, ensoleillement) sur leur fonctionnement.
- Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque et son influence sur la puissance délivrée et la définition du point de fonctionnement optimal (MPP) qui donne la puissance maximale.
- Les différentes méthodes pour atteindre le point de puissance maximale (MPPT).
- Les différents convertisseurs statiques utilisés pour le MPPT.
- La Simulation du système et validation des résultats.

Chapitre trois est consacré au système éolien. Les points suivants sont traités ;

- Une généralité sur le système éolien.
- Evaluation des différentes machines électriques utilisées dans le système éolien
- La régulation indépendante de la puissance active et réactive de la MADA pour extraire la puissance maximale dans le cas de système connecté au réseau.
- La régulation de la tension de la MADA pour le cas de la charge isolée.
- La Simulation du système et validation les résultats.

Dans le chapitre quatre, on fait l'hybridation entre les deux systèmes photovoltaïque et éolien avec un stockage électrochimique. Une commande de ce système en mode isolé a été développée.

I.1. Situation énergétique dans le monde

I.1.1. La production d'électricité dans le monde

La production d'électricité d'origine renouvelable a atteint 3525,5 TWh en 2006, soit 18,6% de la production totale. Cette part reste supérieure à la production d'électricité d'origine nucléaire (15% en 2006) mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles 66,2%. Les 0,2% restant sont apportés par la combustion des déchets qualifiés de non renouvelables. La figure I.1 montre la répartition des modes de production d'électricité à l'échelle mondiale [1].

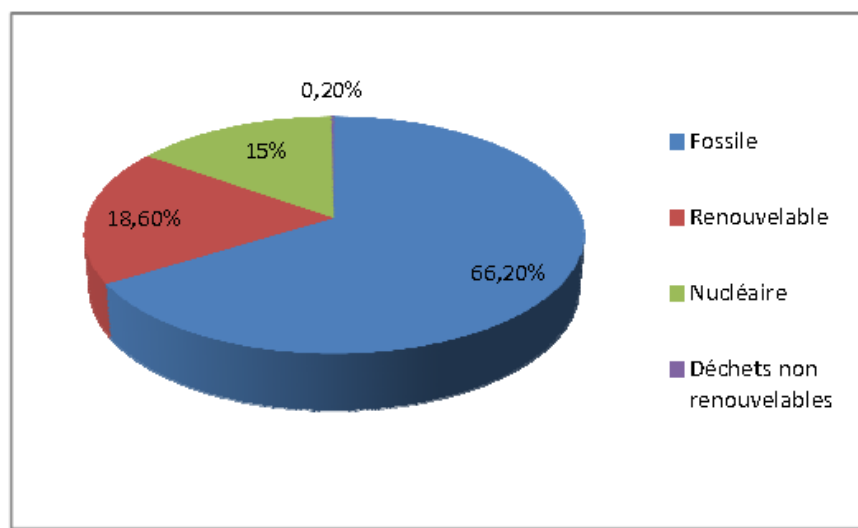


Figure I.1 : la répartition des modes de production d'électricité à l'échelle mondiale [1]

I.1.2. Situation énergétique en Algérie

La production d'électricité dans les pays d'Afrique du Nord est principalement basée sur les combustibles fossiles (92,9% en 2006). Les 7,1% restants proviennent des énergies renouvelables (hydraulique, éolien et solaire).

Dans la figure I.2, l'histogramme montre la part des énergies renouvelables et des combustibles fossiles dans la production d'électricité pour chaque pays d'Afrique du Nord [1].

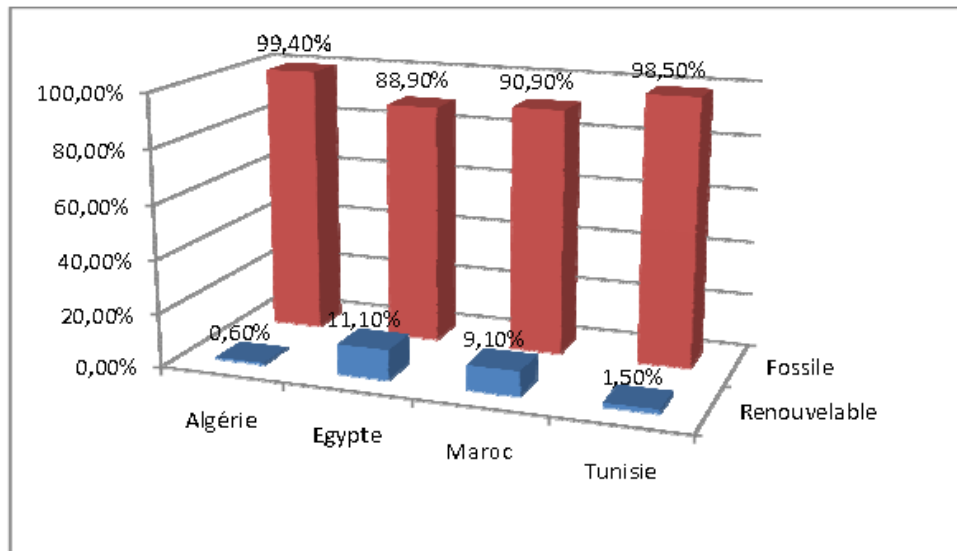


Figure I.2 : Le pourcentage d'énergie renouvelable dans les pays d'Afrique du Nord [1]

I.1.3. Développement des énergies renouvelables en Algérie

Dans le cadre de la mise en œuvre de la politique énergétique nationale et de développement des énergies renouvelables, l'Algérie, par le biais de ses différentes institutions (Sonelgaz, Sonatrach, CDER (avec ses différentes unités), HCDS (Haut commissariat au développement de la stoppe) a initié et réalisé des programmes de développement de ces énergies. En effet, plusieurs projets de production d'électricité solaire et éolienne ont été réalisés qui traduisent la volonté de l'Algérie de s'inscrire dans une démarche de développement durable, de protection et de respect de l'environnement.

Ces projets sont inscrits dans le cadre d'un important programme de développement des énergies renouvelables qui prévoit de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan de production électrique nationale à 5% à l'horizon 2015 [1].

I.2. L'énergie éolienne

I.2.1. Définition :

Toutes les énergies renouvelables présentes dans la nature sont issues soit du rayonnement solaire, du noyau terrestre ou des interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans. En effet, et quant à la ressource éolienne, le réchauffement, par les rayons solaires, de certaines zones de la planète et le

refroidissement d'autres, créent une différence de pression et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Cette énergie cinétique peut être directement convertie en énergie mécanique utilisable dans les moulins à vent, pour actionner des pompes, ou pour la propulsion des navires à voiles, mais, de nos jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi des Aérogénérateurs.

I.2.2. **Avantage :**

Le vent est inépuisable, il constitue donc une véritable ressource renouvelable particulièrement pour la production de l'électricité. De plus, l'énergie éolienne :

- C'est une énergie abondante, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).
- C'est une énergie qui respecte l'environnement. Elle ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif et elle n'est pas une énergie à risque.
- Son exploitation n'est pas un procédé continu.
- C'est une énergie locale qui peut donc stimuler l'économie locale notamment dans les zones rurales.
- C'est une source très intéressante pour les pays en voie de développement, étant donné qu'elle répond au besoin urgent d'énergie et l'installation d'un parc éolien est relativement simple, et le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Ce type d'énergie peut être facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

I.2.3. **Inconvénients :**

- La qualité de la puissance électrique : la source de l'énergie éolienne est stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas donc constante et sa qualité n'est pas toujours très bonne. Et compte tenu de la constante augmentation de la pénétration éolienne dans les réseaux de puissance, les contraintes des gestionnaires du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Dans ce même contexte, les unités de production décentralisées telles que les éoliennes ne participent pas aux services systèmes (réglage de la tension, de la fréquence, possibilité de fonctionner en îlotage), elles se comportent donc comme des générateurs passifs de point de vue électrique.
- Le vent est intermittent, et des périodes de grand froid se traduisant par une demande accrue d'énergie s'accompagnent fréquemment de vent faible, voire nul. Ce qui nécessite l'association au système éolien d'autres sources d'énergie renouvelable moins aléatoire ou des sources conventionnelles, on parle donc de «système Hybride», ou encore des systèmes de stockage.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en termes de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.
- Son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.
- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- Les interférences électromagnétiques avec les équipements électriques et électroniques de la nacelle de l'éolienne.

I.2.4. Potentiel éolien en Algérie

Dû à la nature topographique et au climat très diversifiés du pays, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Les régions les plus ventées se

situent au Sud-ouest dans la région d'Adrar, Timimoun et Tindouf. Le Nord est caractérisé par une vitesse moyenne peu élevée avec l'existence de microclimats sur les sites côtiers et sur les Hauts plateaux. Le microclimat de Tiaret présente les vitesses de vent les plus élevées.

En effet, L'Algérie dispose d'un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production de l'énergie électrique, surtout dans le Sud du pays où les vitesses du vent sont plus élevées que celles du Nord.

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure I.3. Elle montre que la région d'Adrar est la région la plus ventée du pays avec des vitesses moyennes qui dépassent la valeur de 6 m/s. [2]

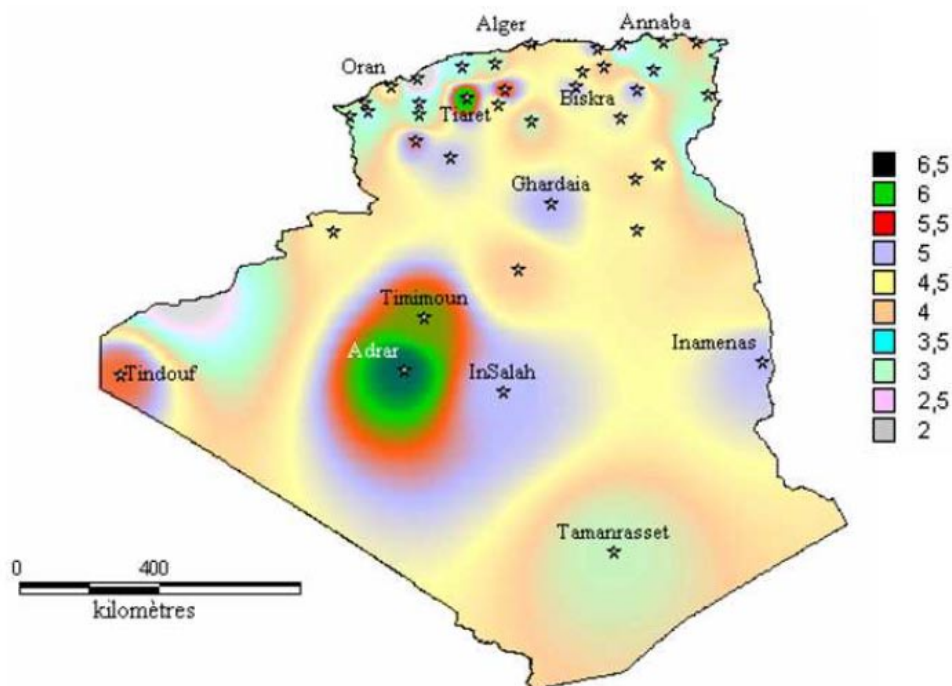


Figure I.3 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [2]

I.3. L'énergie Photovoltaïque :

I.3.1. Définition

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au milieu du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique — de photons.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical.
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc l'énergie par unité de surface au sol, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

Globalement, la terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt, dont elle absorbe 122 et réfléchit le reste. L'énergie totale absorbée sur une année est donc 3 850 zettajoules (10^{21} joules, ZJ) ; par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ, le vent contient 2,2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0,5ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité. [3]

Les zones désertiques, où la nébulosité est faible et qui sont situées sous des latitudes proches de l'équateur, sont les plus favorables à l'énergie solaire. Celles qui sont relativement proches de zones de consommation importantes dans les pays développés disposant de la technique sophistiquée requise pour capter l'énergie solaire voient des réalisations de plus en plus importantes, comme le désert des Mojaves (Californie) où se trouve une centrale solaire d'une puissance totale de 354 MW. [3]

I.3.2. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen et dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde avec 169440 TWh/an (évaluation effectuée par satellites par l'Agence Spatiale Allemande DLR), soit cinq mille fois la consommation nationale en électricité.[2]

La durée d'insolation sur le quasi totalité du territoire national dépasse les 2500 heures par an et peut atteindre les 3900 heures (Hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2650 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans la figure I.4, selon l'ensoleillement reçu annuellement.

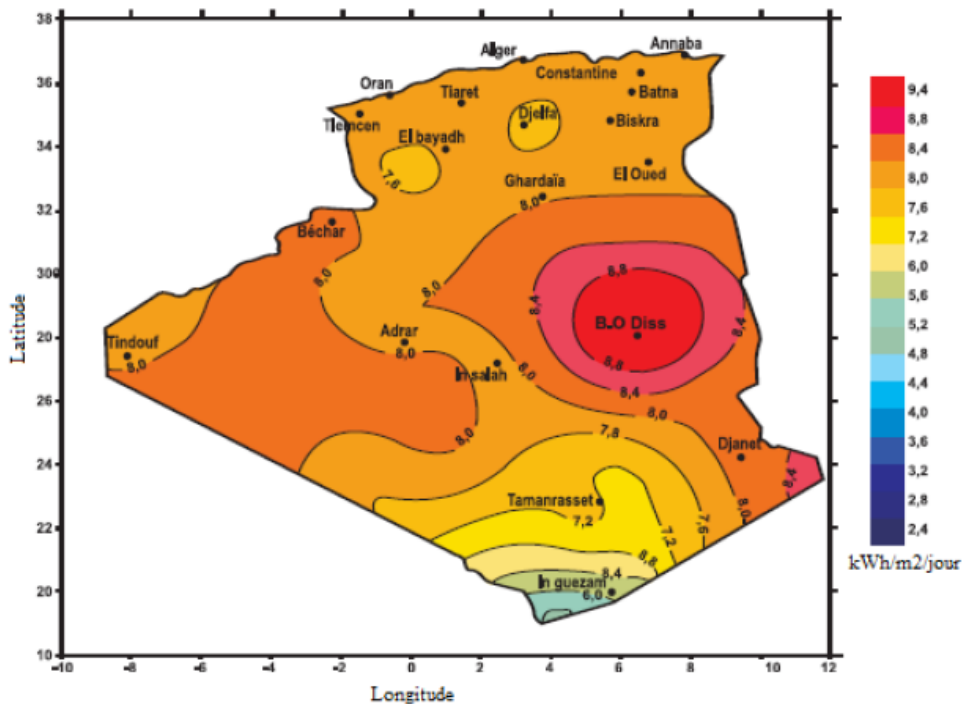


Figure I.4 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de Juillet [4]

I.3.3. Avantages du photovoltaïque

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie **inépuisable**.
- L'énergie photovoltaïque est une **énergie propre et non-polluante** qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère **pas de déchets**.

I.3.4. Inconvénients du photovoltaïque

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison familiale, par exemple.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

I.4. Le système Hybride

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie 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 [5].

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenues par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système. [5]

Du point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance,

compte tenu des conditions particulières des régions isolées. Les sites isolés sont souvent caractérisés par une infrastructure (communication, services, etc.) pauvre, un accès difficile et un manque de personnel qualifié.

Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc, et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kWh, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien ...etc.

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

I.4.1. Etat de l'art

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (AC), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs statiques, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un system de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la figure I.5. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution. Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels [5].

A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand

il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

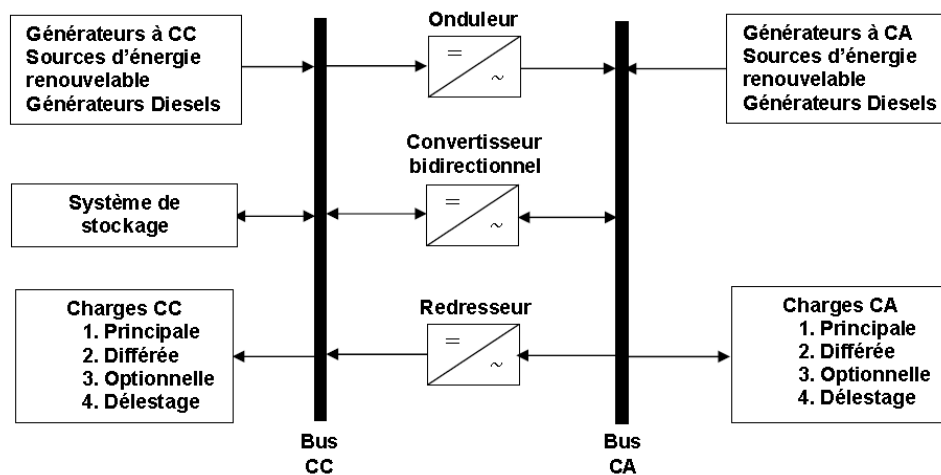


Figure I.5 : La structure générale d'un système hybride [5]

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. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise des petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient, en principe, des générateurs diesels. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en-dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à CC [5].

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100 kW, sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés. Si ces systèmes contiennent des sous-systèmes de stockage, ce qui est rare, c'est pour lisser les variations de l'énergie de nature renouvelable.

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 I-1). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs [5].

PUISSANCE DU SEH [KW]	APPLICATION
Faible: < 5	Systèmes autonomes: stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées
Moyenne: 10 - 250	Micro réseaux isolés: alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande: > 500	Grands réseaux isolés (ex: réseaux insulaires)

Tableau I.1 classification des SEH par gamme de puissance

Les grands SEH en site isolé peuvent être classifiés en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable. Les expressions qui permettent de calculer l'indice de pénétration sont : [5]

$$I_{ins} = \frac{P_{rw} [KW]}{P_{ch} [KW]}$$
$$I_{moy} = \frac{W_{rw} [KWh]}{W_{ch} [KWh]}$$

I_{ins} est la pénétration instantanée. Elle représente la proportion de la puissance produite par les sources d'énergie renouvelable en instantané. P_{rw} représente la puissance renouvelable et P_{ch} la puissance électrique de la charge (la charge principale, s'il y a plusieurs types de charges).

I_{moy} est la pénétration moyenne (mesurée pendant des jours, des mois ou même des années). W_{rw} représente l'énergie renouvelable et W_{ch} représente l'énergie consommée par la charge principale. Une classification des grands systèmes éolien-diesel sur trois niveaux a été proposée en cette classification sépare les systèmes en fonction du taux de pénétration de l'énergie éolienne et donne leurs caractéristiques de fonctionnement (Tableau I-2). [5]

NIVEAU DE PENETRATION	CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	PENETRATION	
		PIC INSTANTANE	MOYENNE ANNUELLE
FAIBLE	<ul style="list-style-type: none"> • GD fonctionne sans arrêt • La production renouvelable réduit la charge du diesel • Toute l'énergie renouvelable alimente la charge principale Il n'y a pas de système de supervision	< 50 %	< 20 %
MOYEN	<ul style="list-style-type: none"> • GD fonctionne sans arrêt • Commande relativement simple Pour des niveaux élevés d'énergie renouvelable, des charges secondaires sont réparties pour assurer une charge suffisante pour le diesel ou la production renouvelable est réduite	50 %- 100 %	20 % - 50 %
ELEVE	<ul style="list-style-type: none"> • GD peut être arrêté en fonction de la production d'énergie renouvelable • Systèmes auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence Commande complexe.	100 % - 400 %	50 % - 150 %

Tableau I.2 classification des systèmes éolien-diesel basée sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne [5]

I.4.1.1. Principaux composants des SEH

Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques (PV) et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans les SEH. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, marémotrice, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustible). Les convertisseurs, les charges, les charges de délestage et une forme de gestion de l'énergie peuvent également faire partie d'un SEH. Les batteries sont habituellement utilisées pour le stockage d'énergie, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel (volant d'inertie) et le stockage d'hydrogène. Une description des composants habituels des SEH est donnée ci-après [5].

- **Eoliennes**

L'éolienne, fiable et rentable, représente la source d'électricité idéale pour de nombreuses applications. Les éoliennes existent en plusieurs dimensions, des micro-systèmes montés sur un mât aux turbines de 5 mégawatts alimentant le réseau électrique [5].

Les grands systèmes électriques de CA isolés peuvent utiliser les éoliennes du type connecté aux grands réseaux interconnectés. La technologie largement dominante aujourd'hui est à axe horizontal, à turbine tripale, parfois bipale et à rotor face au vent. Ces éoliennes ont des puissances comprises entre 10 kW et 5 MW et

peuvent fonctionner à vitesse fixe ou à vitesse variable. Les deux types de machines électriques les plus utilisées pour ces éoliennes sont les machines asynchrones et les machines synchrones sous leurs diverses variantes. [2] [5]

- **Générateurs photovoltaïques**

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie. La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm² et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. [5]

Pour constituer des générateurs fournissant un courant et une tension continus suffisants pour être utilisés, les cellules sont regroupées en panneaux (modules). Par exemple, un panneau produisant 12 volts peut regrouper entre 30 et 40 cellules selon le fabricant. L'association de ces panneaux en série et/ou parallèle constitue le générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée. Cependant, la constitution de ce générateur est, en soi, relativement délicate, car un mauvais choix de couplage peut entraîner une perte non négligeable de rendement. [5]

- **Autres sources d'énergie renouvelable**

Les centrales hydrauliques sont aujourd'hui les premières sources d'énergie renouvelable. La production mondiale de petites centrales hydrauliques, très attractives pour une production hybride, est estimée à $85 \cdot 10^9$ kWh. Les variations de débit des cours d'eau sur les rivières peuvent aussi être exploitées par les centrales au fil de l'eau.

Toutes les mers subissent deux flux et deux reflux quotidiens. Ces mouvements (énergie potentielle) peuvent être exploités par les usines marémotrices équipées de turbines spéciales tournant dans les deux sens. Les courants marins peuvent également être exploités par les hydroliennes (comme les éoliennes utilisent l'énergie cinétique de l'air), pour une production d'énergie locale. Les courants marins, contrairement aux vents, sont constants et prévisibles. [5]

La pile à combustible, une technologie émergente de la génération distribuée, est un appareil électrochimique qui fonctionne selon le procédé inverse de l'électrolyse. Elle restitue de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène de l'air, en produisant de l'électricité, au lieu de dissocier l'oxygène et l'hydrogène de l'eau en consommant de l'électricité. [5]

La liste des sources d'énergie renouvelable pouvant exploiter les ressources locales peut être complétée par les centrales à biomasse, une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse et les centrales géothermiques qui captent la chaleur de la croûte terrestre pour produire de l'électricité[5].

- **Générateur diesel**

Dans le cas d'un système d'énergie renouvelable, la production d'énergie électrique est réalisée en fonction des ressources (vent, soleil...) et non de la demande. Dans le cas des installations autonomes, il est donc nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels.

Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (Figure I-6). 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 du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré [5].

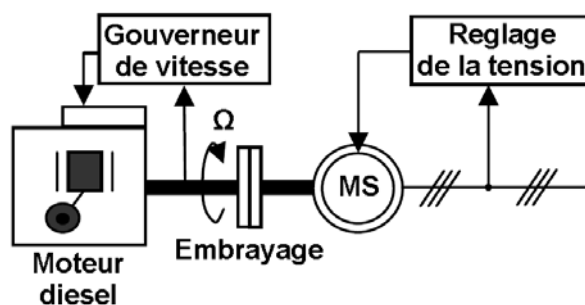


Figure I.6 configuration du générateur diesel

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Dans les

processus industriels et domestiques utilisant l'énergie électrique, seule l'énergie active est transformée au sein de l'outil de production, en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc... L'autre, l'énergie réactive sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, autotransformateurs, etc...). En fait, elle n'est pas consommée, mais les courants associés à la puissance réactive augmentent les pertes dans le système. La puissance réactive dans un système de CA avec GD est produite par le générateur synchrone. Cela est fait conjointement avec le réglage de tension, en ajustant le courant d'excitation du générateur synchrone. Par conséquent, dans un système d'énergie à CA avec plusieurs GD, on doit avoir au moins un GD connecté au réseau, pour fixer la fréquence du réseau et fournir la puissance réactive. Il est possible de modifier le système pour que le GD ne soit pas toujours sollicité, mais dans ce cas d'autres composants doivent être ajoutés.

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels. Ce système de commande peut prendre une variété de formes, le plus répandu étant le système de commande numérique. Une approche est d'utiliser un seul générateur pour fixer la fréquence (générateur maître) du réseau et laisser les autres tourner à vitesse fixe (générateurs esclaves), donc fonctionner à un débit de carburant constant. Dans les systèmes traditionnels, le débit de carburant est fixé manuellement par un opérateur. Avec les commandes modernes, le débit peut être ajusté pour optimiser l'usage du carburant.

- **Systèmes de stockage**

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme.

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Dans le cas de stockage par pompage de l'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.

Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante. L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur.[23]

L'hydrogène alimente les piles à combustible. Il possède un grand pouvoir énergétique gravimétrique (120 MJ/kg) en comparaison au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant, il est aussi le gaz le plus léger. Ceci pose un véritable problème de stockage. La densité énergétique volumétrique de l'hydrogène n'est intéressante qu'à l'état liquide ou comprimé (700 bars). Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène : comprimé, liquéfié, hydrures métalliques, charbon actif, nanofibres et nanotubes en carbone etc. Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin d'être satisfaisants [5].

- **Système de supervision**

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Les réseaux multi – diesel peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs diesels et régler le flux de puissance.

Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de commandes intégrées sont le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, le régulateur de tension sur le générateur synchrone du diesel ou la commande de l'éolienne. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants (Figure I-7). Ce système de surveillance est d'habitude automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

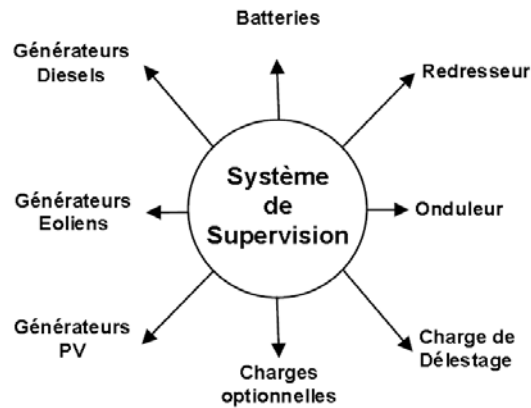


Figure I.7 système de supervision

- **Convertisseurs**

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.[31]

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à 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 générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil. [31]

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

1.4.1.2. Dimensionnement des SEH [32]

La conception des SEH exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace. De plus, pour obtenir un taux de pénétration important des sources d'énergie

renouvelable, sans la dégradation de la qualité de l'énergie fournie, une étude de dimensionnement du système hybride s'impose.

Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les SEH. Les principaux facteurs du dimensionnement sont :

- Les conditions environnementales du site (vitesse du vent, éclairage énergétique, température, humidité) ;
- Le profil de charge ;
- Les préférences et les demandes du client ;
- Les ressources financières ;
- La disponibilité de la technologie et le support technique.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SEH :

HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL... Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes. Une brève description de chaque outil est donnée ci-après :

HOMER – c'est un outil développé par "National Renewable Energy Laboratory" (NREL), capable de dimensionner et d'optimiser un système hybride contenant différents composants : éolienne, PV, micro – hydrocentrale, diesel, réseau, pile à combustible et batteries. HOMER exécute des simulations pour toutes les configurations possibles du système dans le but de vérifier si elles sont réalisables. HOMER estime ensuite le coût d'installation et de fonctionnement du système et propose une liste des configurations, classées par rapport au coût de leurs cycles de vie.

SOMES – c'est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes d'énergies renouvelables. SOMES est développé par la Utrecht University, au Pays Bas. Les composants disponibles sont : PV, éolienne, générateur diesel, réseau électrique, batteries de stockage et plusieurs types de convertisseurs. La simulation est réalisée sur une base de temps horaire. Le système optimal est trouvé en comparant les coûts de plusieurs systèmes, dans les limites définies par l'utilisateur.

RAPSIM – ce logiciel a été développé par la Murdoch University Energy Research Institute d'Australie. Il est conçu pour simuler des systèmes d'énergies

alternatives tels que des générateurs PV, des éoliennes et des générateurs diesels. Un dimensionnement optimal est réalisé par tâtonnement. Les utilisateurs changent les paramètres du système (nombre de batteries, d'éoliennes, puissance des générateurs diesels) et jugent le résultat pour choisir la meilleure solution répondant à leurs besoins.

SOLSIM – est développé au Fachhochschule Konstanz, en Allemagne. C'est un outil de simulation qui permet aux utilisateurs de concevoir, analyser et optimiser des systèmes connectés ou pas à un réseau et des SEH. Les sources d'énergie disponibles sont : des panneaux PV, des éoliennes, des installations de biogaz ou de biomasse, des batteries et des générateurs diesels. SOLSIM est un progiciel qui comporte des outils différents : un programme de simulation général appelé SOLSIM, une unité d'optimisation de l'angle d'inclinaison des panneaux PV appelée SolOpti, une unité de calcul des coûts du cycle de vie appelée SolCal et l'unité simulant des générateurs éoliens appelée SolWind.

INSEL – est développé par la University of Oldenburg d'Allemagne. Il réalise la simulation des systèmes d'énergie renouvelable. C'est un logiciel de simulation basé sur des diagrammes blocs où chaque bloc représente un composant d'une puissance prédéterminée. Les utilisateurs doivent sélectionner des blocs à partir d'une bibliothèque et les interconnecter pour définir les systèmes d'énergie à étudier.

I.4.1.3. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Les systèmes d'énergie en site isolé rencontrent en général les mêmes problèmes que les réseaux faibles. Ces difficultés, qui ne se présentent pas dans les grands réseaux interconnectés, sont en général causées par : [5]

- Les variations de l'énergie d'origine renouvelable (indépendamment de la charge).
- Le manque de connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie en réseau faible.

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels en parallèle,

de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt). Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels. Ces derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse (Figure I-8), mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30 % de la consommation à pleine charge). Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable [5].

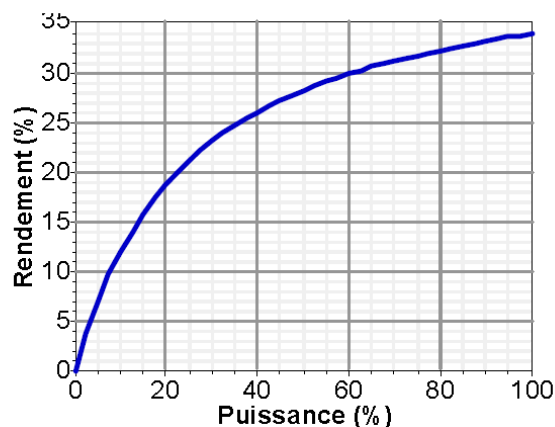


Figure I.8 ; Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75 KW

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage du générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que le temps nécessaire pour la phase de démarrage. [5]

Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée.

En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence. D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride. Seule une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale les différents composants et donc de rendre le système rentable.

La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut aussi causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH. Par exemple, le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée. Dans ce cas, la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur. Ces changements rapides dans la production d'énergie peuvent générer des problèmes de qualité d'énergie (variation de tension et de fréquence) et même l'arrêt complet du système.

Les générateurs asynchrones, largement utilisés dans les éoliennes, ont besoin d'une quantité importante de puissance réactive, surtout pendant la phase d'excitation (démarrage). S'il n'y a pas assez de sources de puissance réactive dans les SEH et une ou plusieurs éoliennes démarrent, l'augmentation soudaine de la consommation de puissance réactive provoque des creux de tension et le système décroche. D'autres sources de perturbations pouvant générer des creux de tension sont les courts circuits. Ceux-ci peuvent provoquer l'effondrement des SEH, mais aussi une phase de ré-excitation des générateurs asynchrones connectés au système. Une autre perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs.

Un inconvénient majeur dans un SEH connecté à un réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme : en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes. Des valeurs minimales sont suivies par des pics.
- Les ressources d'énergie renouvelable : les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau : les défauts, tels que les court circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

I.4.1.4. Commande des SEH

Le problème principal dans la commande de SEH est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables.

Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SEH :

1. **La stratégie de fonctionnement**, qui implique des décisions liées au flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système,
2. **La qualité de l'énergie**, à l'échelle des secondes ou millisecondes. Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, etc.

I.4.1.4.1. Stratégie de fonctionnement

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible. [5]

Le fonctionnement d'un SEH dépend des paramètres suivants :

- **Le profil de charge** : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics et les creux, etc.
- **Les caractéristiques des ressources renouvelables** : les valeurs moyennes, l'écart type, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières, etc.,.
- **Les caractéristiques des générateurs classiques** : le type de carburant, les limites de fonctionnement, etc.
- **La configuration du système** : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie renouvelable, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance, etc.)
- **Les normes de qualité de l'énergie** : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces dans des applications particulières, en fonction des objectifs du système et les caractéristiques présentées ci-dessus. Une brève description de quelques stratégies de fonctionnement est donnée ci-après :

Gestion du stockage

Deux types de stockage sont utilisés dans les SEH : le stockage à court terme et le stockage à long terme.

La stratégie de stockage à court terme, « Peak Shaving Strategy », permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et/ou de la charge. Cette stratégie réduit également le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels, donc la consommation de carburant.

Le stockage à long terme, « Cycle Charge Strategy » est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue. Cette stratégie, permet d'améliorer l'équilibre énergétique et de réduire les cycles démarrage/arrêt des GD et donc, la consommation de carburant. Avec cette stratégie, le GD est arrêté jusqu'à ce que l'état de charge du système de stockage atteigne un niveau minimal. Une fois ce seuil atteint, le GD redémarre et reste en fonctionnement jusqu'à ce que l'état de charge du

système de stockage atteint un niveau maximal et le cycle se répète encore une fois et ainsi de suite.

Gestion des charges

La stratégie de gestion des charges peut aussi être à court terme et à long terme.

Les deux types de stratégie utilisent les charges pour faire varier la demande d'énergie. Ainsi, les charges sont connectées et déconnectées par ordre de priorité (Figure I-9). Les pompes à eau et les unités de désalinisation sont des exemples de charges différées de faible priorité en fonctionnement normal. Les charges optionnelles sont toutes des charges ayant une utilité et pouvant être utilisées durant l'excédent d'énergie qui autrement serait dissipé.

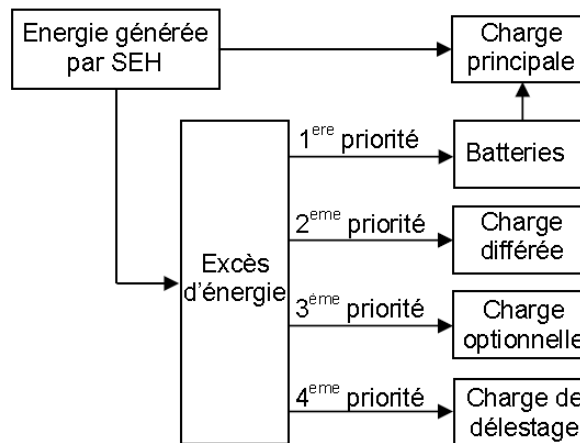


Figure I.9 Diagramme des priorités des charges

La stratégie de contrôle à court terme connecte et déconnecte les charges du système en fonction du dépassement de certains seuils fixes pour la fréquence du bus à CA. Les charges sont connectées de manière progressive, selon les variations de la fréquence. La charge de délestage (dump load) est une charge spéciale dont la puissance peut être modifiée en fonction de la déviation de fréquence. Elle peut aider à régler la fréquence du réseau dans des conditions de surplus d'énergie. La gestion à long terme assure l'équilibre énergétique sur des intervalles de temps importants. Les charges différées et optionnelles ont en général une priorité réduite pendant une partie de la journée. Elles doivent être connectées seulement quand leur régime de priorité est élevé. Dans le cas du pompage de l'eau, quand le niveau de l'eau dans le bassin est bas, la pompe acquiert une priorité élevée et elle doit démarrer. La stratégie de gestion des charges peut aussi être utilisée pour réduire les pertes énergétiques du GD.

Réserve tournante

La réserve tournante est définie en tant que l'exigence du système de commande définie par la capacité des générateurs classiques de couvrir les changements immédiats causés par l'arrêt des générateurs d'énergie renouvelable et par l'augmentation soudaine de la charge. En effet, la réserve tournante détermine la capacité instantanée de réserve minimale du GD en fonction des prévisions de la production d'énergie renouvelable et de l'évolution de la charge. Une réserve d'énergie doit être toujours disponible pour éviter l'effondrement du système lors d'une réduction soudaine de la production d'énergie renouvelable.

Temps de fonctionnement minimal

Cette stratégie consiste à maintenir le GD en fonctionnement pour une durée minimale prédéfinie en fonction de la variation de la charge ou de la variation de l'énergie renouvelable. Celle-ci est utilisée pour réduire le nombre de démarrages/arrêts quand la puissance nette (la différence entre la puissance consommée par la charge et la puissance renouvelable) varie beaucoup. La minimisation du nombre de démarrages/arrêts du GD peut permettre d'éviter l'usure des moteurs diesels et leurs démarreurs et en même temps réduire la consommation de carburant.

Hystérésis

Cette stratégie est souvent utilisée pour commander la déconnexion du générateur diesel. Le GD est arrêté seulement si la puissance renouvelable est supérieure à la demande de la charge. Ce surplus minimal d'énergie (ou hystérésis) peut être mesuré à partir de la variation de fréquence du réseau quand cette fréquence est fixée par le GD utilisant un régulateur type proportionnel (P) et à partir de son niveau de charge quand il utilise un régulateur type proportionnel-intégral (PI).

1.4.1.4.2. Qualité de l'énergie électrique produite par les SEH

Le terme « qualité de l'énergie électrique » fait référence à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence, dans le réseau électrique, de différents phénomènes électriques (comme, par exemple, le flicker ou des distorsions harmoniques). La figure I-10 montre une classification de ces perturbations en fonction de leurs caractéristiques.

Bien qu'il n'y ait pas de normes internationales spécifiques pour les systèmes de génération en site isolé, les caractéristiques du réseau isolé doivent être semblables aux caractéristiques des grands réseaux interconnectés. Les consommateurs qui sont connectés aux réseaux isolés, tout comme ceux connectés aux grands réseaux interconnectés, utilisent les mêmes appareils. Par conséquent, les exigences de qualité de l'énergie sont généralement les mêmes.

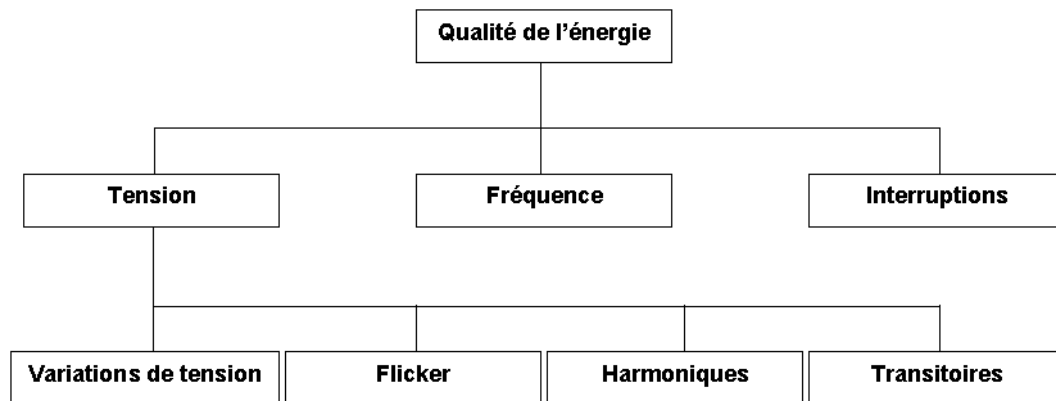


Figure I.10 Classification des perturbations du point de vue qualité de l'énergie

La plupart des mesures et définitions utilisées dans les normes sont basées sur l'analyse de la fréquence et de la tension. La norme européenne EN50160 inclut des recommandations pour les valeurs de la tension des réseaux isolés, c'est-à-dire des réseaux non reliés à un grand réseau interconnecté.

Plusieurs études ont été réalisées sur la qualité de l'énergie électrique des systèmes isolés comportant des sources d'énergie renouvelable. Larsson présente des mesures expérimentales de la qualité de l'énergie électrique pour les systèmes éolien-diesel. La problématique des systèmes hybrides éolien-diesel est analysée aussi par Sharma en Mulijadi dans réalise une analyse de la configuration éolien-diesel et des différents types de charges du point de vue de la qualité de l'énergie électrique. Dans Dindner présente plusieurs stratégies de contrôle de la tension dans les réseaux faibles avec des systèmes éoliens.

I.5. Conclusion

Une brève description des SEH a été réalisée dans ce chapitre. Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les SEH ont été données. Notre travail portant sur un SEH composé d'une éolienne, des panneaux photovoltaïques et batteries de stockage, une attention particulière a été consacrée à ce type de sources et de stockage. Les différents types d'architectures existants, ainsi que les problèmes et les stratégies de commande habituelles des SEH ont également été présentés.

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

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu afin de fournir des tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif (Figure II.1) [6][10] .

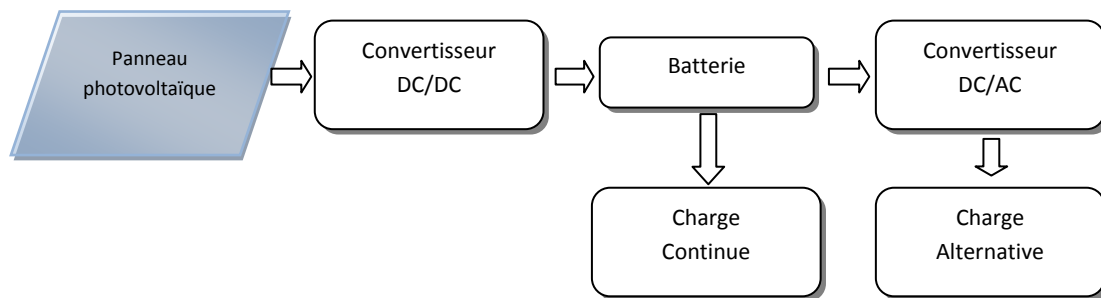


Figure II.1 ; la structure d'un système photovoltaïque

Le but de ce chapitre est l'étude des différents composants d'un système photovoltaïque sans batterie pour nous permettre la modélisation mathématique de ces composants, afin de pouvoir simuler le système photovoltaïque dans son ensemble et l'étude des différentes méthodes de régulation MPPT (maximum power point tracking), pour soutirer l'énergie maximale de photovoltaïque.

II.1. Le générateur photovoltaïque [7]

II.1.1. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé «effet photovoltaïque », découvert par le physicien A. Becquerel en 1839. [7] [10]

II.1.2. L'effet photovoltaïque

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants: [7]

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;

- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique; ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule PV doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des Semi-conducteurs pour l'industrie du PV. [7]

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction p-n. Et aussi, d'autres structures, comme les hétérojonctions et les schottky qui peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules PV est illustré sur la figure II.2 [7]

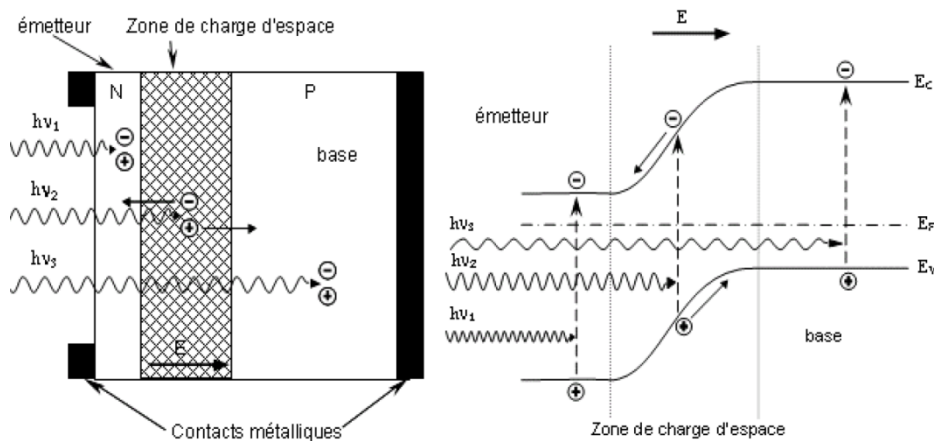


Figure II.2 Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque [7].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région:

Dans la zone n ou p; les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion;

Dans la zone de charge d'espace; les paires électron/trou créés par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n; les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

II.1.3. Caractéristiques électriques d'une cellule PV [8]

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit:[8], [9]

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (II.1)$$

Avec I_{ph} : le courant photogénéré et I_{obsc} : le courant d'obscurité.

Pour une cellule PV idéale, l'équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - (I_s e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (II.2)$$

Avec : I_s : courant de saturation de la diode; q : charge élémentaire; K : constante de Boltzmann, T : température.

Ainsi, dans une cellule PV, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure II.3. [7]

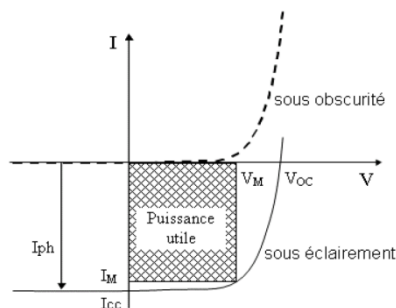


Figure II.3 Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque[7]

Les caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV sous éclairement se représente dans la figure II.4

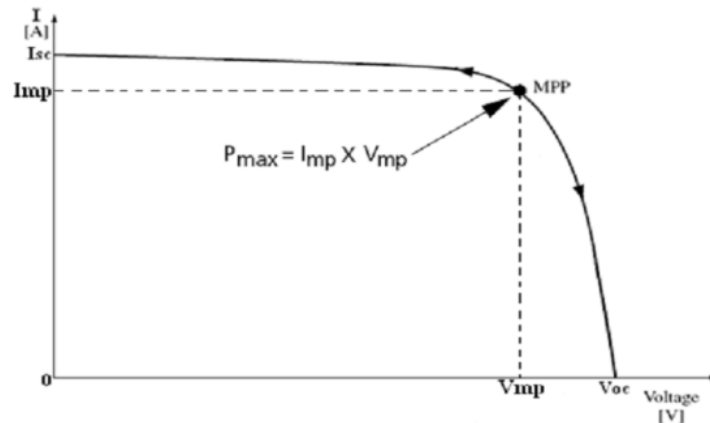


Figure II.4 les caractéristiques $I=f(v)$ d'une cellule sous éclairage

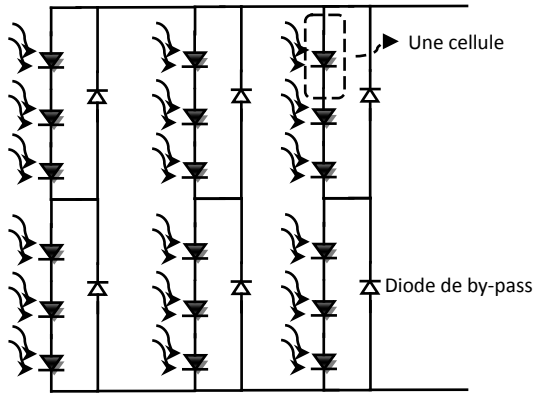
Au point MPP (maximum power point), la cellule donne la puissance maximale

$$P_{max} = I_{mp} * V_{mp} \quad (II.3)$$

I_{mp} et V_{mp} sont respectivement le courant et la tension au point de puissance maximale

II.1.4. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (figure II.5). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, qui donne une bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [6], [8]



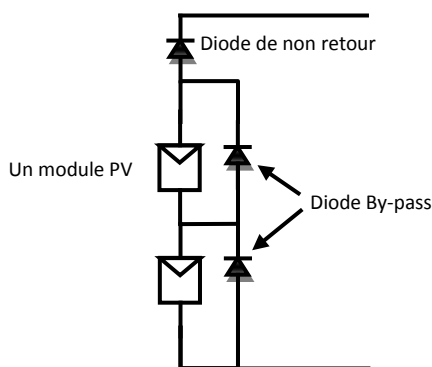
FigureII.5 la mise en parallèle et en série des cellules photovoltaïque (le module photovoltaïque).[12]

On prend quelques cellules voisines et on les shunte par une diode en parallèle appelée "By-pass diode". Ces diodes empêchent le courant de passer à travers les cellules qui sont occultées et elles se deviennent un récepteur (charge résistive) au lieu d'un générateur (les tensions de ces cellules tombent au-dessous de la tension de seuil de la diode *By-pass* alors le courant passe à travers cette diode). [12]

II.1.5. Le générateur photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques sont réalisés par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires). La puissance totale d'un générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier[12]

On place une diode de blocage en série avec chaque sortie du module pour éviter le retour de courant au module (figureII.6).



FigureII.6 Un générateur photovoltaïque qui se compose de deux modules photovoltaïques

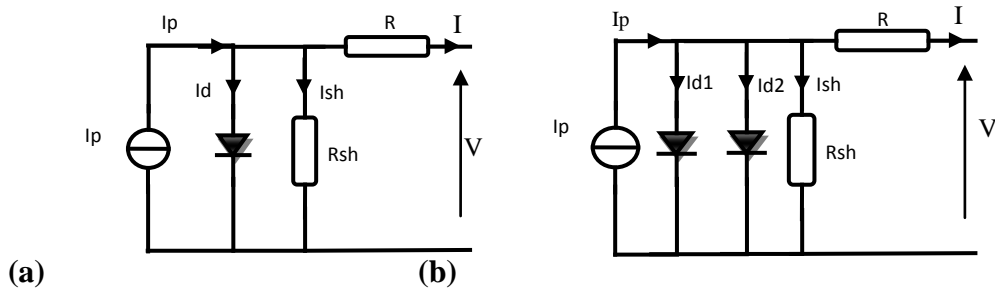
II.1.6. Modélisation du module photovoltaïque [4]

Pour trouver le modèle d'un module photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement, qui est très

fortement non linéaire et résulteront des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. [8] [9]

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles des générateurs photovoltaïque qui différent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant du générateur photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV (figureII.7)



FigureII.7 .les deux modèles de PV.(a) à une seule diode, (b) à deux diodes

Nous allons utiliser le modèle électrique à une diode (Kaiser et Reise). C'est le modèle le plus cité dans la littérature. Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Figure1.6(a)) composé d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique et une résistance shunt R_{sh} . [8] [9]

R_{sh} est une conséquence de l'état long de la périphérie d'une surface cellulaire, une résistance série R_s représente les diverses résistances de contact et de connexions, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN (courant de diffusion).

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (II.4)$$

Avec :

I : Le courant délivré par le module.

I_p : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

Le courant I_p est directement dépendant des rayonnements solaire E_s et de la température de la cellule T_j , est donné par la relation suivante: [8]

$$I_p = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (II.5)$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \frac{N_{oct} - 20}{800} \quad (II.6)$$

Où :

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left[e^{\frac{e_0(V+R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_j \cdot n_s}} - 1 \right] \quad (II.7)$$

Avec I_{sat} est le courant de saturation, qui est fortement dépendant de la température. Il est donné par :

$$I_{sat} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{K \cdot T_j}} \quad (II.8)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

Le courant du module I est donné par :

$$I(E_s, T_j, V) = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T_j) - I_{sh}(V) \quad (II.10)$$

$$I = P_1 \cdot E_s \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref}) \right] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{K \cdot T_j}} \left[e^{\frac{e_0(V+R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_j \cdot n_s}} - 1 \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

Avec:

Les constantes sont:

E_{ref} : Irradiation de référence 1000 W/m².

T_{ref} : Température de référence 25°C.

e_0 : La charge d'électron 1,6.10⁻¹⁹C.

K : Constant de Boltzmann 1,38.10⁻²³ J/K.

E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

n_s : nombre du cellule en série.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

Les paramètres à déterminer sont :

P_i : Paramètres.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

Les paramètres P_i , R_s , R_{sh} ne sont pas donnés par le constructeur alors il faut les déterminer.

On peut déterminer ces paramètres par une méthode basée sur des techniques d'optimisation. Son principe est simple : [9]

* Dans une première étape on définit une fonction objective, appelée un critère. Ce critère I dépend d'un ensemble de paramètres groupés en vecteur P.

* Un algorithme adapté est employé pour trouver la valeur de P qui se réduit au minimum I (P).

II.1.7. Simulation du module Photovoltaïque (SM-110)

On a simulé le module photovoltaïque SM-110 [Annexe A] par le modèle d'une seule diode (à partir des équations précédentes) avec le logiciel MATLAB 6.1 dans les conditions de test CEN (éclairage 1000W/m^2 et température $t=25^\circ\text{C}$) et dans d'autres conditions

Nous allons mettre le schéma électrique équivalent du Module PV en un schéma bloc (Figure II.8) comportant quatre variables:

Les trois variables d'entrées sont :

E_s ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m^2);

T_j : température de jonction des cellules ($^\circ\text{C}$).

V : tension aux bornes du GPV (V).

Le variable de sortie c'est:

I : le courant fourni par le GPV (A) ;

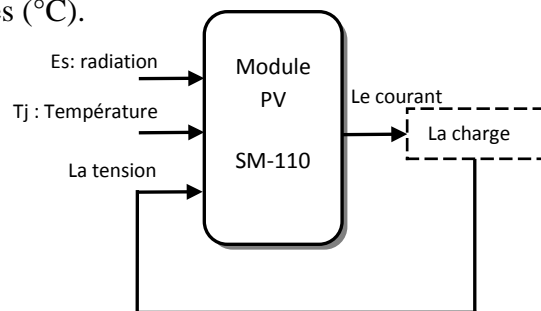


Figure II.8 bloc correspondant à un module PV

Les paramètres P_i , R_s et R_{sh} sont déterminés par la méthode d'optimisation, pour le panneau SM-110. On a le tableau II.1: [9]

P1	0.0036
P2	0.0001
P3	-0.0005
P4	70.874
R_s	0.614
R_{sh}	151.16

Tableau II.1

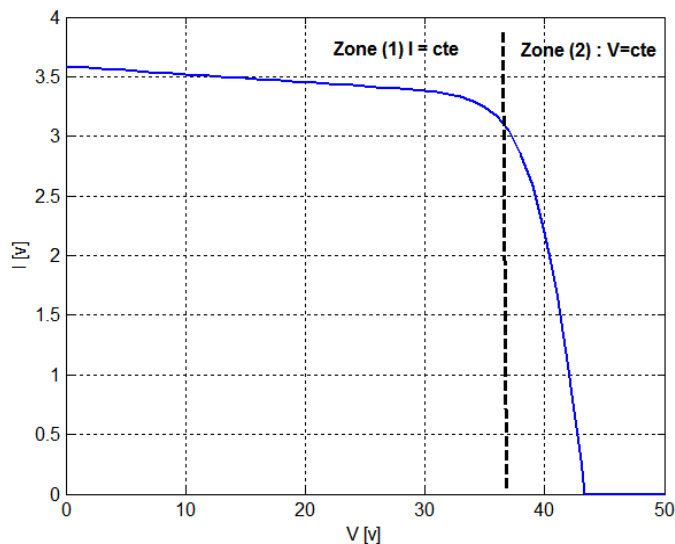
Et le n_s (nombre des cellules série) =72, est donné par le constructeur [Annexe1]

On trace le graphe $I=f(V)$ dans les conditions de références $E=1000 \text{ w/m}^2$ et $t=25^\circ\text{C}$ (figureII.9)

On remarque que le générateur photovoltaïque se comporte comme un générateur de courant ($I \approx \text{cte}$) dans la zone(1), et comme un générateur de tension ($V \approx \text{cte}$) dans la zone (2) (figureII.9)

La figure II.10 représente les caractéristiques $P=f(V)$ et le point MPP ; (maximun power point) le point de la puissance maximale.

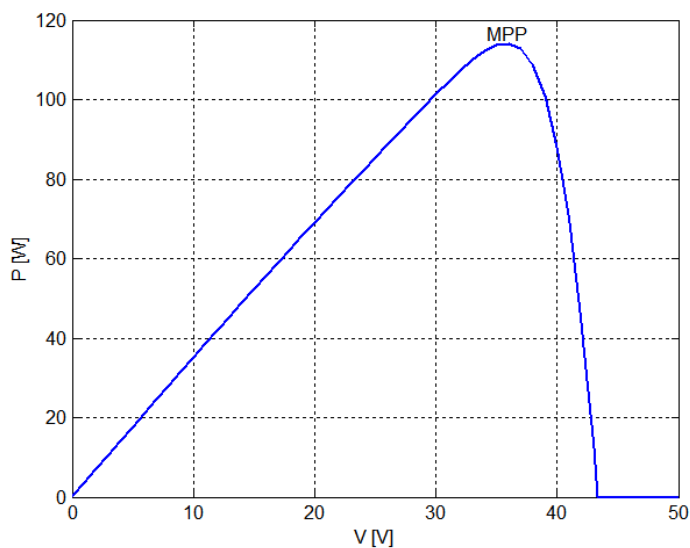
Figure II.9 ; les caractéristiques $I=f(V)$ pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T^\circ=25^\circ\text{C}$



Le courant de court-circuit

$$I_{cc}(V=0)=3.6 \text{ A}$$

Figure II.10 ; les caractéristiques $P=f(V)$ pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T^\circ=25^\circ\text{C}$



La tension de circuit ouvert

$$V_{co}(I=0)=45\text{V}$$

II.1.7.1. L'influence de l'ensoleillement et de la température sur le générateur PV

Figure II.11 ; les caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes température

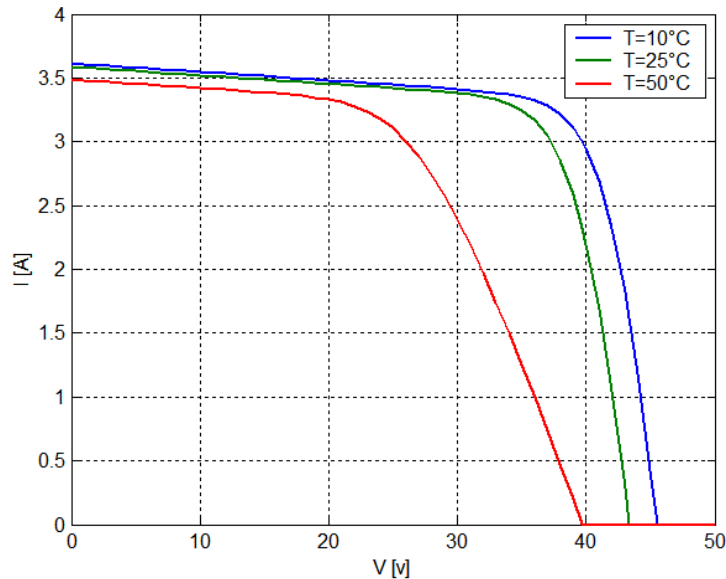
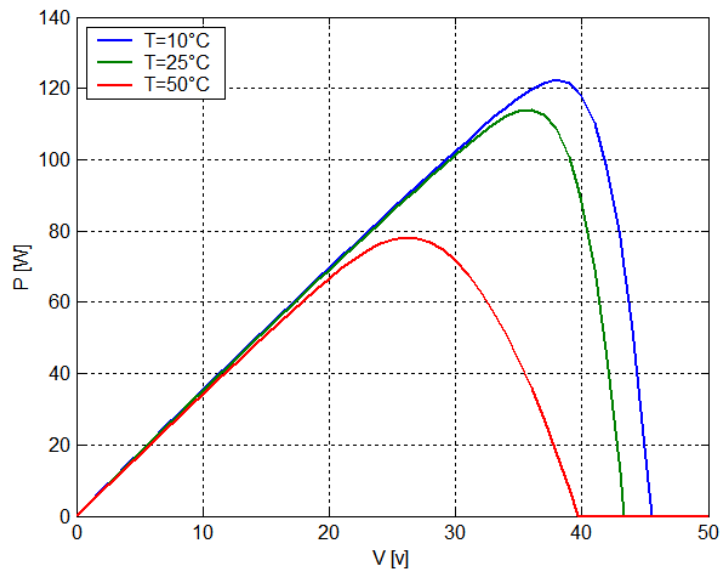


Figure II.12 ; les caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes température



La température a une influence inversée sur la V_{co} et une légère influence sur l' I_{cc} . (figure II.11 et figure II.12).

Figure II.13 ; les caractéristiques $I=f(V)$ pour différents ensoleillement

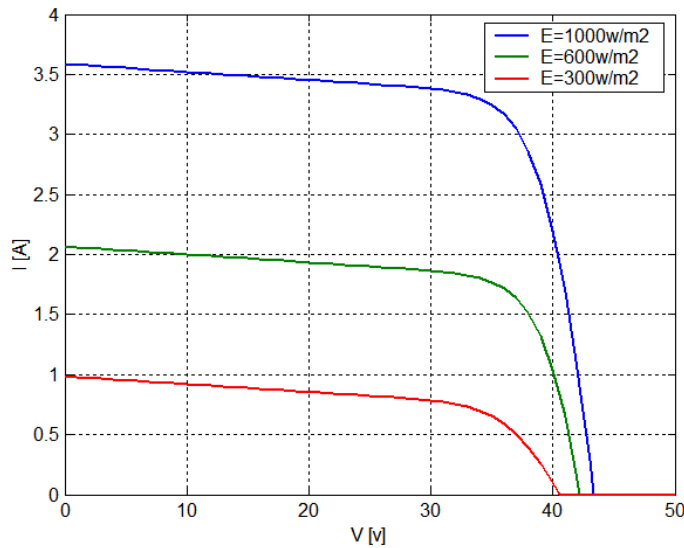
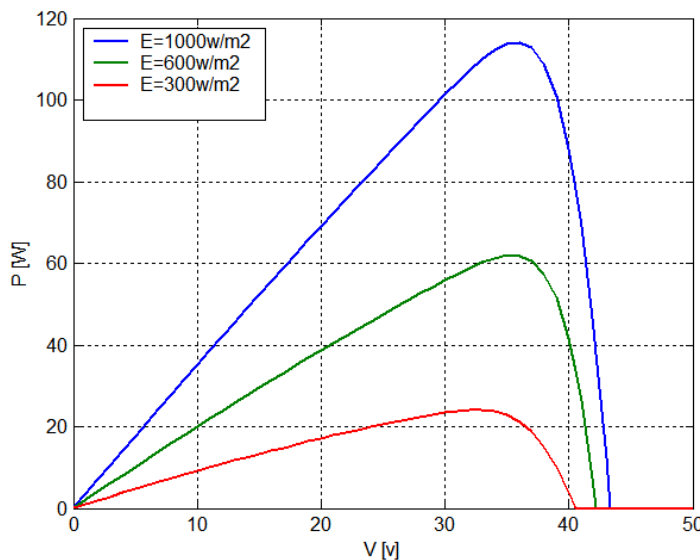


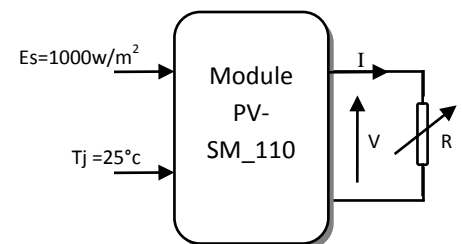
Figure II.14 ; les caractéristiques $P=f(V)$ pour différents ensoleillement



On remarque que l'ensoleillement a une influence proportionnelle sur l' I_{cc} et une légère influence sur la V_{co} . (figureII.13). Donc l'ensoleillement influe proportionnellement sur la puissance ($P=I*V$) (figureII.14).

II.1.8. Le point de fonctionnement d'un GPV [1]

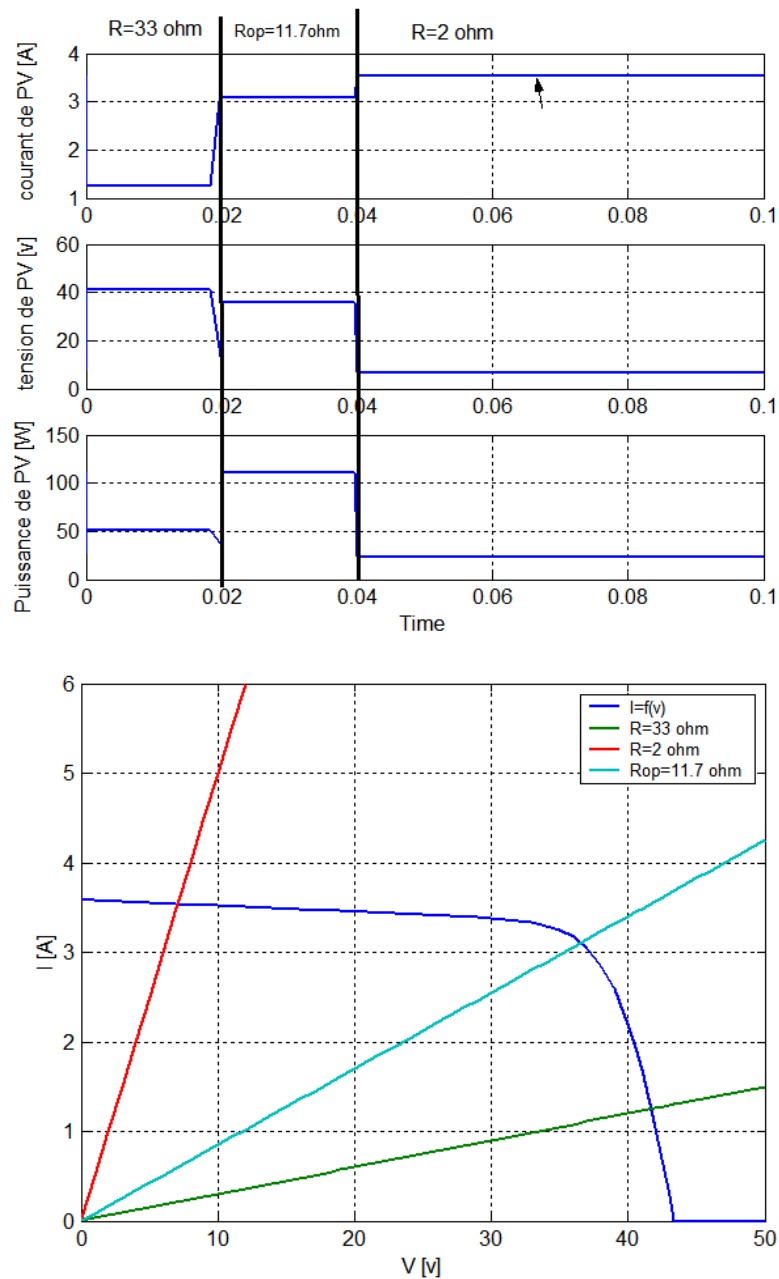
On fait le montage (figureII.15) et on varie R ($R=33\text{ohm}$, $R=2\text{ohm}$, $R=11.7\text{ohm}$)



FigureII.15 ; un générateur PV+ une charge R

On remarque que la charge qui détermine le point de fonctionnement de PV (l'énergie fournie), c'est le point d'intersection entre les deux courbes $I = f(V)$ et la droite $I = \frac{1}{R}V$ (figureII.16)

La charge qui donne $P_{\max} = 110$ watt de PV ($R=11.7\text{ohm}$) c'est la charge optimale. (figureII.16)



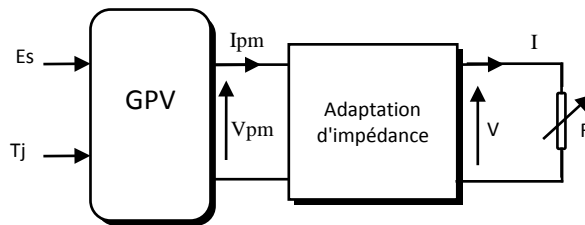
FigureII.16: détermine les points de fonctionnement de PV pour différentes charges

II.2. La poursuite de point de puissance maximale [6]

II.2.1. L'adaptation d'impédance

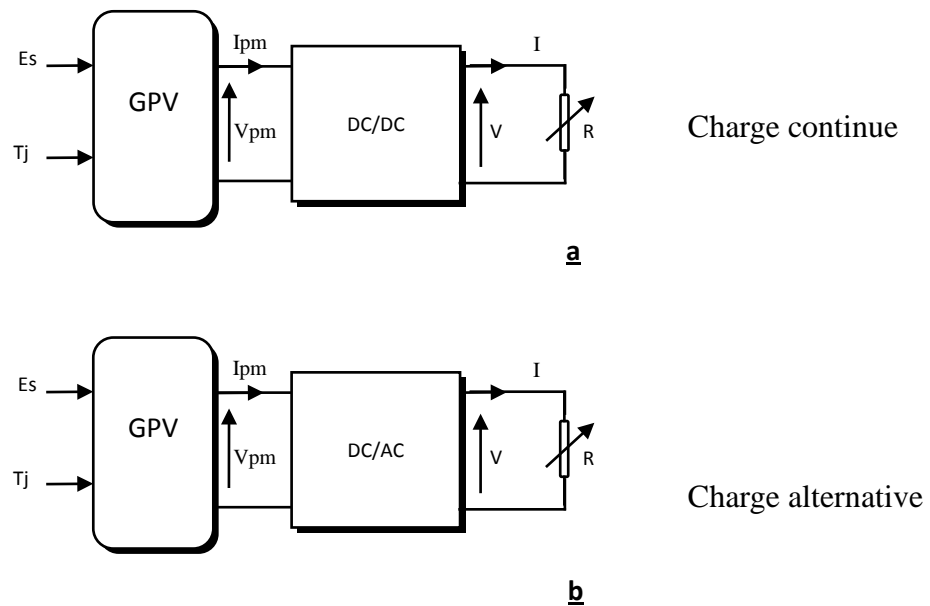
Nous avons vu précédemment que c'est la charge qui détermine le point de fonctionnement du GPV et la charge optimale qui se donne MPP (maximum power point) cette charge varie aussi selon les conditions d'ensoleillement et de température du GPV.

Alors pour résoudre le problème de la variation du point de fonctionnement de GPV qui dépend de la charge et forcer le GPV pour fonctionner au MPP il faut un adaptateur d'impédance entre de GPV et la charge (figureII.17).



FigureII.17 : l'adaptation d'impédance un générateur PV

Le GPV est un générateur (de tension et du courant) continue alors il peut adapter la charge continue (moteur continu, batterie, réseau continu...etc.) par un hacheur (*DC/DC converter*) (figure II.18.a) et la charge alternative (moteur alternatif, réseau alternatif...etc.) par un onduleur (*DC/AC converter*) (figure II.18.b).



FigureII.18 ; les différents convertisseurs statiques pour adapter la charge

II.2.2. L'adaptation d'impédance par l'hacheur

Dans cette étude, on utilise l'hacheur comme adaptateur d'impédance car la charge est une charge continue.

Nous allons présenter le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), qui sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités, en considérant le hacheur est idéal (il n'y a pas de perte d'énergie dans les composants du hacheur) et qu'il fonctionne en régime continu. [6]

II.2.2.1. Hacheur série (dévolteur)

On utilise un hacheur série dévolteur (BUCK) si on est à la recherche d'une tension avec charge inférieure à celle du GPV. Ce dernier fonctionne comme un générateur de tension ($V \approx cte$) (figure II.19). [13]

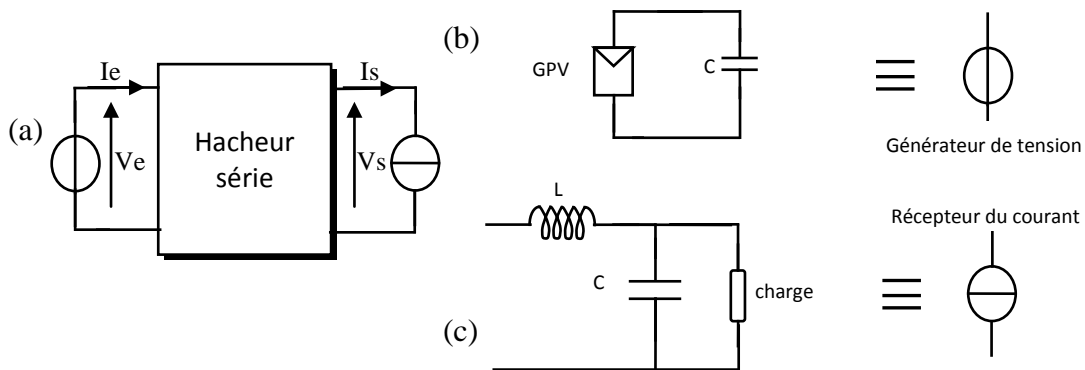


Figure II.19 ; le hacheur série pour adapter une charge continue

Dans le fonctionnement continu de l'hacheur et pour une ondulation de courant et de tension donnée, on choisit les valeurs des capacités et de la bobine de l'hacheur :

[6] [13]

$$L_s = \frac{U_e(1-\alpha)}{8 f^2 \cdot \Delta I_s}$$

$$C_s = \frac{U_e \alpha}{f \cdot L_s \cdot \Delta U_s}$$

$$C_{pv} = \frac{I_s \alpha (1-\alpha)}{f \cdot V_e \cdot \Delta I_e}$$

Avec ΔX c'est l'ondulation de la valeur X.

$$\frac{V_s}{V_e} = \alpha \quad (1)$$

$$\frac{I_e}{I_s} = \alpha \quad (2)$$

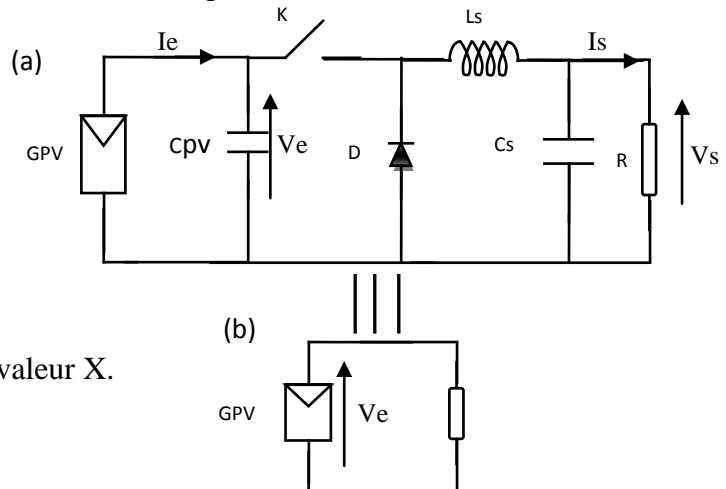


Figure II.20 ; l'équivalent d'un hacheur série (loi thévenin)

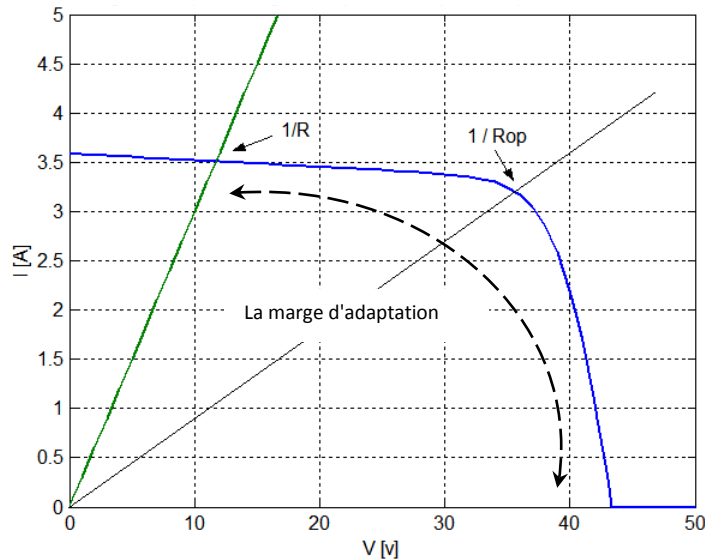
$$\frac{V_s}{I_s} = R \quad (3)$$

De (1), (2) et (3) on trouve $\frac{V_e}{I_e} = \frac{R}{\alpha^2}$

Avec α : le rapport cyclique, V_s/V_e et I_s/I_e en valeur moyenne.

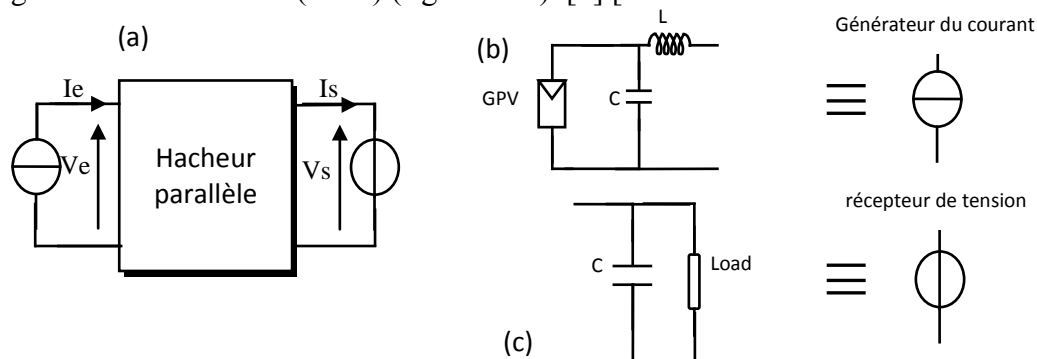
Selon la loi de thévenin, on peut déduire le schéma de la figureII.20, où l'hacheur avec la charge présente une charge variable en fonction de rapport cyclique α , on varie α jusqu'à obtenir la charge optimale R_{op} qui donne la puissance maximale de GPV, et comme α présente le rapport cyclique d'hacheur $\alpha \in [0 \ 1]$, donc $\frac{R}{\alpha^2} \in [R \ \infty]$, (∞ : circuit ouvert), alors il faut que $R_{op} \in [R \ \infty]$ ou $R_{op} > R$ (figureII.21).

FigureII.21 : la marge d'adaptation d'impédance par l'hacheur série



II.2.2.2. Hacheur parallèle (survolteur)

On utilise un hacheur parallèle survolteur (BOOST) si nous souhaitons atteindre une tension avec charge supérieur à celle du GPV. Ce dernier fonctionne comme un générateur de courant ($I \approx cte$) (figureII.22). [6] [13]



FigureII.22 ; Hacheur parallèle pour adapter une charge continue

on fait la même étude que le hacheur série [13].

$$L_e = \frac{V_e \alpha}{f \cdot \Delta I_e}$$

$$C_s = \frac{V_e \alpha}{f \cdot R \cdot \Delta V_s (1-\alpha)}$$

$$C_{pv} = \frac{I_s \alpha (1-\alpha)}{f \cdot V_e \cdot \Delta I_e}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (1) \quad // \text{Vs et Ve en valeur moyenne}$$

$$\frac{I_e}{I_s} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (2) \quad // \text{Is et Ie en valeur moyenne}$$

$$\frac{V_s}{I_s} = R \quad (3)$$

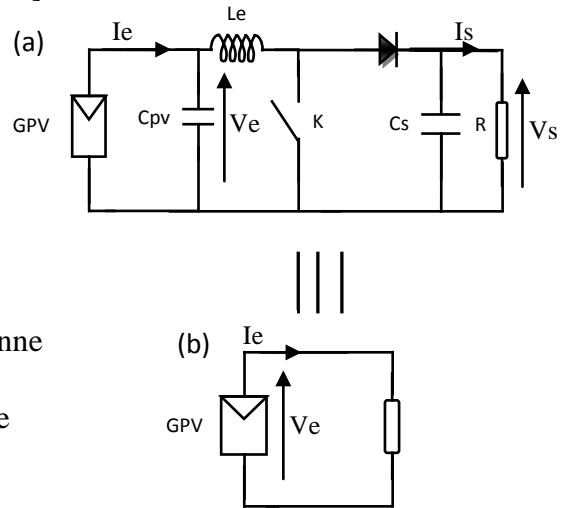
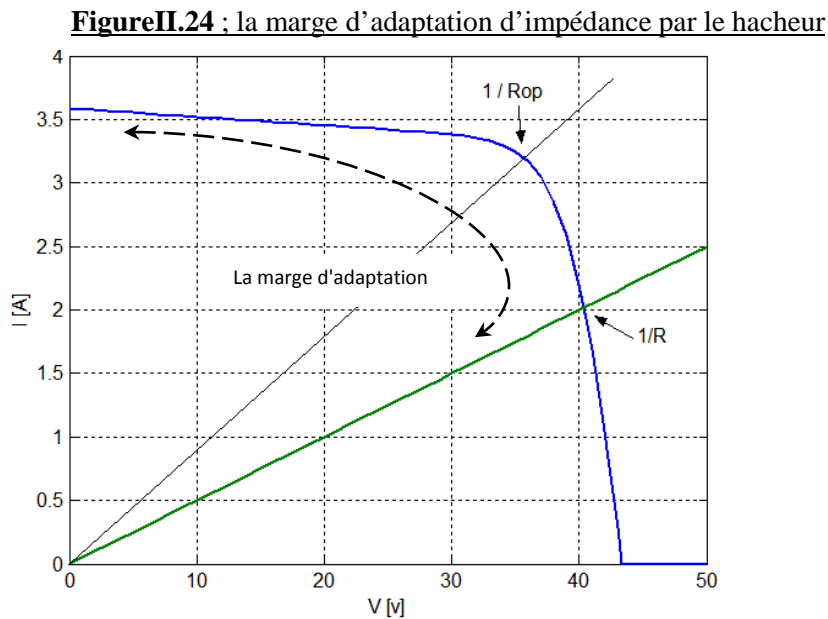


Figure II.23 ; l'équivalent d'un hacheur parallèle (loi Thévenin)

De (1), (2) et (3) on trouve $\frac{V_e}{I_e} = R(1 - \alpha)^2$

Selon le loi de thévenin, on peut déduire le schéma de la figure (II.23.b).

Alors on varie α jusqu'à obtenir la charge optimale R_{op} qui donne la puissance maximale de GPV, et comme α présente le rapport cyclique d'hacheur $\alpha \in [0 \ 1]$, donc $R(1 - \alpha)^2 \in [0 \ R]$, (∞ : circuit ouvert), alors il faut $R_{op} \in [0 \ R]$ ou $R_{op} < R$ (figure II.24).



Remarque: le mode continue du hacheur série (parallèle) c'est que le courant de la sortie (entrée) ne s'annule jamais et pour atteindre ce mode de fonctionnement il

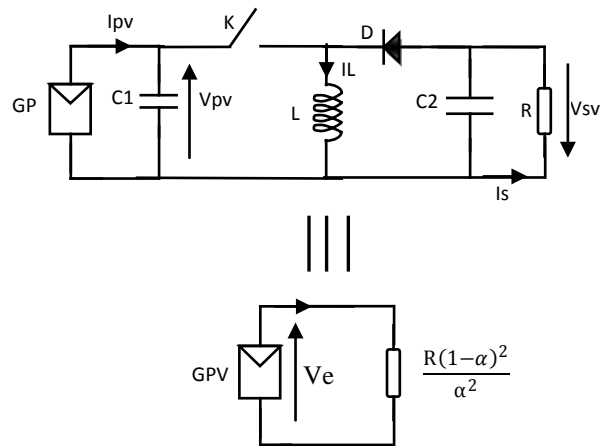
faut; pour l'hacheur série $T_s=L_s*C_s \gg T$ (le période d'hachage) et pour l'hacheur parallèle T_0 (temps de résonance de L_e et C_s) $\gg T$ (le période d'hachage). [6][13]

II.2.2.3. Hacheur stockage inductif série-parallèle (BUCK-BOOST)

Comme nous avons vu, l'hacheur série (parallèle) peut adapter l'impédance du système photovoltaïque mais dans un intervalle limité (pour l'hacheur série il faut que la résistance adaptée soit inférieure à la résistance optimale et l'inverse pour l'hacheur parallèle) et pour résoudre ce problème on utilise la combinaison entre l'hacheur série et parallèle, ce qui nous donne l'hacheur série-parallèle figureII.25. [6] [13]

Pour les ondulations données :

$$\begin{cases} L = \frac{V_{pv} - R_L I_L}{2\Delta I_L} \alpha T \\ C_1 = \frac{I_{pv} - I_L}{2\Delta V_{pv}} \\ C_2 = -\frac{I_s}{2\Delta V_s} \alpha T \end{cases}$$



FigureII.25 ; l'équivalent d'un hacheur série-parallèle (loi thévenin)

ΔI_L :ondulation du courant ΔV_s : ondulation de la tension de la sortie

R_L :résistance interne de la bobine

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (1) \text{ // } V_s \text{ et } V_e \text{ en valeur moyenne}$$

$$\frac{I_s}{I_e} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (2) \text{ // } I_s \text{ et } I_e \text{ en valeur moyenne}$$

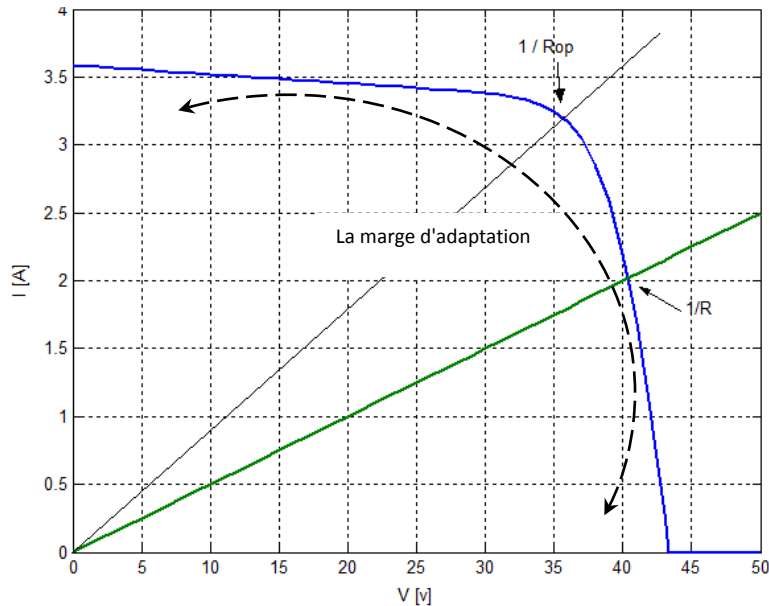
$$\frac{V_s}{I_s} = R \quad (3)$$

De (1), (2) et (3) on trouve que : $\frac{V_e}{I_e} = \frac{R(1-\alpha)^2}{\alpha^2}$

Selon la loi de thévenin, on peut déduire le schéma de la figureII.25.

$\alpha \in [0, 1]$, donc $\frac{R(1-\alpha)^2}{\alpha^2} \in [0, \infty]$, (∞ : circuit ouvert), alors on peut adapter toute les charge figure II.26

Figure II.26 : la marge d'adaptation d'impédance par l'hacheur série-parallèle



II.2.3. Les algorithmes de MPPT (maximum power point tracking)

Quand la charge est variable, il faut toujours faire une correction (adapté la charge) pour obtenir le MPP par un système de régulation. [6] [11]

Le MPPT (maximum power point tracking) est un mécanisme poursuit qui est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques, en poursuivant continuellement le point de puissance maximale. La figure (II.27) montre une vue générale d'un système photovoltaïque doté d'un contrôleur MPPT. [6][11]

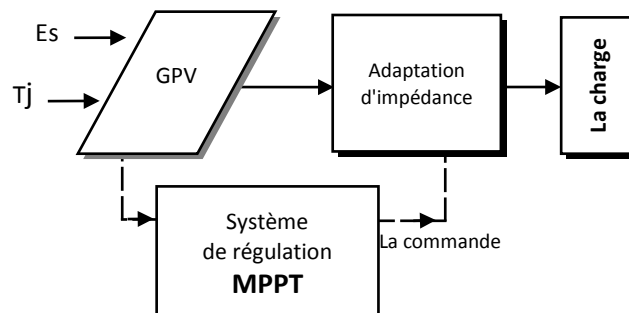


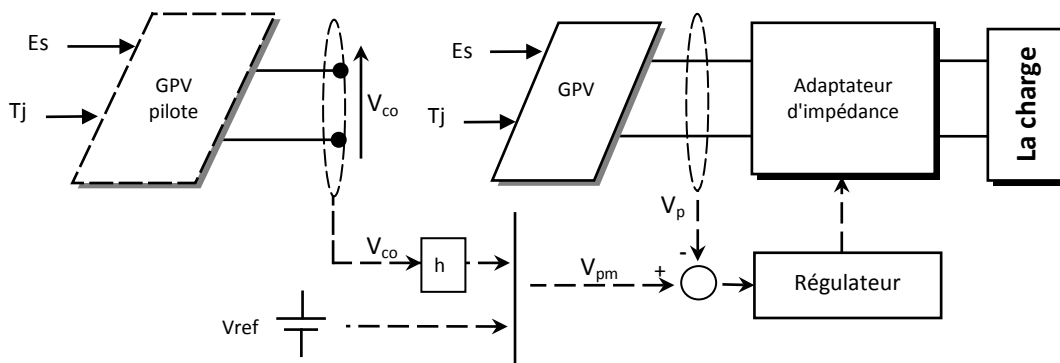
Figure II.27 : un système photovoltaïque avec un régulateur MPPT

depuis 1968 Plusieurs commandes MPPT ont été développées et implémentées.

II.2.3.1. Méthode à contre réaction de tension [1]

Cette méthode se base sur l'asservissement de la tension d'un générateur à une tension de référence, qui donne la puissance maximale de GPV (V_{pm}) (figureII.28), et selon la méthode pour obtenir V_{pm} on a:

- V_{pm} est une valeur constante.
- V_{pm} en fonction de la tension de circuit ouvert de GPV ($V_{ref} = h * V_{oc}$), et on obtient le V_{oc} par une cellule pilote ou par débranchement de GPV.



FigureII.28 ; méthode de contre réaction de tension

II.2.3.2. Méthode à contre réaction du courant [6]

Cette méthode est similaire à la méthode précédente mais le courant, qui donne la puissance maximale I_{pm} est pris comme référence:[11]

- I_{pm} est une valeur constante.
- I_{pm} en fonction du courant de court-circuit de GPV ($I_{ref} = h * I_{cc}$).

II.2.3.3. Méthode d'algorithme "perturbation et observation" [6]

C'est l'algorithme de poursuite le plus utilisé. Il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agit directe sur un paramètre de réglage (rapport cyclique ou fréquence) puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du générateur. Si la valeur de la puissance $P(K)$ est supérieur à la précédente $P(K-1)$ alors on garde la même direction de perturbation sinon on

inverse la perturbation. Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure.[6] [11]

II.2.3.4. Méthode d'algorithme "incrémental conductance" [6]

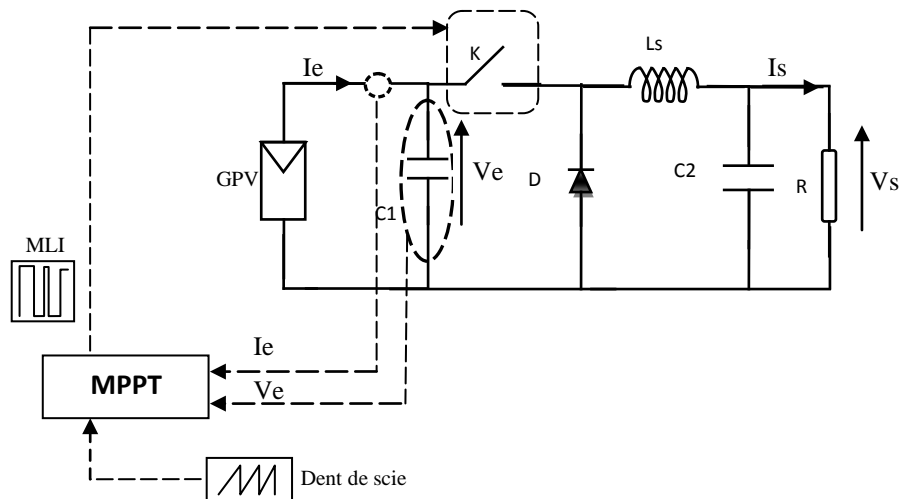
Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du générateur est calculée d'une autre manière. Elle est en fonction de la tension et de la différence de la tension ainsi que du courant et de sa différence. Cette dérivée est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. [11][12]

Cette méthode utilise la conductance incrémentielle de la source comme MPPT. Cette méthode est plus efficace que la méthode de perturbation, et indépendante des caractéristiques des différents composants utilisés. Les tensions et les courants du panneau sont monitorés, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement

II.2.4. Simulation d'un algorithme MPPT sur un système PV SM-110

II.2.4.1. Avec un hacheur série (Buck)

On simule avec MATLAB 6.1 (SIMPOWER) un générateur PV (modèle SIM110) qui alimente une charge résistive muni d'un régulateur MPPT (algorithme d'incrémental) et on l'applique sur un hacheur série (figureII.29)



FigureII.29 simulation un système photovoltaïque avec MPPT (hacheur série)

On prend :

Chapitre II. Le système photovoltaïque

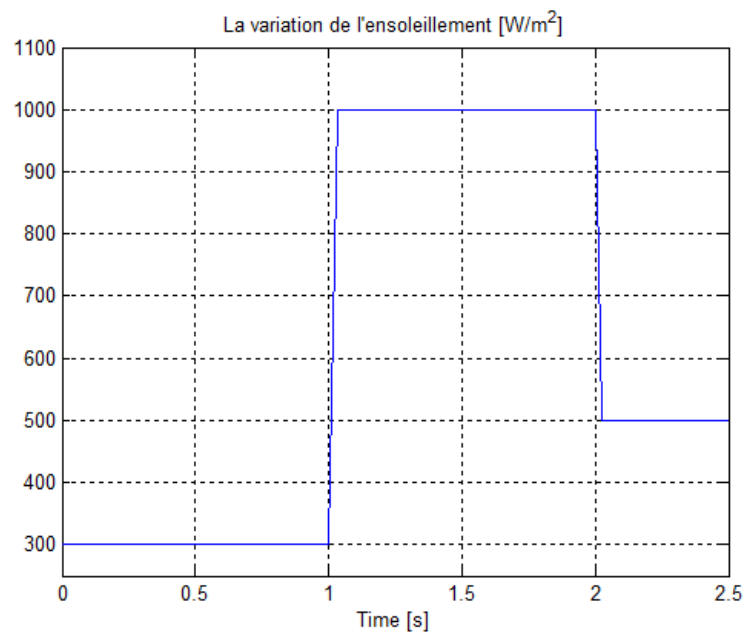
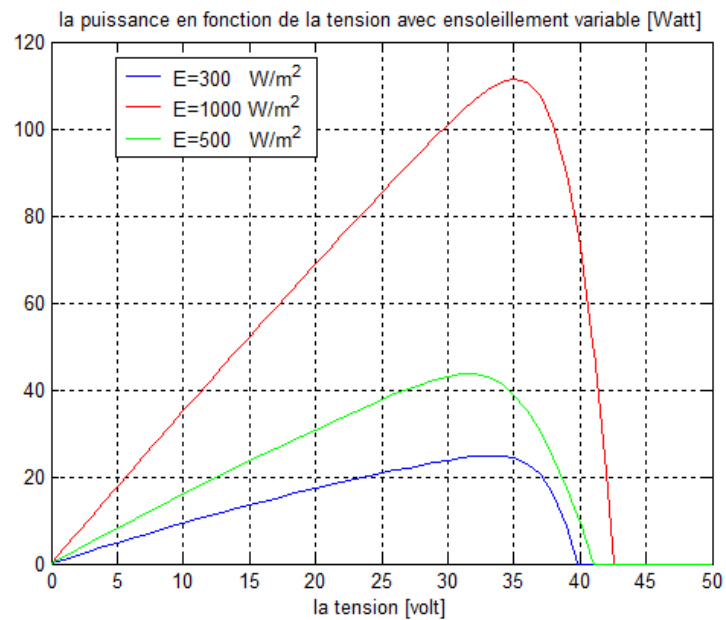
$$C1=1000\mu\text{f}$$

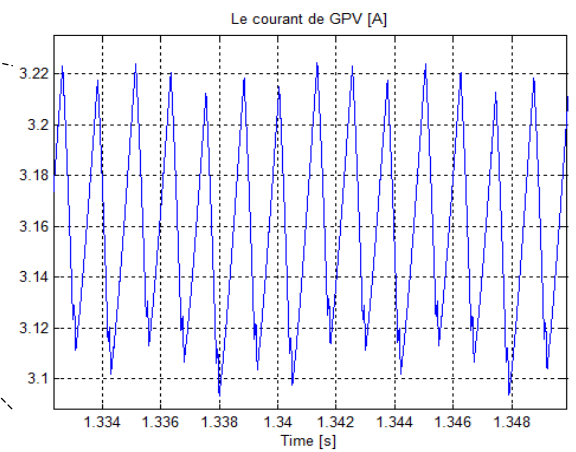
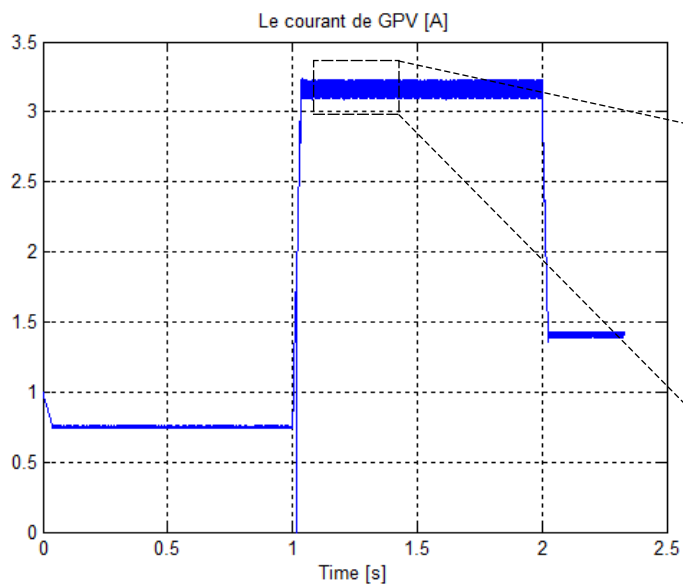
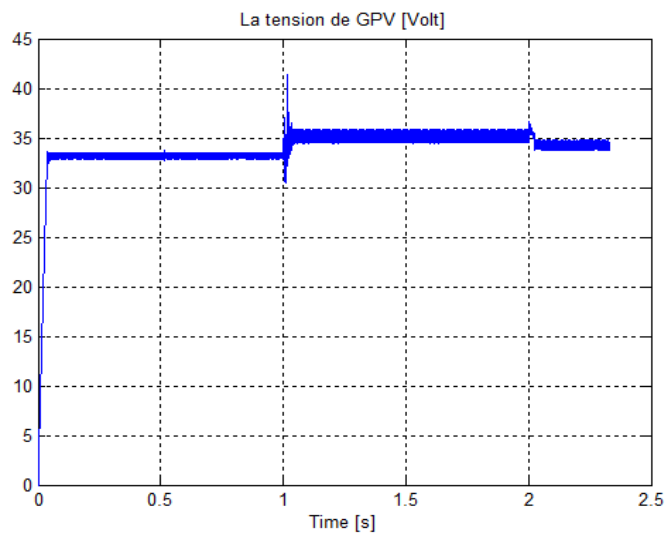
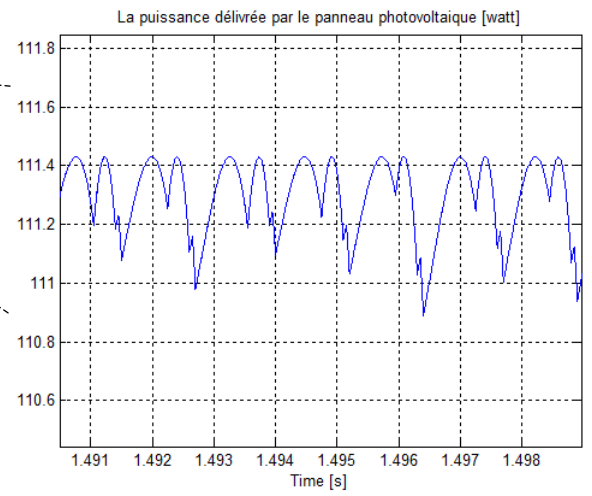
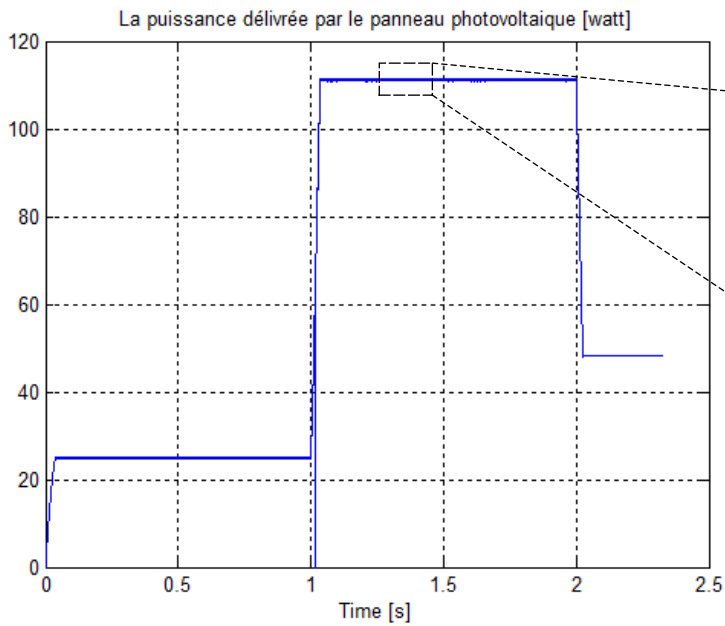
$$C2=2200\mu\text{f}$$

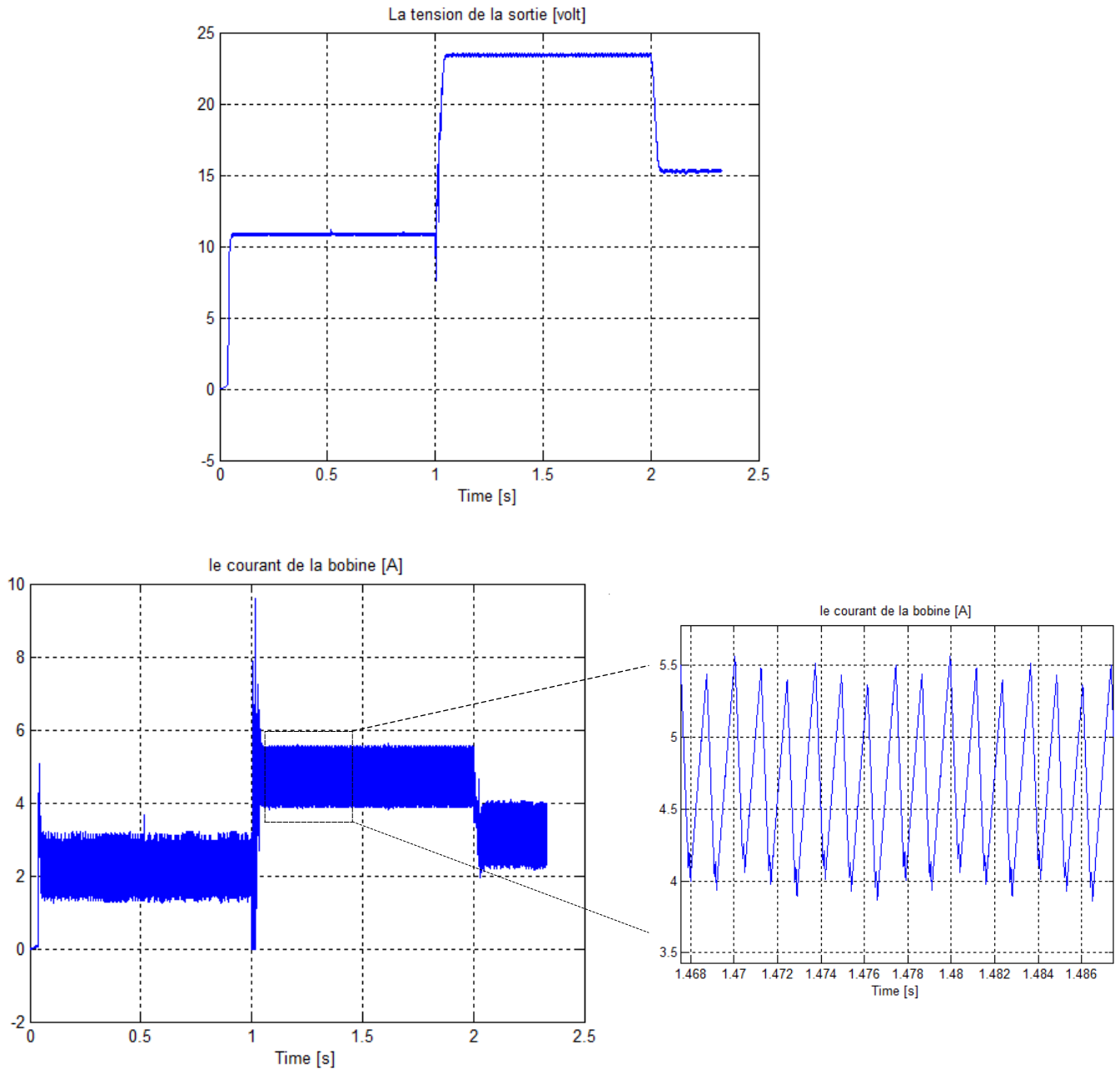
$$Ls=0.006\text{ H.}$$

La fréquence de la MLI $f=10\text{Khz}$

Premièrement ; on fixe la charge ($R=5\text{ohm}$) et on varie l'ensoleillement, pour obtenir les courbes suivantes.



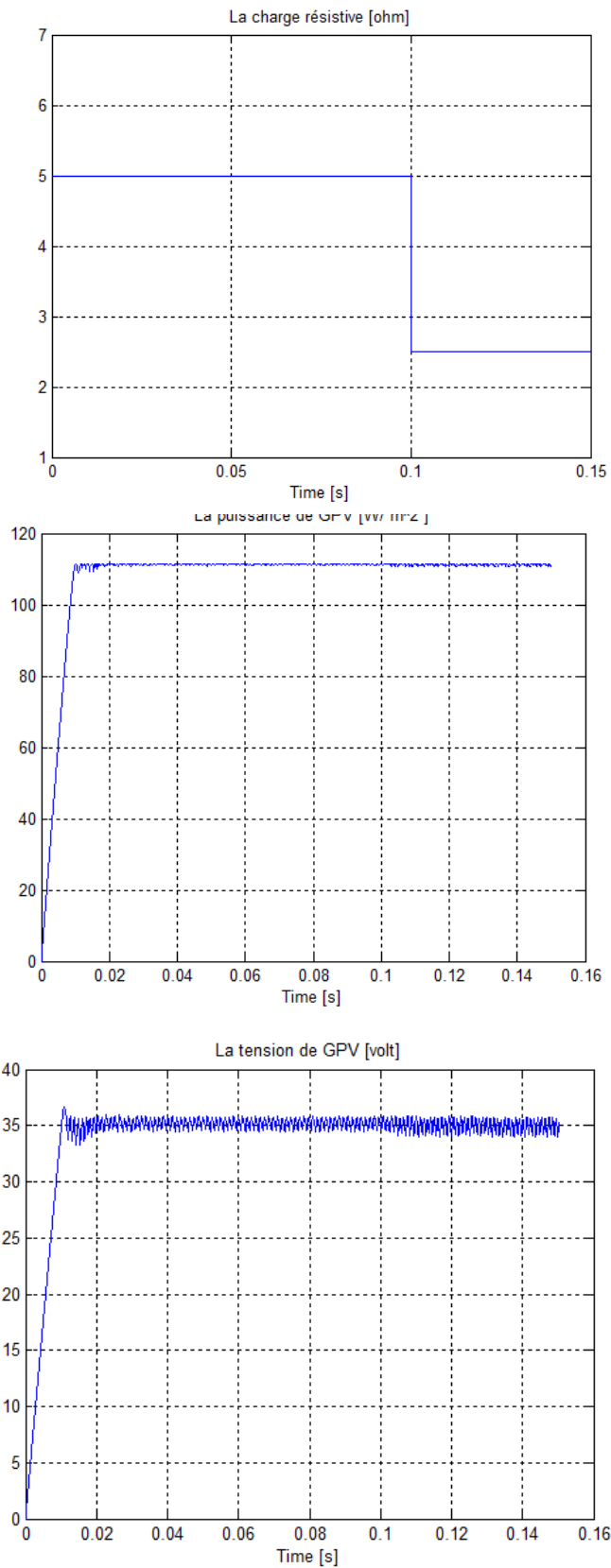


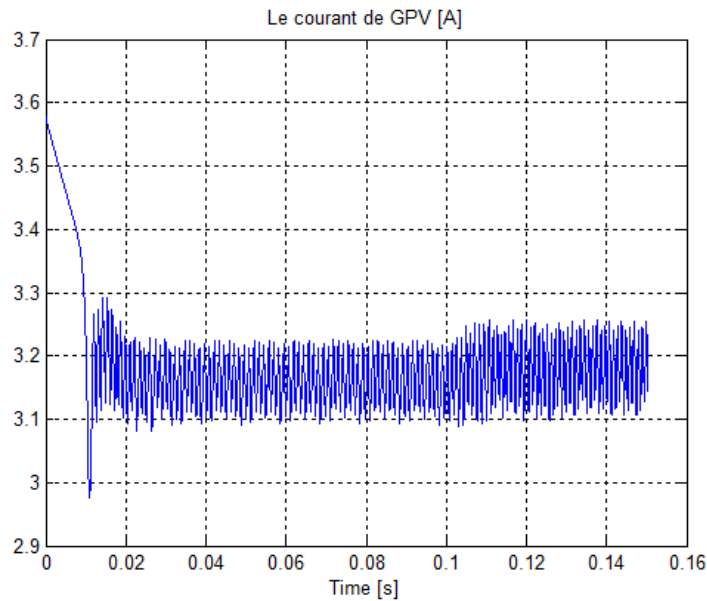


Interprétation : on Remarque que pour chaque variation de l'ensoleillement, le GPV fournit la puissance maximale correspond à cet ensoleillement, donc le régulateur MPPT fonctionne et on obtient le MPP.

L'ondulation dans les courbes du courant et la tension **due** à la charge et à la décharge de la bobine et capacité respectivement.

Deuxièmement : on fixe l'enseillement ($E=1000\text{W/m}^2$) et on varie la charge de 5ohm à 2.5ohm , on obtient les courbes suivantes :





Interprétation : on remarque que le GPV fournit la puissance maximale malgré le changement de la charge donc le point de fonctionnement (le point de puissance maximale) de GPV est indépendant de la charge.

La tension et le courant de la sortie du hacheur se varient selon la charge. Au même temps ils conservent la puissance fournie par GPV.

Note : On peut améliorer la régulation par le changement de l'algorithme de MPPT.

II.2.4.2. Avec un hacheur parallèle (BOOST)

On applique le même travail mais on utilise un hacheur parallèle (BOOST),

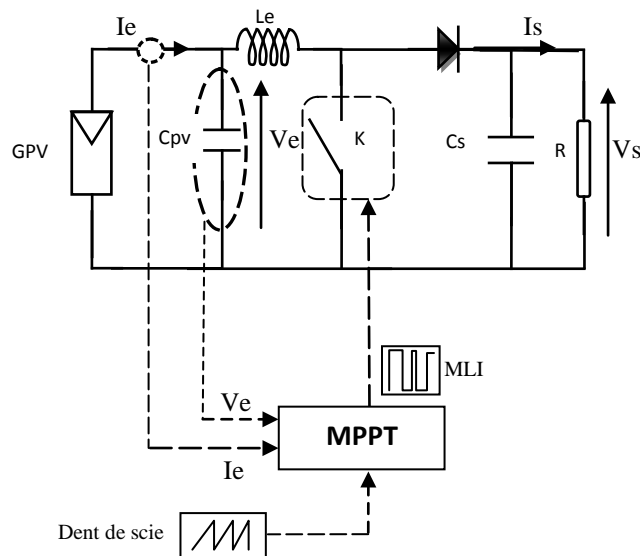


Figure II.30 simulation un système photovoltaïque avec MPPT (hacheur parallèle)

On prend

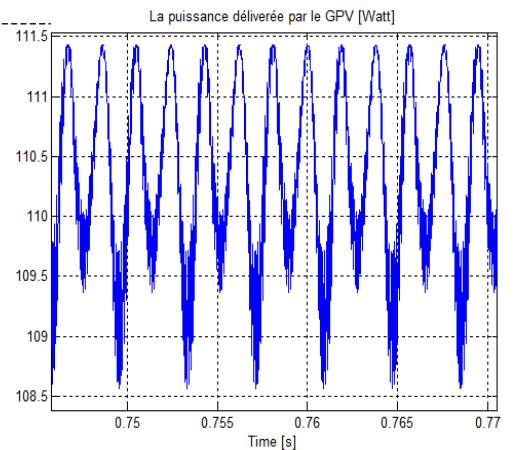
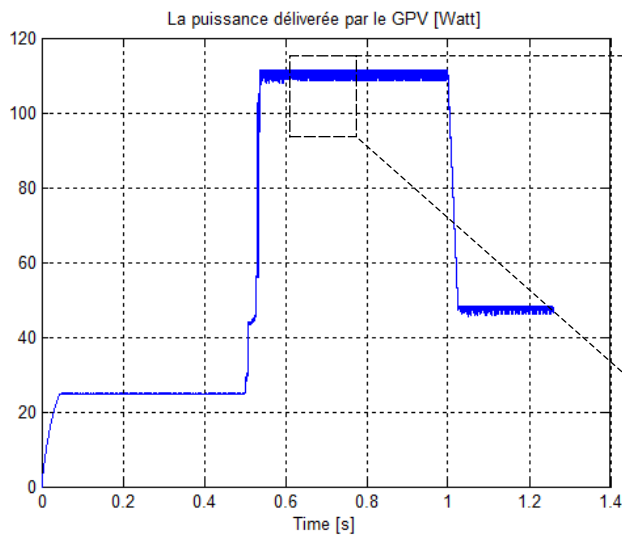
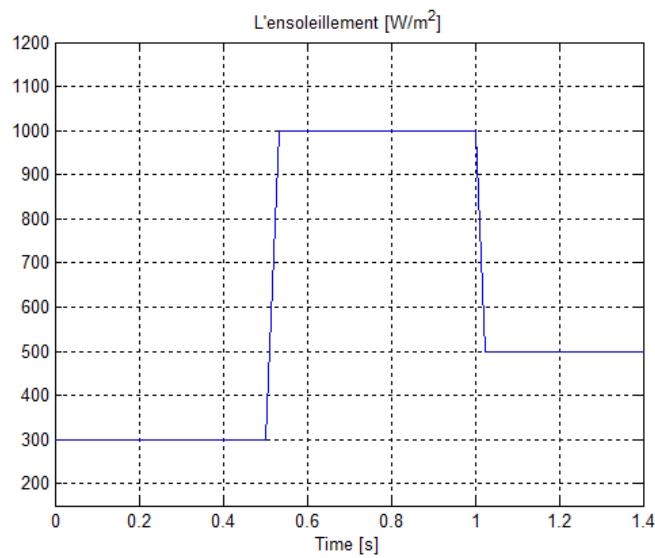
$C_{pv}=500\mu\text{f}$

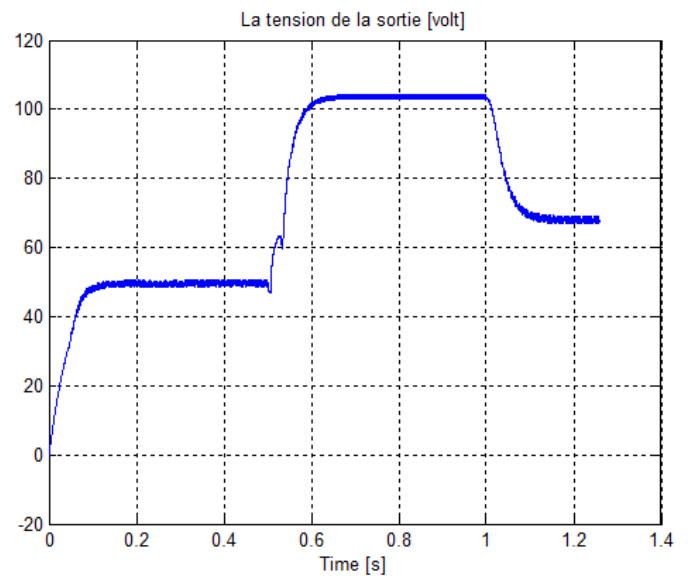
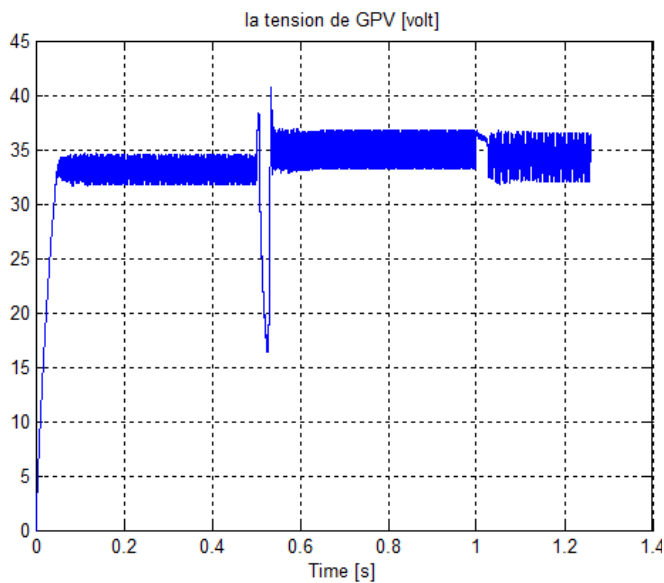
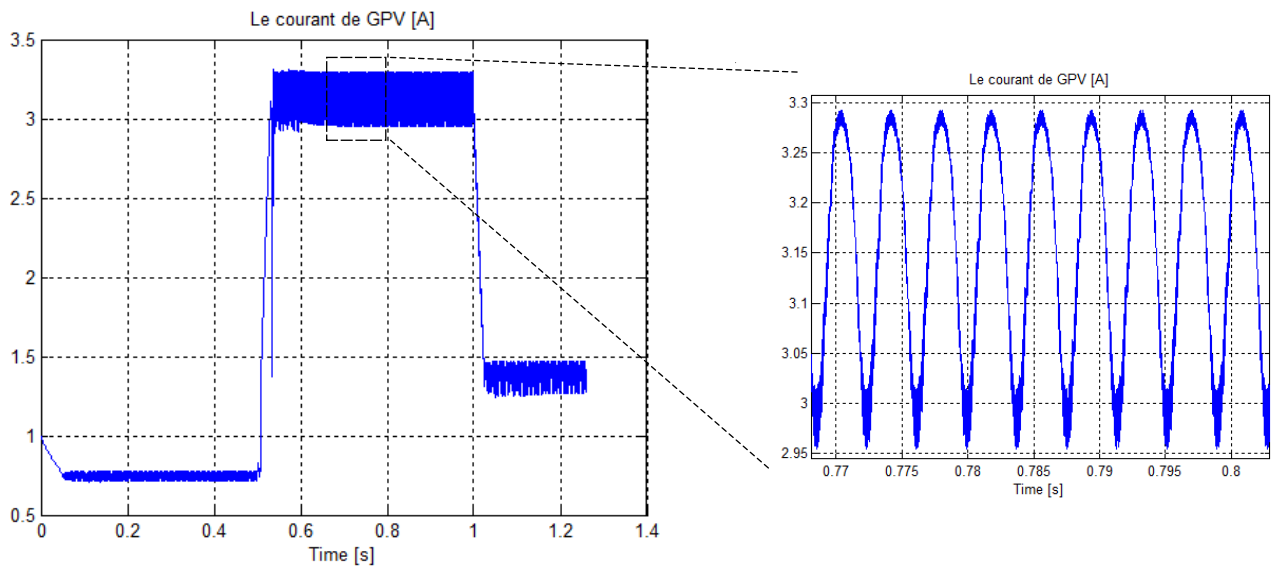
$L_e=0.0001\text{ H}$

$C_s=500\mu\text{f}$

La fréquence de la MLI $f=10\text{Khz}$.

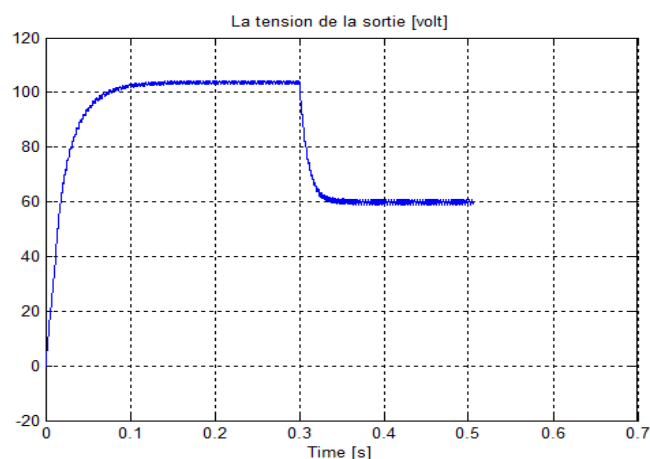
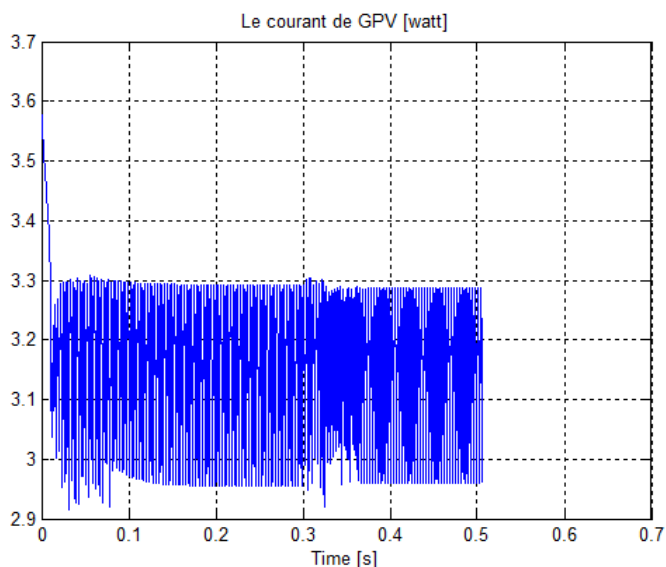
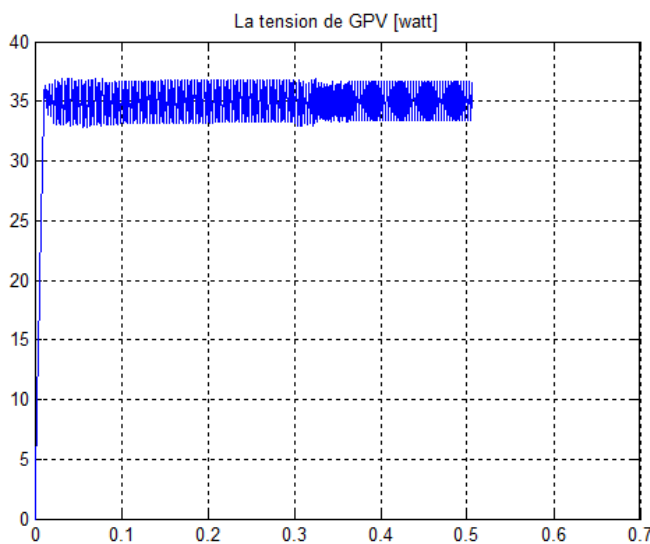
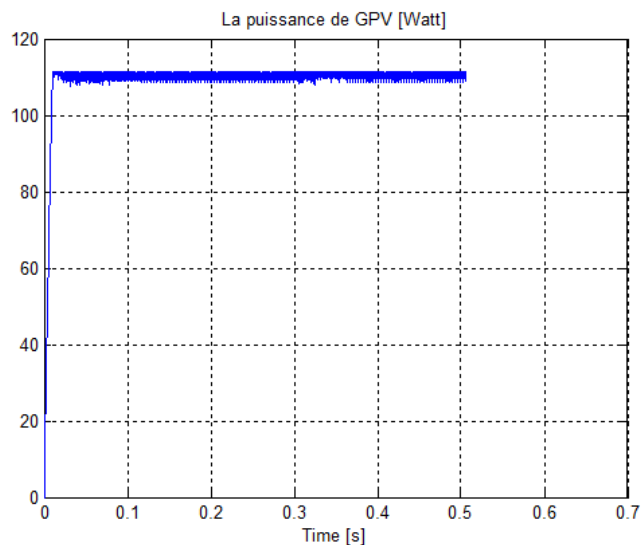
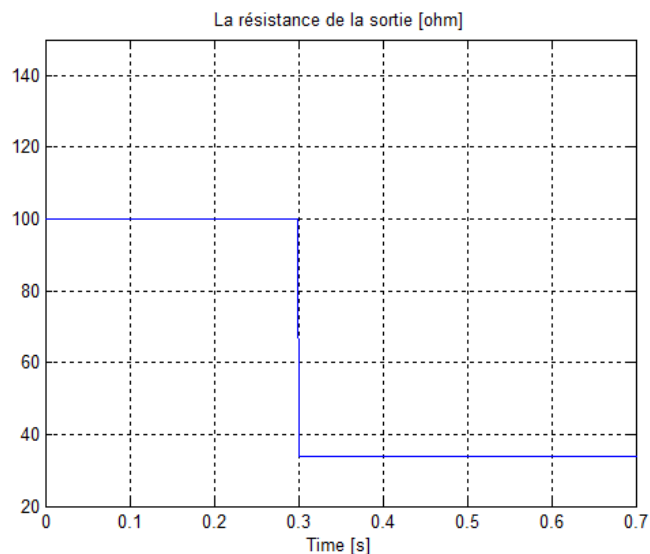
Premièrement : La charge fixe $R=100\text{ ohm}$ et l'ensoleillement est variable





Interprétation : comme le hacheur série, on remarque que pour chaque variation d'ensoleillement, le GPV fournit la puissance maximale, mais la tension de la sortie est supérieure à celle d'entrée (survolteur).

Deuxièmement : l'enseillement fixe et la charge variable (R=100 ohm, R=33 ohm)



Interprétation : on remarque que le hacheur parallèle donne toujours une tension de sortie supérieur à celle d'entrée

II.2.4.3. Avec un hacheur série-parallèle (BUCK-BOOST)

Finalement on utilise un hacheur série-parallèle

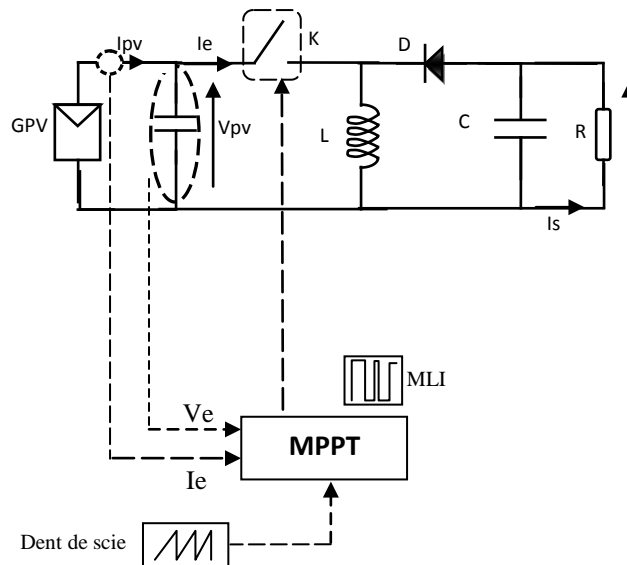
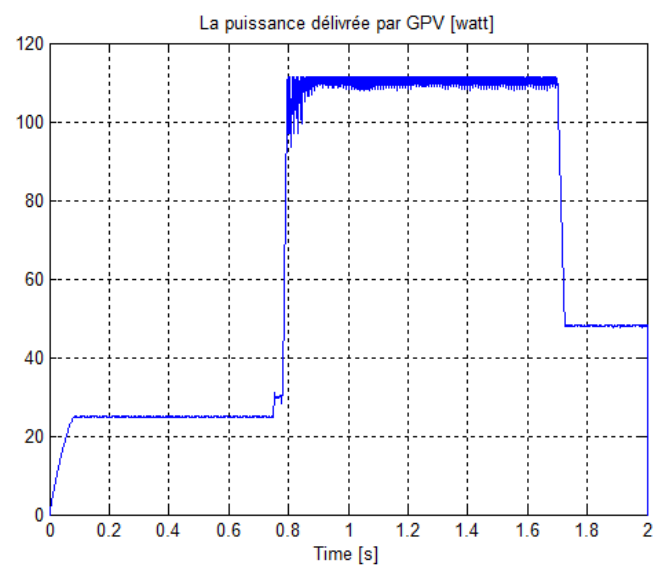
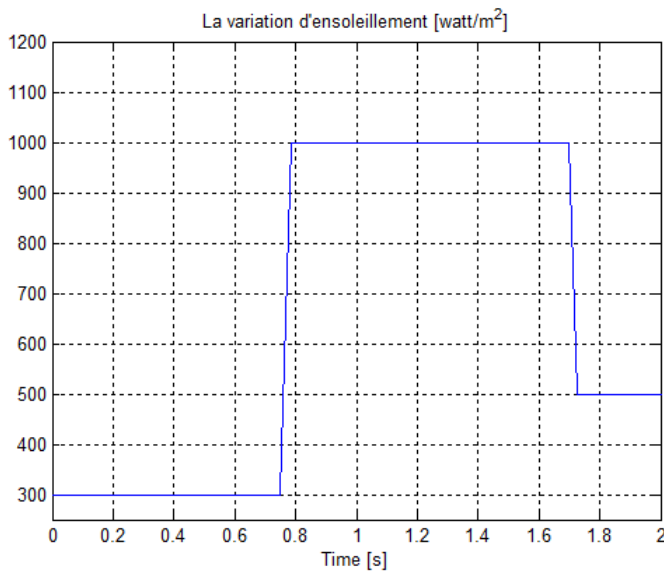
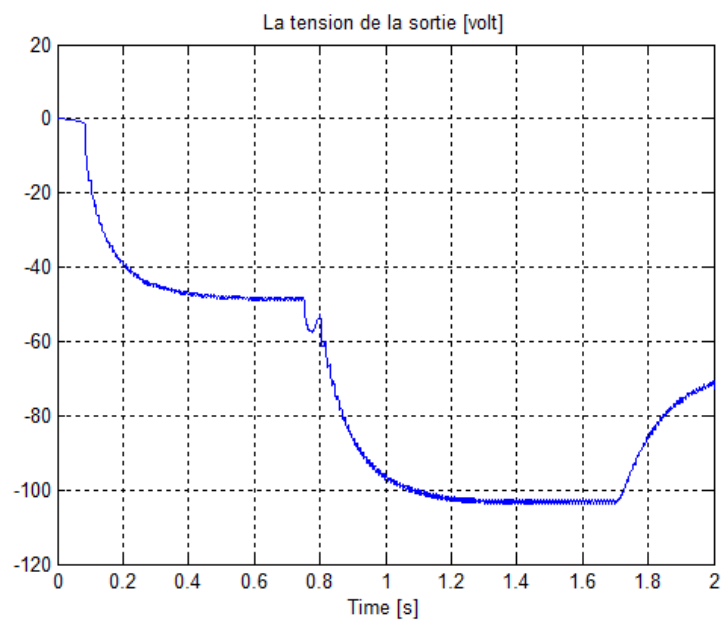
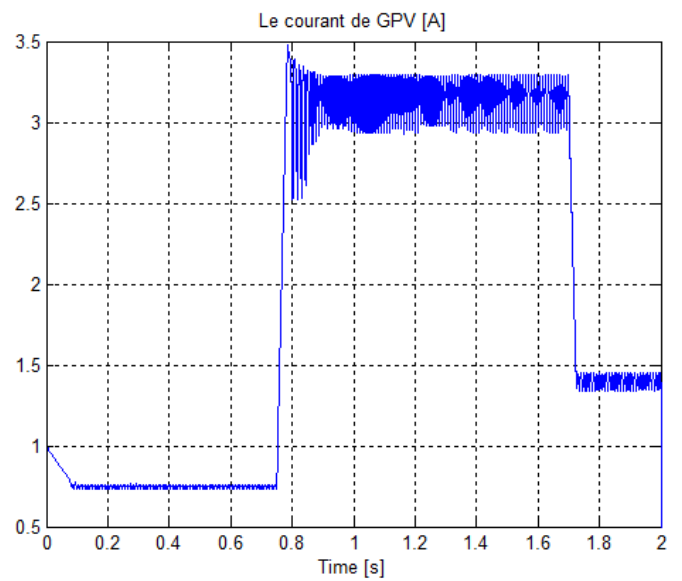
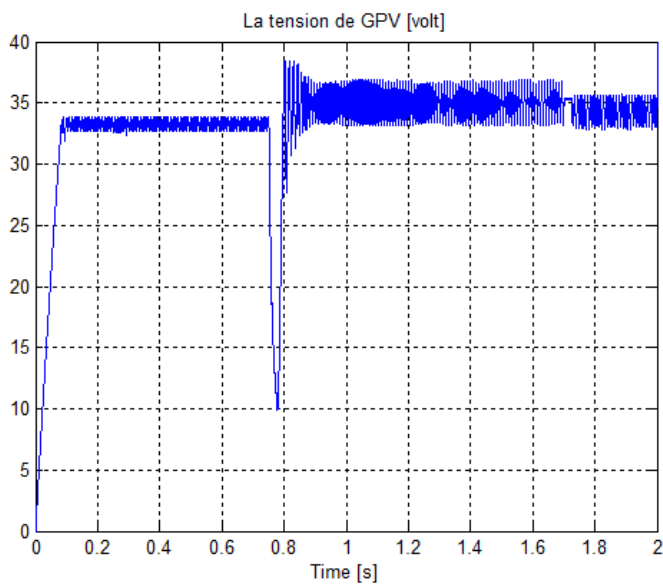


Figure II.31 simulation un système photovoltaïque avec MPPT (hacheur série- parallèle)

On prend $C_{pv}=2200\mu f$, $L=0.0001 H$, $C_s=2200\mu f$, la fréquence de la MLI $f=10Khz$.

Premièrement : La charge fixe $R=100 ohm$, L'ensoleillement variable.

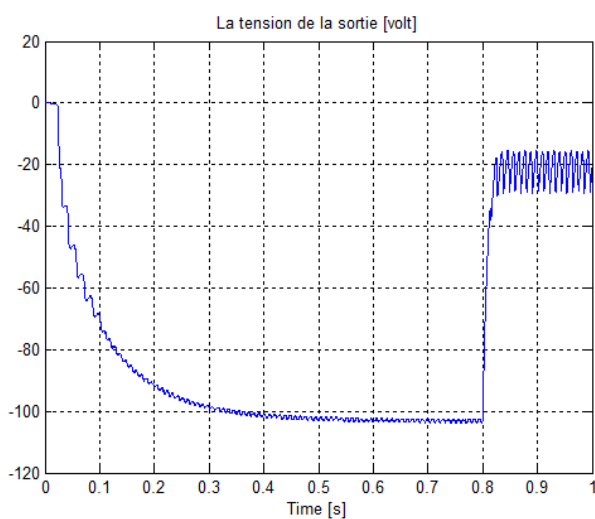
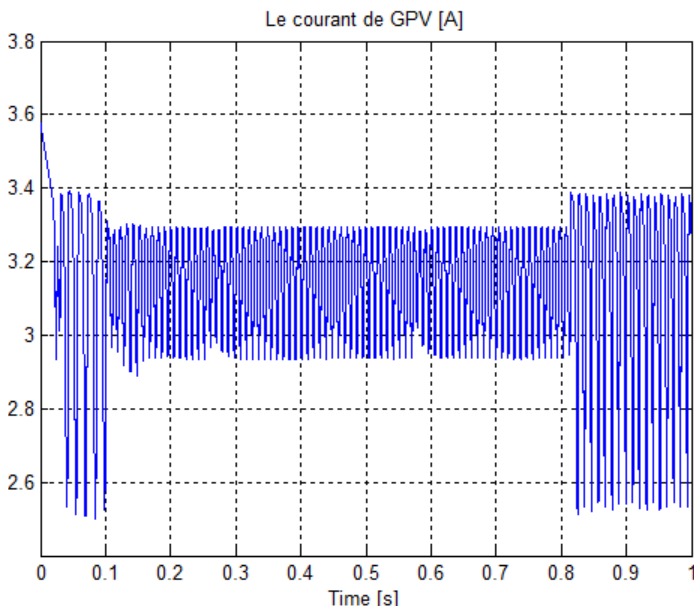
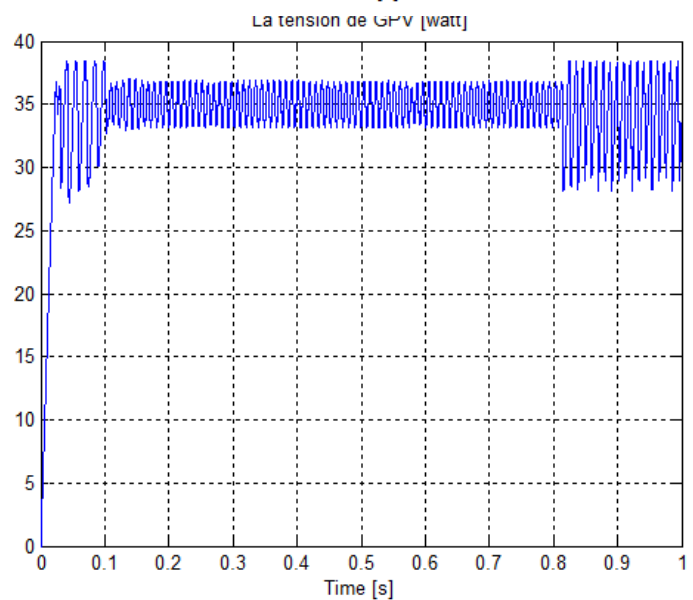
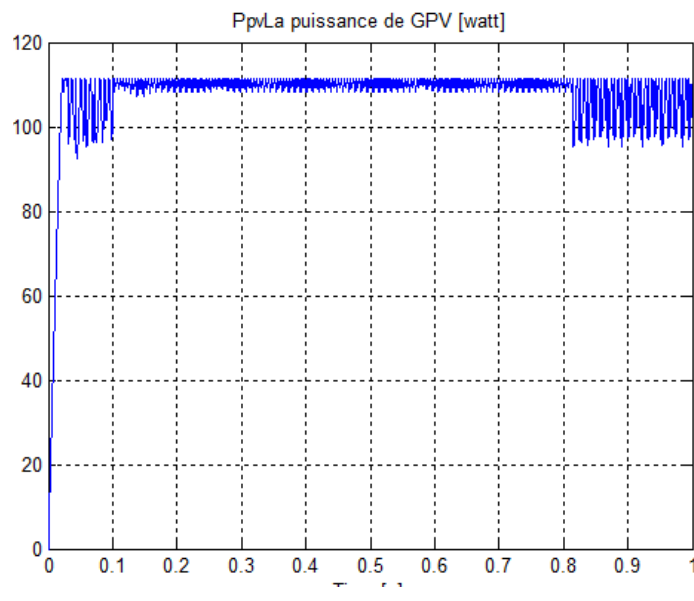
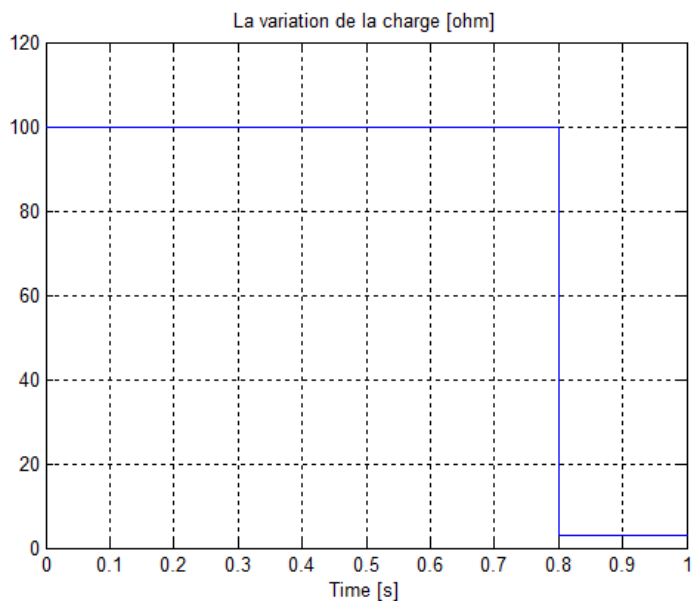




Interprétation : comme le hacheur série et parallèle le hacheur série-parallèle :

Il donne le point de MPP.

Deuxièmement : l'enseillement fixe et la charge variable ($R=100\text{ ohm}$, $R=3\text{ ohm}$)



Interprétation : on remarque que la puissance à la charge $R=100$ ohm est moins oscillée par rapport à la charge $R=3$ ohm car la tension et le courant sont déchargés et chargés plus rapidement que dans le cas de la charge $R=3$ ohm alors la régulation est moins efficace devant cette variation rapide.

Selon la charge, la tension de la sortie peut prendre des valeurs supérieures ou inférieures à celle d'entrée.

II.3. Conclusion

Ce chapitre, nous a permis de voir tout ce qui a trait aux systèmes solaires photovoltaïques sans batterie, ainsi les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque la modélisation d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque sont données. Un point important est mentionné à la fin de ce chapitre, c'est le MPPT qui permet d'extraire le maximum de puissance d'un système photovoltaïque. et on a simulé le MPPT avec les différents types de hacheurs selon les besoins et le système qui vient après ce système.

III.1. Généralité sur les systèmes éoliens et ses conversions électromécaniques

III.1.1. Définition de l'énergie éolienne [13][25]

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure III-1).[13] [14]

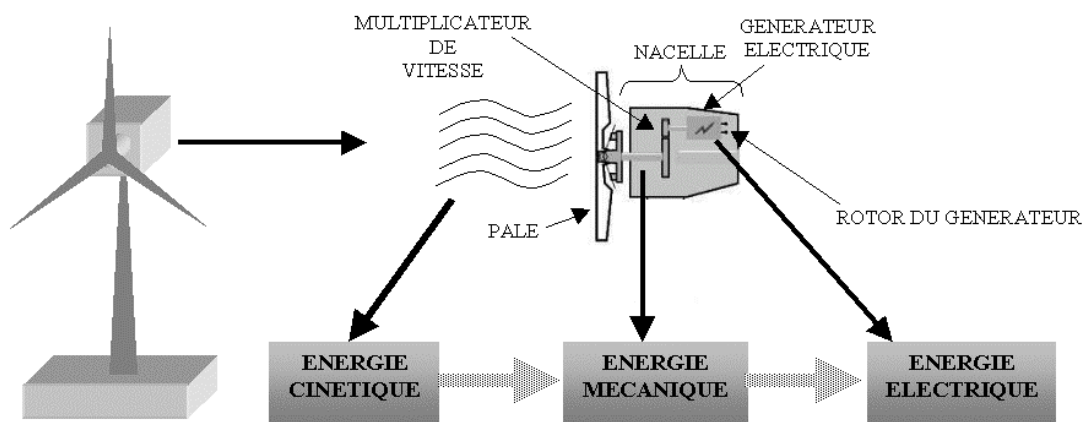


Figure III.1 schéma global et les différentes conversions d'énergie incluent dans le système éolien

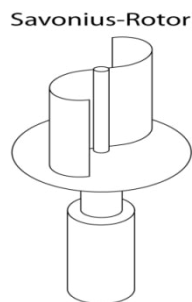
L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.[13]

III.1.2. Les différents types d'éoliennes

III.1.2.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type représente la première structure des aérogénérateurs. L'adjectif vertical signifie que son arbre est vertical au sol, plusieurs structures ont vu le jour mais seulement deux structures ont été industrialisées (figure III.2) [25] :

a/ *Structure Savonius*



b/ *Structure Darrieus*

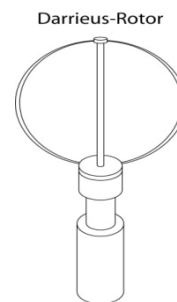


Figure III.2 : Aérogénérateur à axe verticale

Les aérogénérateurs à axe vertical ont l'avantage d'avoir la génératrice et les organes de commande au niveau du sol ce qui facilite les interventions de la maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'installer un système d'orientation des pales mais la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Ils sont de plus exposés à des problèmes d'**aéroélasticité** dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [14][25].

III.1.2.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.[16]

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales [25], mais il existe d'autres structures à une ou deux pales.[13][14]

Les trois principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal sont : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu (figure III.3) [13].

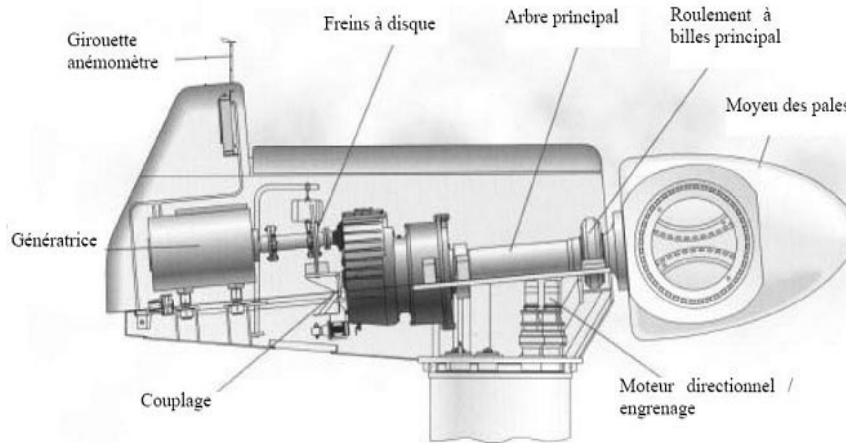


Figure III.3 : Aérogénérateur à axe horizontal

III.1.3. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

III.1.3.1. Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 » (figure III.4) [13][14]

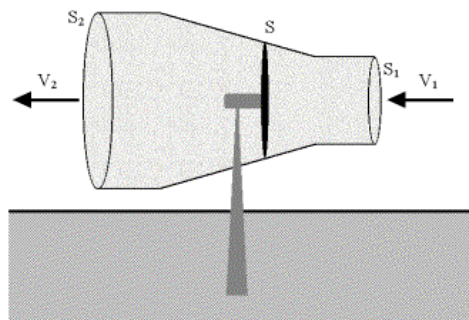


Figure III.4 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

De la figure III.4 on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement [27][6] :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{III. 1})$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par:

$$F = \rho \cdot SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.2})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot SV^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{III.3})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot SV \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.4})$$

On en déduit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (III.2) et (III.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.6})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{III.7})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance correspondante P_{mt} serait alors:

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{III.8})$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{III.9})$$

Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59 (figure III.5) [1] [8] [9]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient (figure III.6) de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ [13].

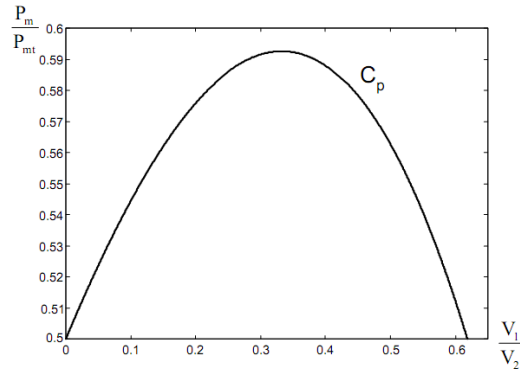


Figure III.5 : Coefficient de puissance [20].

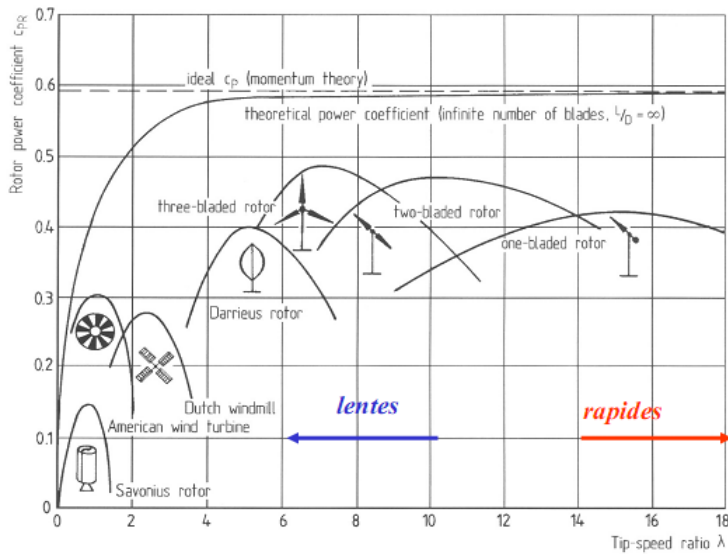


Figure III.6 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs [25]

III.1.3.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (III.8) et (III.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) P_{mt} = C_p(\lambda) P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (III. 10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} \quad (III. 11)$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de rotation de la turbine (après le multiplicateur).

R : La longueur (rayon) de la pale.

V_1 : la vitesse du vent.

La relation (III.10) permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (figure(III.7)).[25]

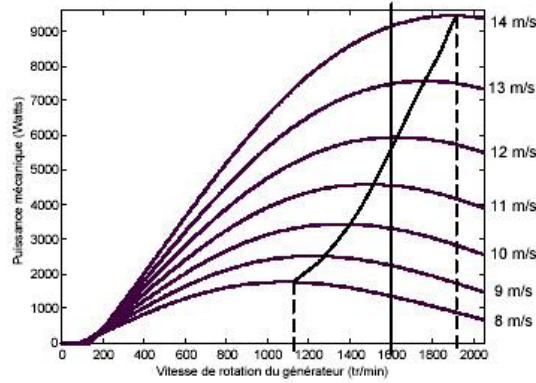


Figure III.7 : La puissance mécanique pour différentes vitesses de vent

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la (Figure III.7) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/mn pour cet exemple [13].

III.1.3.3. Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure III.7. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par [14]

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (III.12)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la Figure III.8 [9]. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent

élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.[13]

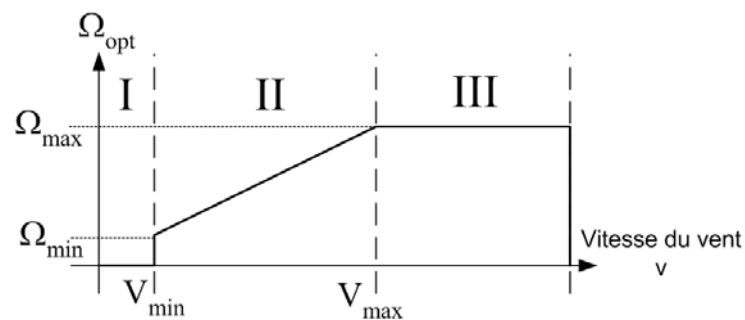


Figure III-8 : Les différentes zones de fonctionnement d'aérogénérateur

III.1.4. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique se représente dans la machine électrique et il y a plusieurs types des machines pour faire ce rôle.[13] [14]

III.1.4.1. Systèmes utilisant la machine synchrone

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotorique et statorique, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée. [13] [14]

Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques.[13] [14]

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau. Donc il nous faut des composants de puissance plus performants. En conséquence, les alternateurs sont abandonnés à cause du coût et des problèmes de l'intégration à un système de production d'énergie éolien (figure III.9). [13]

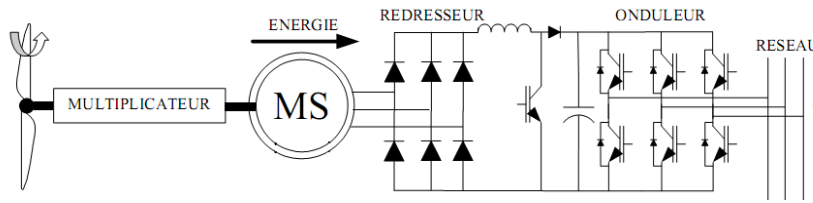


Figure III.9 : éolienne avec machine synchrone

III.1.4.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

a. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Grâce à la simplicité et sa robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la machine asynchrone rend tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.[13]

Quand les vitesses de la machine asynchrone sont au voisinage de la vitesse de synchronisme alors il faut ajouter un adaptateur de vitesse (multiplicateur) entre l'arbre de l'hélice éolienne et la machine pour assurer le fonctionnement stable de la machine, et on ajoute les capacités entre le réseau et la machine pour récupérer la puissance réactive qu'a consommée la machine (figure III.10). [13]

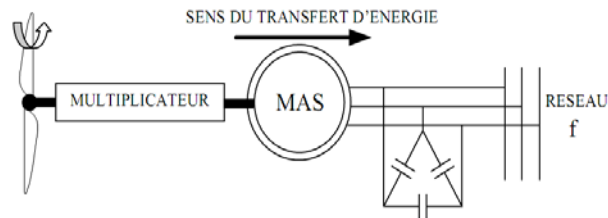


Figure III.10 : éolienne avec machine asynchrone reliée directement au réseau

b. Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (figure III.11)[13] ;

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.[13]

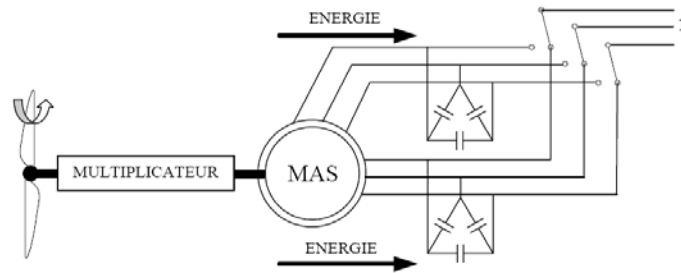


Figure III.11 : éolienne avec machine asynchrone double stator

c. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

La machine asynchrone double stator est plus lourde et coûteuse alors on utilise une simple machine asynchrone et introduit un convertisseur statique entre la machine et le réseau donc la fréquence de réseau est découplée de la fréquence de la génératrice (figure III.12). [14]

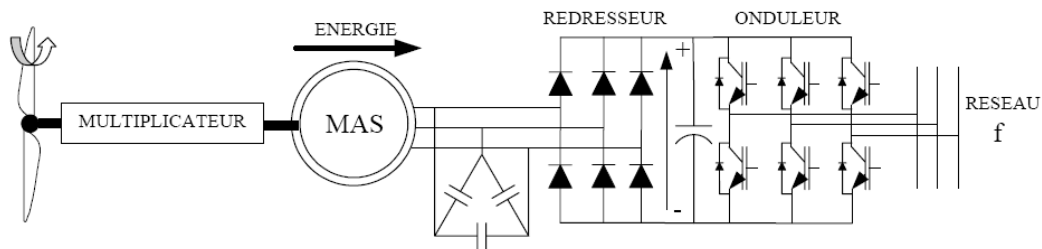


Figure III.12 : éolienne avec machine asynchrone et convertisseur électrique

Les convertisseurs statiques sont dimensionnés pour transférer la totalité d'énergie (la puissance maximum d'éolienne), Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. [14]

d. Machine asynchrone à double alimentation « à rotor bobiné »

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages ; le bobinage du stator destiné au transfert de la totalité de la puissance éolienne vers le réseau ou la charge. Le deuxième bobinage de rotor généralement connecté au convertisseur statique (bidirectionnel (figure III.13 (a et b)) ou unidirectionnel (figure III.13 (c et d)) pour contrôler la puissance rotorique afin de de contrôler la vitesse de la machine.

Pour contrôler la puissance rotorique il y a plusieurs montages ;

- Par dissipation d'énergie à travers une résistance (figure III.13.d).
- Par la récupération de la puissance rotorique avec convertisseur unidirectionnaire (redresseur à diode et onduleur) (figure III.13.c).
- Par la récupération de la puissance rotorique avec convertisseur bidirectionnaire (convertisseur MLI (figure III.13.a) ou cycloconvertisseur (figure III.13.b)).

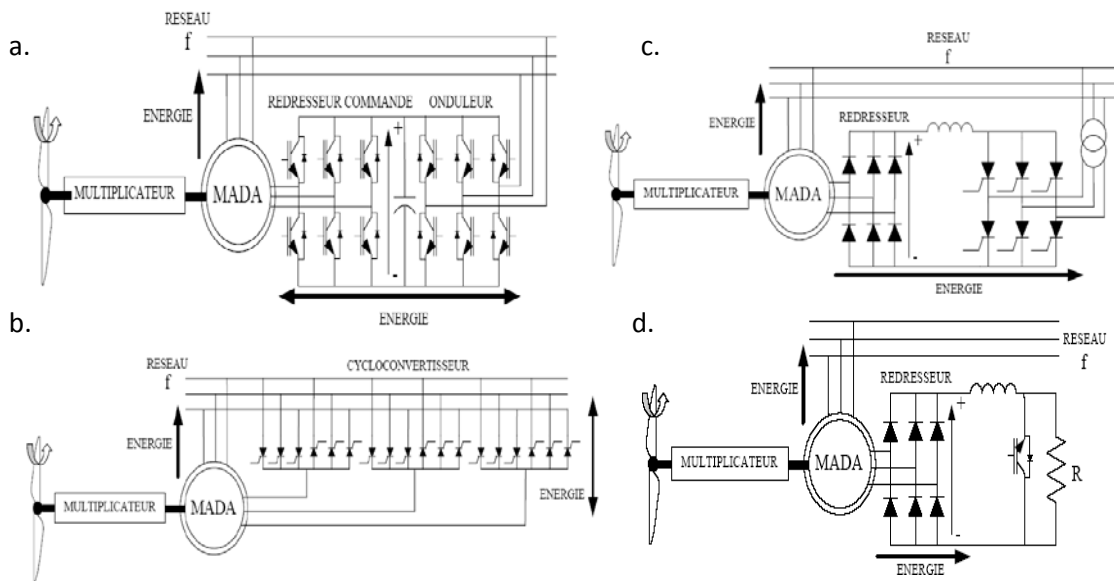


Figure III.13 Les différents convertisseurs électriques utilisés avec l'éolienne qui utilise la MADA [9]

Dans ce cas, le convertisseur rotorique est dimensionné uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine donc il est moins coûteux et moins volumineux. [13]

III.2. Modélisation et stratégie de commande de la machine à asynchrone double alimentation

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la machine asynchrone à double alimentation possède de bonnes propriétés à l'utilisation éolienne car possède la robustesse de la machine asynchrone simple, elle peut fonctionner à des vitesses variables correspond la variation du vent et elle peut donner des fréquences réglables avec un convertisseur rotorique moins chère et moins volumineux, dans le paragraphe suivant on parle sur la structure de la MADA et leur stratégie de commande.

III.2.1. Structure de la machine asynchrone double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), mais le rotor est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure III.14). [15]

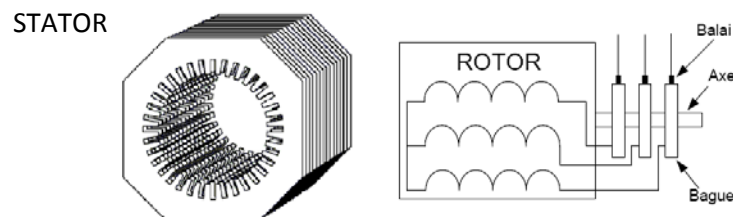


Figure III.14 La structure du stator et du rotor de la MADA

III.2.2. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

Comme la machine asynchrone classique, la MADA est une machine réversible (moteur/génératrice) mais quand le rotor est un enroulement triphasé on peut le connecter avec un circuit externe et il peut absorber ou fournir l'énergie suivant le mode de fonctionnement de la machine. [15]

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone. En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. (1 et 2 de figure III.5) [15]

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor. (3 et 4 de figure III.5) [15]

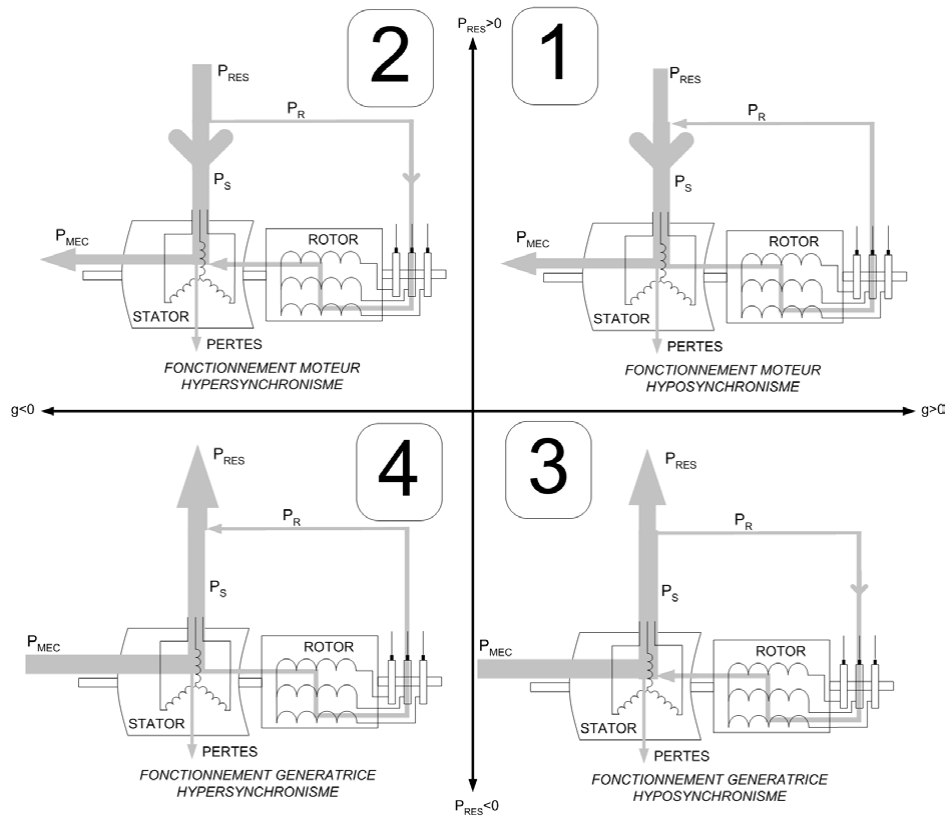


Figure III.15 Les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA [15]

Dans l'utilisation éolienne la machine se fonctionne en mode génératrice (hypo/hyper) synchronisme.

III.2.3. Modélisation de la machine asynchrone double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique dans le côté stator mais possède un rotor accessible. Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotoriques non nulles (figure III.16.a). [11] [17]

Hypothèses simplificatrices : [16]

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique ;

- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable ;
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires ;
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température ;
- Les forces magnétomotrices créés par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale ;
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA :

On applique sur le modèle triphasé de la machine (figure III.16.a) la transformation de park liée au champ tournant (figure III.16.b) on obtient les équations suivantes ; [16] [17]

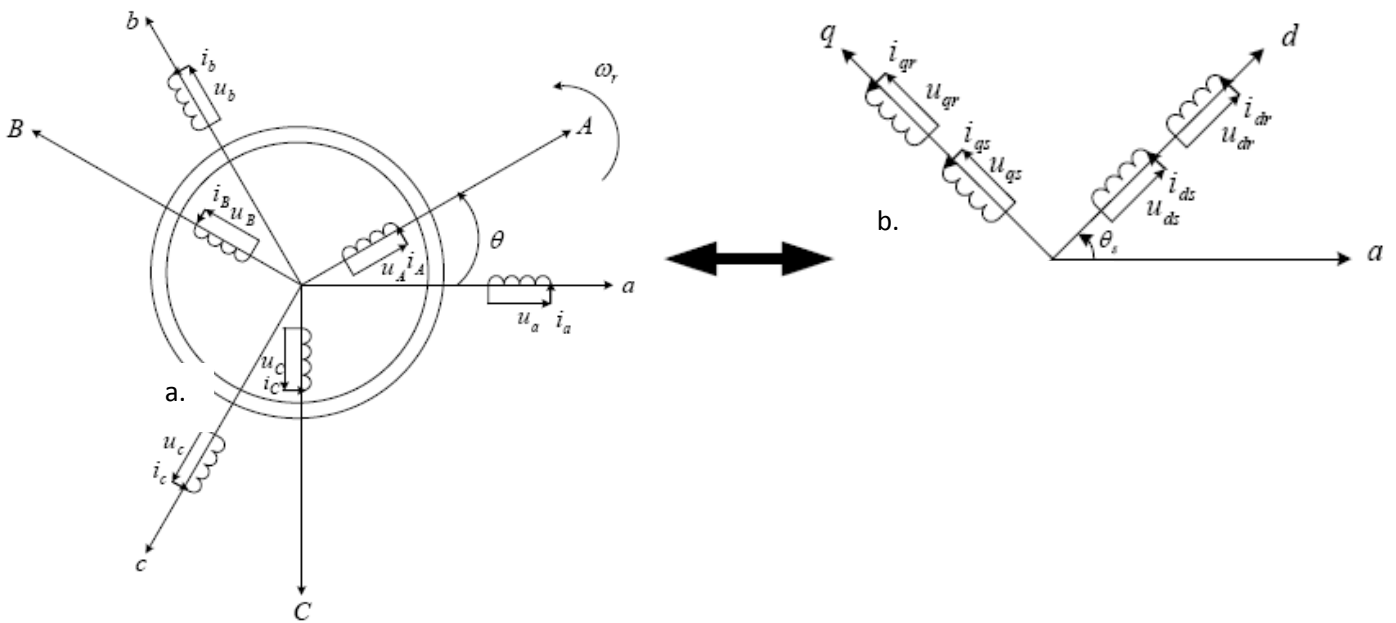


Figure III.16 représentation de la MADA dans le repère abc (a) et dq (b) [16]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

Avec respectivement :

V_{ds}, V_{qs}, V_{dr} et V_{qr} sont les tensions statoriques et rotoriques directe et en quadrature du système diphasé ;

ω_s, ω_r et $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$ sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques, rotoriques et de glissement;

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}$ et φ_{qr} sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé. Leurs expressions sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

Avec :

L_r et L_s sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

M : l'inductance mutuelle.

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III. 15})$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique ;

C_r : Le couple résistant ;

f : le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;

Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;

J : l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \varphi_{ds} - I_{dr} \varphi_{qr}) \quad (\text{III. 16})$$

Avec p le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 17})$$

III.2.4. Commande vectorielle de la MADA [19]

III.2.4.1. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle des machines électriques à courant alternatif est une technique qui vise à retrouver le découplage qui caractérise la machine à courant continu à excitation séparée (figure III.17) pour la quelle le courant inducteur contrôle le flux et celui de l'induit contrôle le couple. Pour GADA (génératrice asynchrone double alimentation), on découple la puissance active et réactive de la machine. [19] [24]

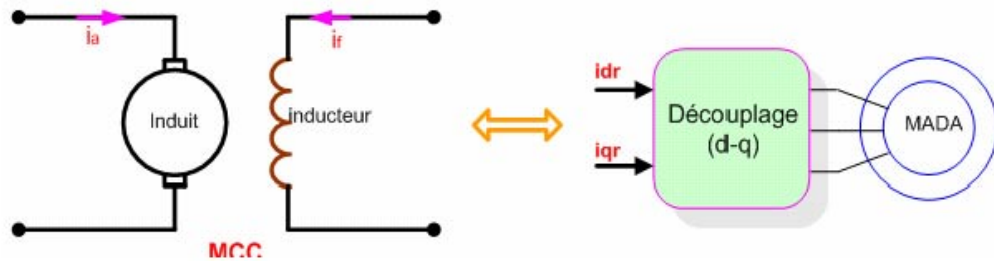


Figure III.17 Le principe de la commande vécotorielle [24]

Pour atteindre le découplage de la puissance active et réactive, il faut orienter (aligner) le repère dq avec le flux statorique ;

$\varphi_{qs} = 0$ on remplace dans l'équation de la tension V_{ds} on obtient ;

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad (III. 18)$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (III. 19)$$

Si on néglige la résistance statorique (hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance), l'équation (III.19) devient ;

$$V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (III. 20)$$

III.2.4.2. Détermination des angles de transformation

Pour réaliser l'orientation décrite ci-dessus, on doit préciser les angles nécessaires aux transformations de Park des grandeurs statoriques ainsi que celles rotoriques. [20] [24]

Une méthode simple consiste à mesurer les tensions statoriques, à les faire passer dans un repère diphasé et en extraire l'angle θ_s que forme le vecteur tension avec l'axe de la première phase du stator. Afin d'aligner le flux statorique avec l'axe d , nous retranchons $\frac{\pi}{2}$ à cet angle θ_s on trouve donc l'angle θ_1 nécessaire aux transformations des grandeurs statoriques (figure III.18). [17]

Pour l'angle θ_2 qui est nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques ; avec un capteur de vitesse, on trouve l'angle θ_m entre la phase a du stator et le rotor, et on l'extrait de l'angle θ_1 de stator. (figure III.18)

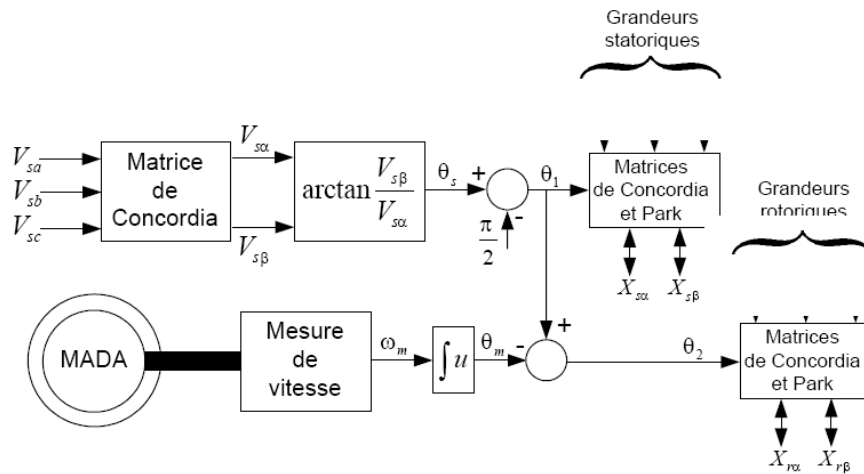


Figure III.18 Le principe de détermination des angles de transformation [17]

III.2.5. La régulation indépendante de la puissance active et réactive de la MADA

III.2.5.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons intéressé à un contrôle indépendant des puissances active et réactive alors en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques. [15] [22]

En orientant le flux statorique alors en orientant le repère de park pour que le flux statorique de l'axe q soit nul, donc ;

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \quad \varphi_{qs} = 0$$

On remplace dans l'équation (III.14) :

$$\varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \quad (\text{III. 21})$$

Dans le régime permanent et si on néglige la résistance statorique $R_s = 0$:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

A partir des équations (III.14, III.18 et III.21) on obtient les relations liant les courants statoriques à ceux du rotor :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive (l'équation III.17) deviennent alors :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.23) dans l'équation (III.24) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 25})$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.22), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III.26})$$

Par ailleurs, on pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant l'équation (III.23) dans (III.14), nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M \left(\frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{qr} \right) \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} - \frac{M^2}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

On remplace l'équation (III.27) dans les tensions rotoriques de l'équation (III.14) ;

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques sont imposés à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime, en revanche le terme $g \frac{M V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation, son influence n'est pas négligeable.[15]

On déduit le modèle simplifié de la MADA qui relié les puissances statorique active et réactive par les tensions rotoriques (figure III.19) [15]

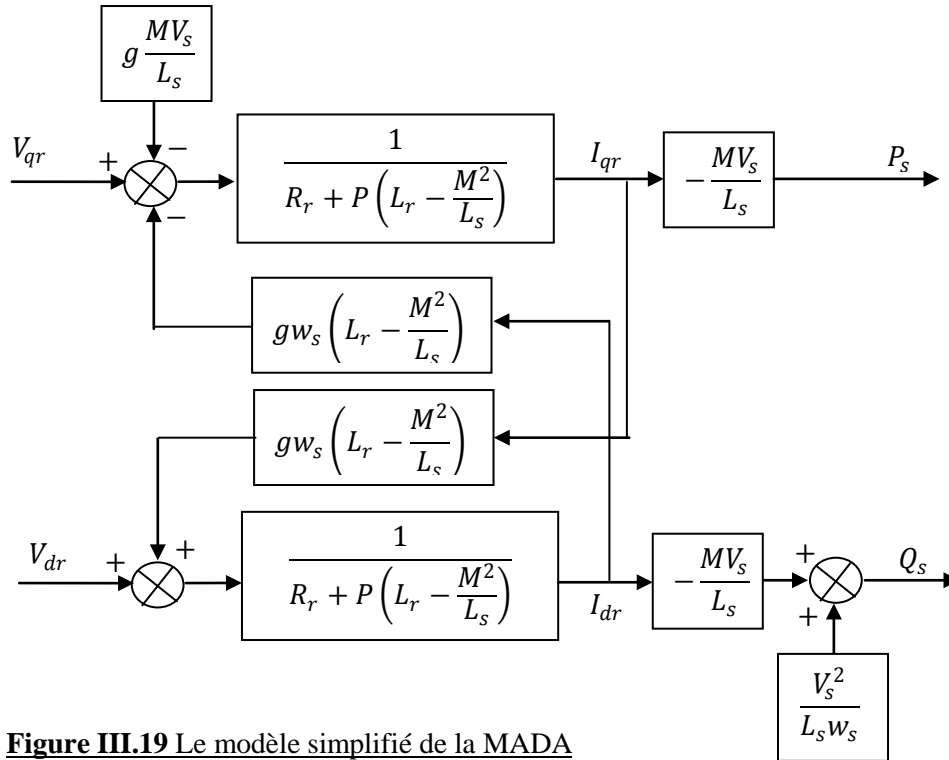


Figure III.19 Le modèle simplifié de la MADA

On remarque que ce modèle simplifié de la MADA (figure III.19) est constitué de deux systèmes de premier ordre couplé entre eux avec le terme $gw_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ et on peut le négliger et commander chaque système indépendamment de l'autre. [15]

III.2.5.2. La structure de la commande

À la base du modèle établi et selon qu'on compense ou non les termes de couplage, on distingue deux méthodes de commande des puissances de la MADA ; à savoir la commande directe et la commande indirecte. [15]

III.2.5.2.1. Commande directe

Cette méthode est appelée directe car le régulateur est placé directement après le calcul d'erreur entre la puissance de référence et mesurée. Il ya deux structures ;

- Sans boucle interne de courant

Une structure qui ne comporte que des boucles de régulations des puissances (figure III.20) ; dans cette structure les termes de couplage sont négligés et les

tensions rotoriques de référence sont issues directement de la régulation des puissances.

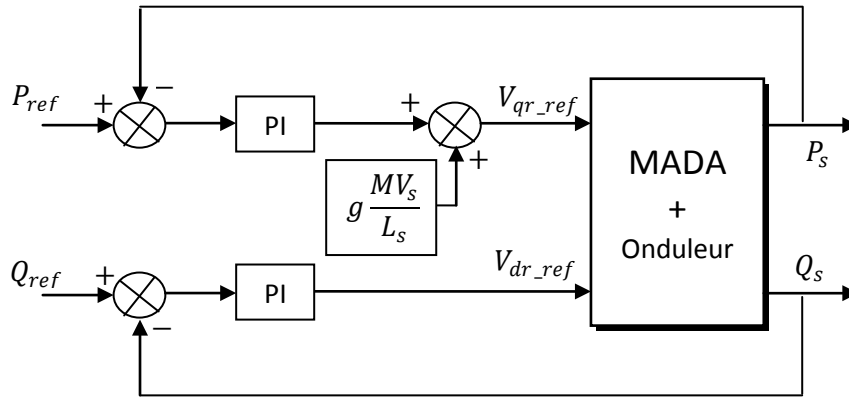


Figure III.20 La régulation directe sans boucle interne du courant

- Avec boucle interne de courant

En ajoutant aux régulateurs des puissances, des régulateurs internes de courants rotoriques. En effet, les courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} sont mesurés et régulés et les termes de couplage sont compensés (figure III.21). Cette structure permet donc de bien maîtriser la dynamique du système. [15]

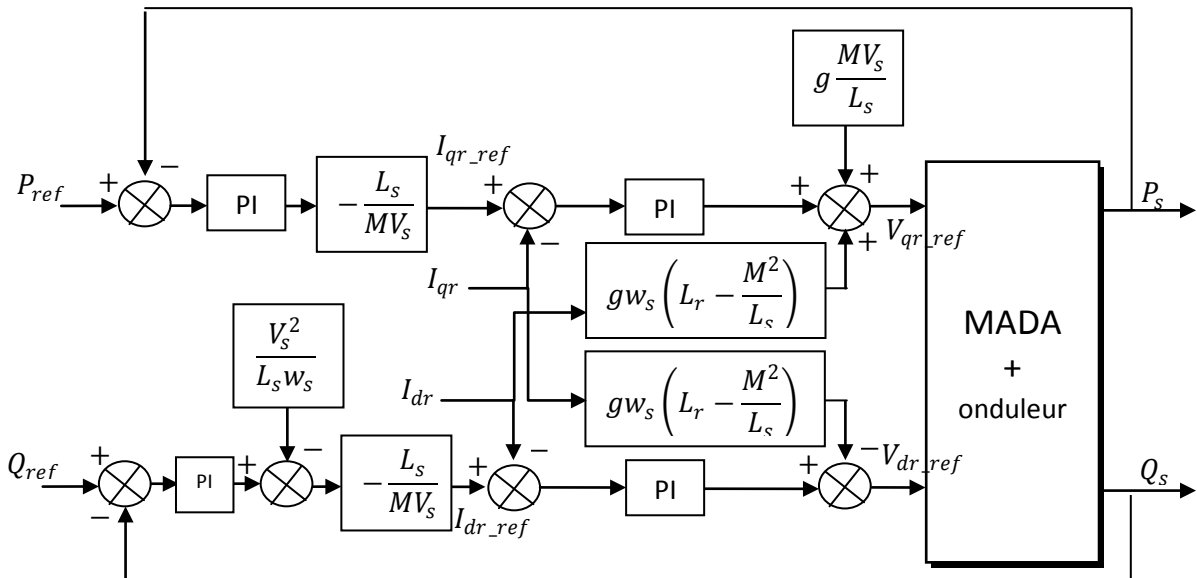


Figure III.21 La régulation directe avec boucle interne du courant

III.2.5.2.2. *Commande indirecte*

Cette commande est indirecte car on ne régule pas la puissance directement mais les consignes de puissance active et réactive utilisés pour déduire les consignes des courants rotoriques pour les réguler (figure III.22). [15]

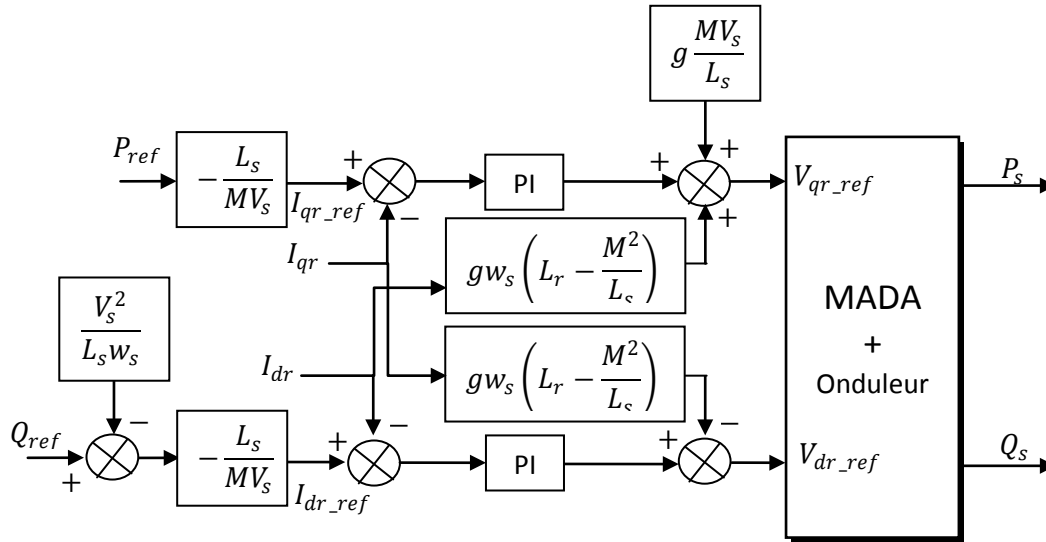


Figure III.22 La régulation indirecte sans boucle externe de la puissance

III.2.5.3. *Méthodologie de synthèse des régulateurs*

Le choix d'un correcteur proportionnel-intégral est immédiat dans notre système car la transformation de Park permet de passer des grandeurs alternatives aux grandeurs continues où les régulateurs PI sont les mieux adaptés. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La Figure III.23 montre le système en boucle fermée corrigé par le régulateur PI. [15]

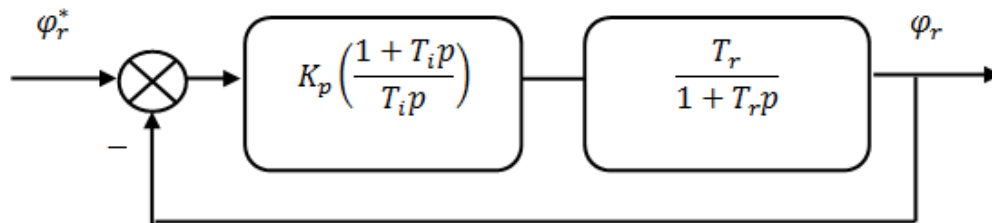


Figure III.23 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = K_p \left(\frac{1 + T_i p}{T_i p} \right) \frac{T_r}{1 + T_r p} \quad (\text{III. 29})$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert (III.29), nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$T_i = T_r \quad (\text{III. 30})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p}{p} \quad (\text{III. 31})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_p} p} = \frac{1}{1 + \tau_{BF} p} \quad (\text{III. 32})$$

τ_{BF} est le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 10 ms [1], ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie éolienne où les variations du vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes. On a donc :

$$K_p = \frac{1}{\tau_{BF}} \quad (\text{III. 33})$$

III.2.5.4. Simulation numérique de la commande de la puissance active et réactive de la MADA

La simulation est faite avec les paramètres réels (voir annexe). On a choisit lors de la simulation d'alimenter le rotor par un onduleur de tension à deux niveaux alimenté par une source de tension continue supposée parfaite. Cet onduleur est commandé par la technique MLI triangulo-sinusoidale dont la porteuse est symétrique bipolaire avec une fréquence $f_p=5$ KHz et une valeur crête $A_p=100$.

On implique une structure de commande indirecte (figure III.24).

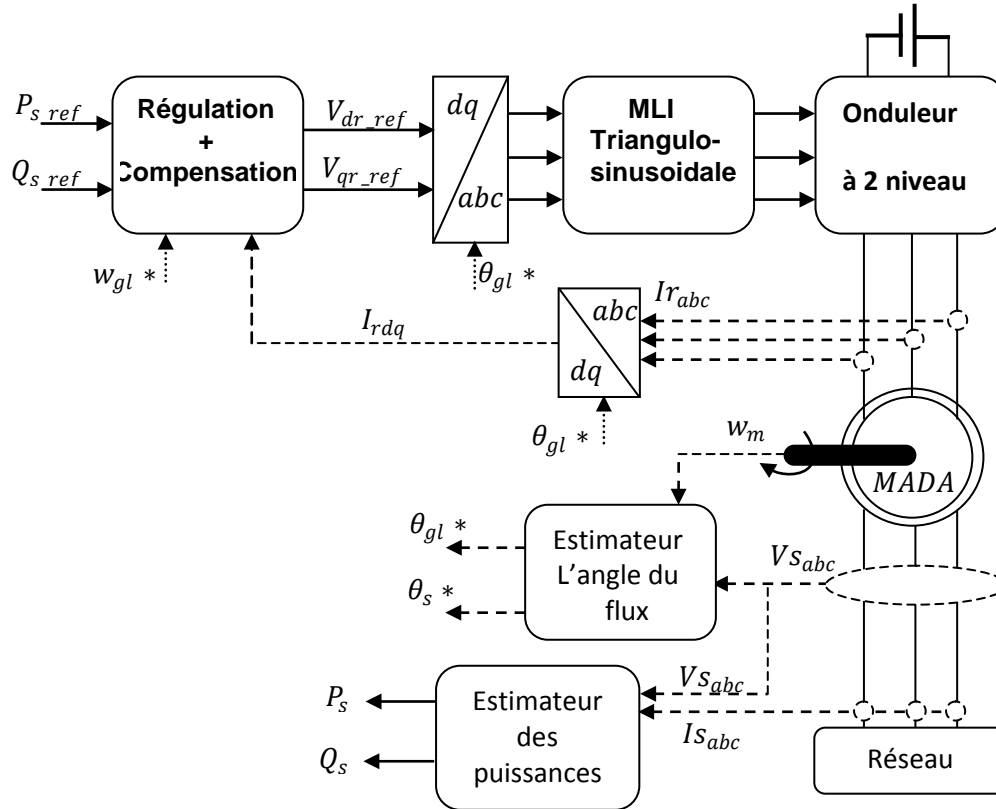


Figure III.24 Schéma global d'un système de régulation des puissances de la MADA

Pour toutes les structures, on a appliqué les échelons des puissances suivants:

P_{s_ref} passe à l'instant $t=0.5$ s de -1500 W à $+1500$ W

Q_{s_ref} passe à l'instant $t=0.8$ s de -500 VAR à $+500$ VAR.

La vitesse soit constante et égale à la vitesse nominale de la machine, à savoir 1410 tr/mn puis elle passe à 1000 tr/mn à l'instant $t=0.4$ s.

Les résultats obtenus sont montrés ; (figure III.25):

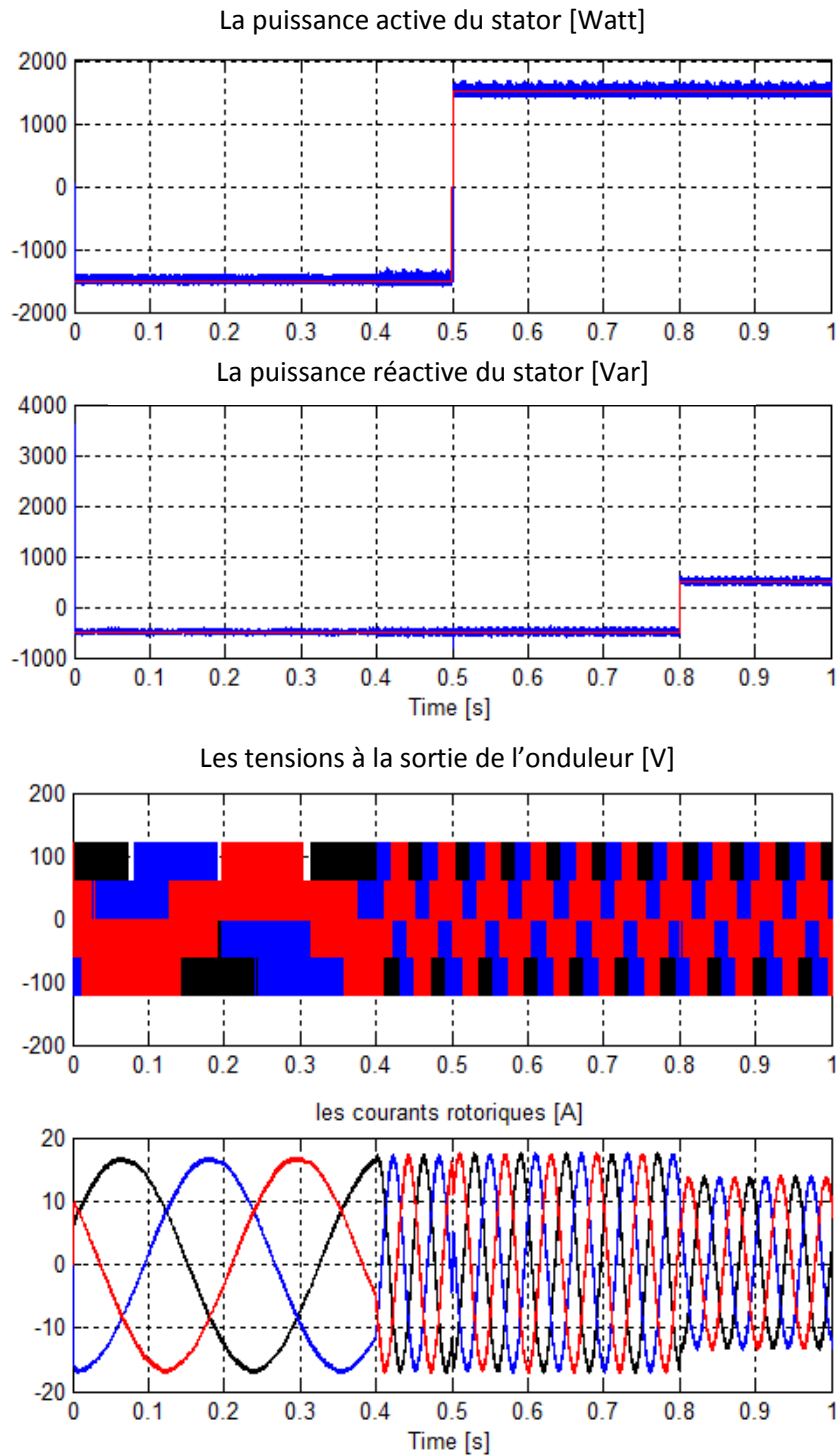


Figure III.25 Les courbes des puissances statoriques et la tension, le courant rotoriques

Interprétation le résultat :

On remarque que la puissance active et réactive suivent les consignes. les régulateurs PI sont alors bien dimensionnés.

On remarque aussi un découplage entre la commande des deux puissances active et réactive grâce à la compensation du terme de couplage introduit dans le système de régulation.

Le système de régulation adapte la variation de la vitesse.

III.2.6. La commande de la tension statorique de la MADA (Mode isolé)

Dans le mode de la régulation précédente on s'intéresse par la régulation indépendante des puissances active et réactive, ce mode s'utilise dans le cas où l'éolienne est connectée au réseau car le réseau se charge de donner l'amplitude et la fréquence de la tension statorique, alors on contrôle la puissance statorique pour extraire la puissance maximale délivrée par l'éolienne (le vent), et on contrôle la puissance réactive pour améliorer le facteur de puissance qui va au réseau. [9] [21]

Dans le cas de la charge isolée, le stator est connecté directement à la charge, alors il faut réguler la tension et la fréquence statorique suivant le besoin de la charge.

Comme le cas précédent on applique la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la MADA. Puis, elle consiste, à partir de ce modèle, à des boucles internes de régulation des flux rotoriques direct et en quadrature, et une boucle externe de régulation de la tension statorique. [14] [21]

III.2.6.1. Equation liant les tensions rotoriques avec les flux rotorique

Pour pouvoir faire la régulation des flux rotoriques on doit exprimer ces derniers en fonction des tensions rotoriques. A partir du système d'équations des flux rotoriques (III.14) on peut écrire : [21]

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M}{L_r} I_{ds} \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M}{L_r} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 34})$$

En remplaçant (III.34) dans le système d'équations des tensions rotoriques (III.13) on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \left(\frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M}{L_r} I_{ds} \right) + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (w_s - w) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \left(\frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M}{L_r} I_{qs} \right) + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (w_s - w) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 35})$$

Ou encore, avec $T_s = \frac{L_r}{R_r}$ (constante de temps électrique du circuit rotorique)

Ce qui donne ;

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \varphi_{dr} + V_{dr} + E_d \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \varphi_{qr} + V_{qr} + E_q \end{cases} \quad (\text{III. 36})$$

Avec :

$$\begin{cases} E_d = \frac{M}{T_r} I_{ds} + (w_s - w) \varphi_{qr} \\ E_q = \frac{M}{T_r} I_{qs} + (w_s - w) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 37})$$

III.2.6.2. Equation liant les flux rotoriques avec les tensions statoriques

En cas de la MADA branchée sur une charge autonome, la tension statorique est un vecteur en sortie. On essaiera donc d'exprimer cette dernière en fonction des flux rotoriques. En tirant les courants rotoriques à partir de l'équation du flux rotoriques (III.14) et on les remplace dans le système d'équations du flux statoriques (III.14) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M \left(\frac{\varphi_{dr}}{L_r} - \frac{M}{L_r} I_{ds} \right) \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M \left(\frac{\varphi_{qr}}{L_r} - \frac{M}{L_r} I_{qs} \right) \end{cases} \quad (\text{III. 38})$$

En introduisant le coefficient de dispersion $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} + \sigma L_s I_{ds} \\ \varphi_{qs} = \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} + \sigma L_s I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 39})$$

On rappelle que le système d'équations des tensions statoriques s'écrit, avec toujours l'hypothèse d'un flux statorique constant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - w_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} - w_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

En remplaçant dans ce système les flux statoriques par leurs expressions données en (III.39) on aura :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - w_s \left(\frac{M}{L_r} \varphi_{qr} + \sigma L_s I_{qs} \right) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} - w_s \left(\frac{M}{L_r} \varphi_{dr} + \sigma L_s I_{ds} \right) \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Ou encore :

$$\begin{cases} V_{ds} = -w_s \frac{M}{L_r} (\varphi_{qr} + A_d) \\ V_{qs} = w_s \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} + A_q) \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

Avec :

$$\begin{cases} A_d = \frac{M}{L_r} \left(-\frac{R_s}{w_s} I_{ds} + \sigma L_s I_{qs} \right) \\ A_q = \frac{M}{L_r} \left(\frac{R_s}{w_s} I_{qs} + \sigma L_s I_{ds} \right) \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

Les deux systèmes d'équations (III.36) et (III.42) donnent le modèle interne globale de la MADA pour le quel les tensions statoriques sont des vecteurs en sortie (Figure III.26)

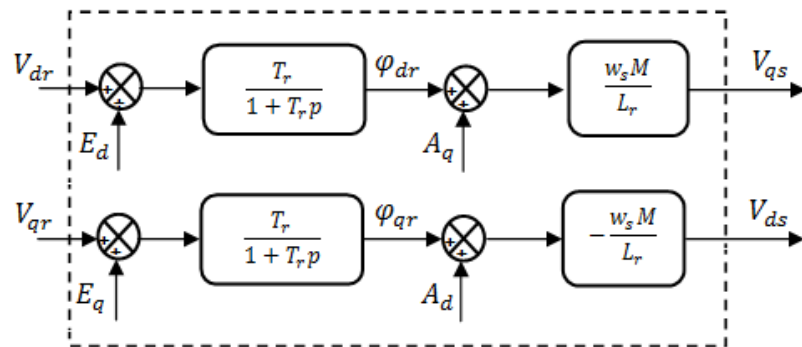


Figure III.26 Le modèle simplifié de la MADA qui relie les tensions statoriques à les tensions rotoriques

III.2.6.3. Constatation le modèle

En analysant le modèle de la MADA développé ci-dessus (figure III.26) on constate que les flux rotoriques φ_{dr} et φ_{qr} sont liés respectivement aux tensions rotoriques V_{dr} et V_{qr} par des fonctions de transfert de 1^{er} ordre dont la constante de temps est celle du circuit rotorique T_r et avec E_d et E_q comme f.m.m dépendant de la vitesse de rotation et représentant les termes de couplage entre les deux axes.

Entre les flux rotoriques et les tensions statoriques il y a un simple gain. A_d et A_q sont fonction des courants statoriques I_{ds} et I_{qs} représentant la perturbation due à la charge.

III.2.6.4. Structure de la commande

Le but de la commande c'est maintenir la tension efficace du stator constante même si en variant la vitesse de la MADA ou la variation de la charge pour obtenir ce but, on commande les flux rotoriques indépendamment par deux régulateurs PI, les consignes des flux sont déduits à partir de la tension et le courant statorique (figure III.27).

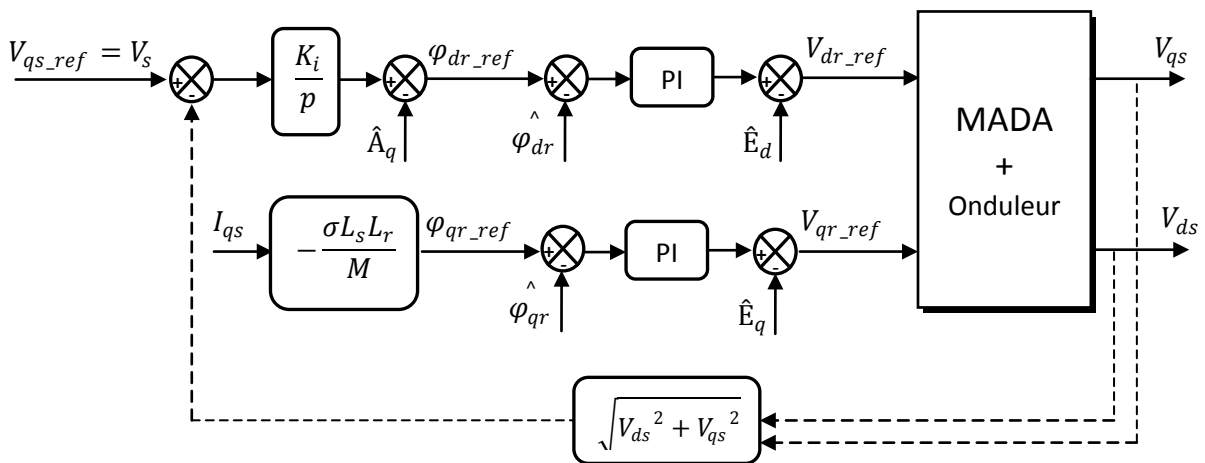


Figure III.27 Le schéma de la régulation de la tension statorique de la MADA.

III.2.6.5. Méthodologie de synthèse des régulateurs PI:

Les régulateurs des flux rotoriques sont synthétisés de la même manière que pour ceux des puissances dans le cas connecté au réseau (§ III.2.5) ; c.à.d. en compensant la constante de temps du système, qui est dans ce cas la constante

électrique du circuit rotorique T_r , et en imposant une constante de temps en boucle fermée de l'ordre de $\frac{T_r}{20} \approx 3ms$. Tandis que le coefficient d'intégration K , de l'intégrateur utilisé pour la régulation de la tension statorique est déterminé d'une façon que le système en boucle fermée se représentera par une fonction de transfert de 2^{ème} ordre avec un coefficient d'amortissement optimal $\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

III.2.6.6. Simulation numérique

On impose une valeur efficace de la tension statorique simple de 220 volts et une fréquence de 50Hz. La MADA démarre à vide (sans charge) puis à l'instant $t=0.4s$ on lui associe une charge triphasée purement résistive de 1KW c.à.d, avec $V_{seff}=220$ volt, une résistance $R=145.2 \Omega$ par phase au même temps on applique une vitesse variable (figure III.25).

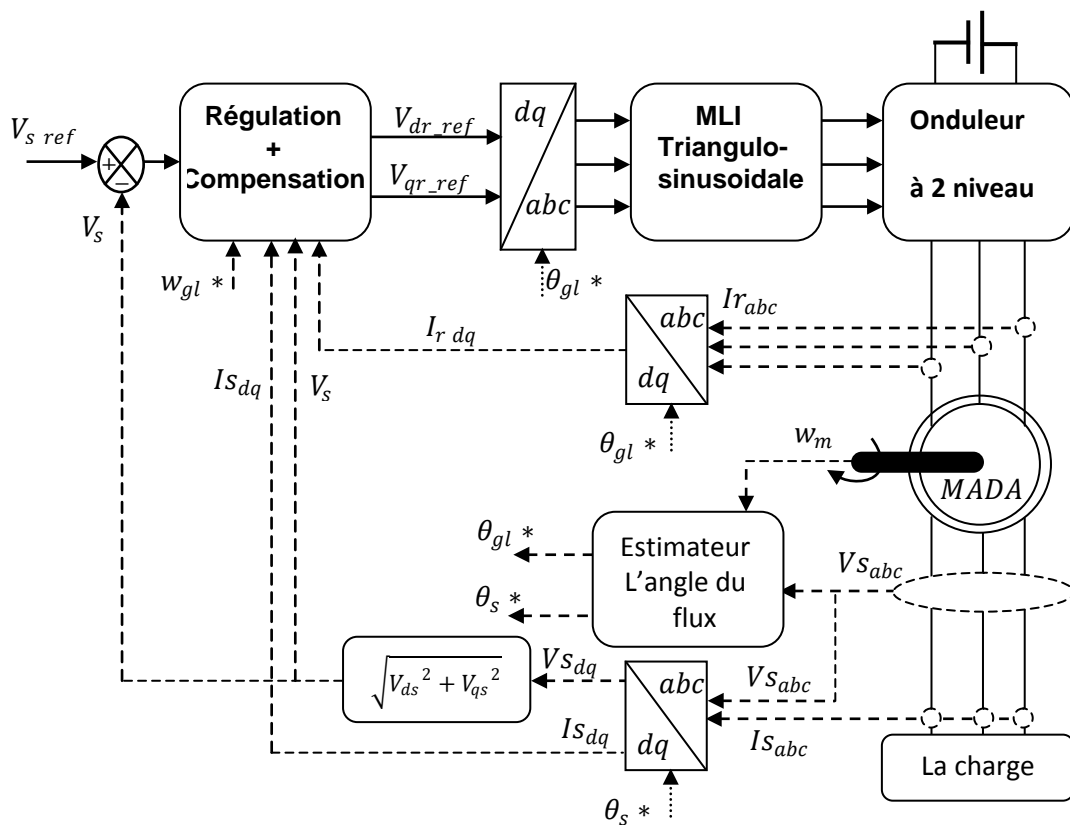
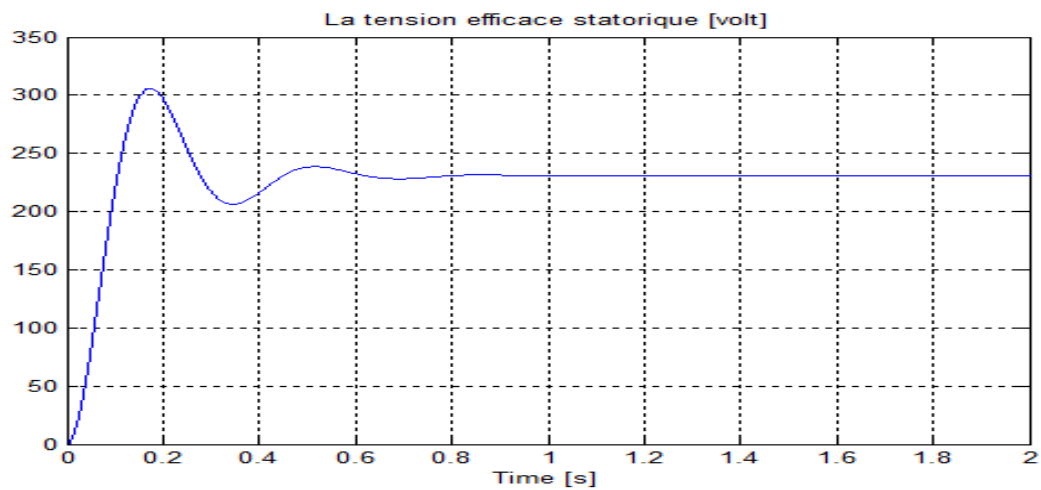
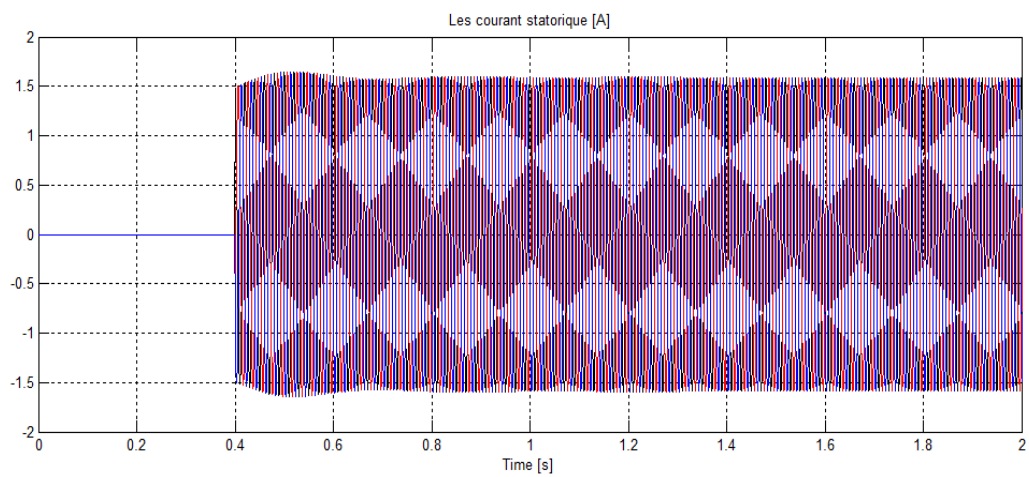
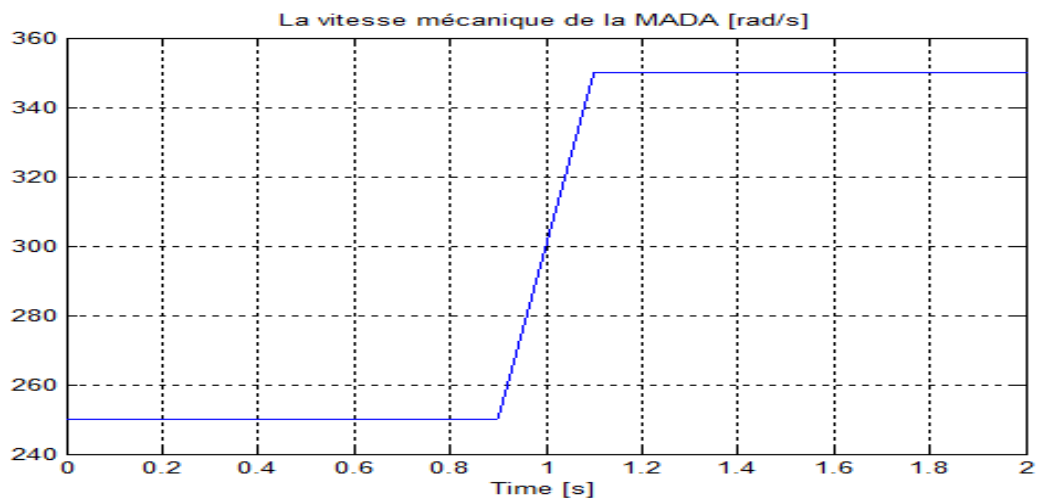


Figure III.28 Le Schéma globale d'un système de régulation de la tension statorique de la MADA.

Les résultats obtenus sont montrés ; (figureIII.28):



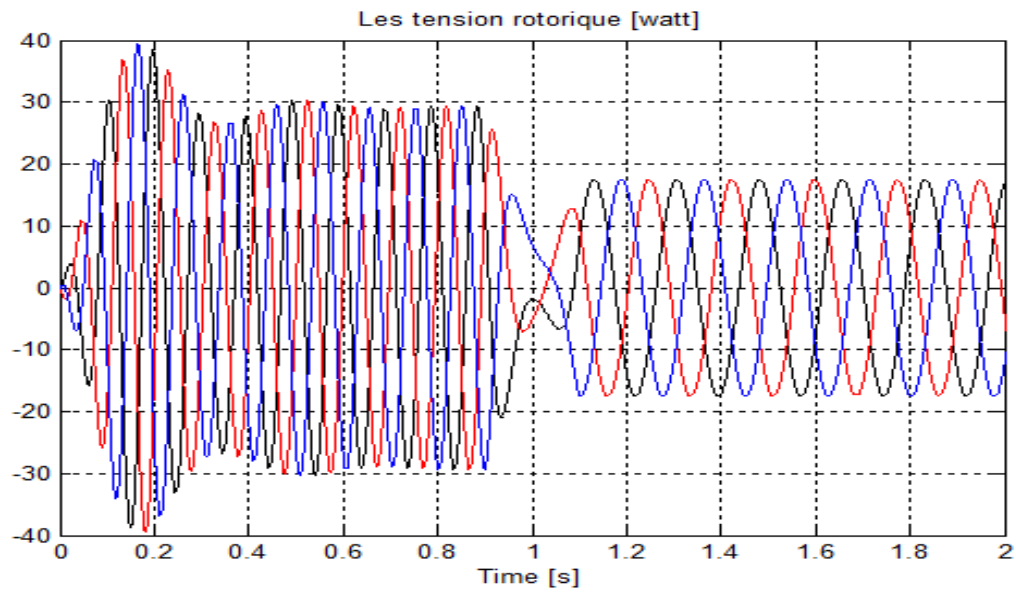


Figure III.29 Les courbes des tensions, courants statoriques et rotoriques

Interprétation :

On remarque que la tension efficace statorique est fixe malgré la variation du vitesse de la machine et la variation de la charge.

III.3. Conclusion

On a vu dans ce chapitre les différents modèles du système éolien, leurs parties et les différentes stratégies de la commande pour extraire le maximum d'énergie du vent.

Donc on conclut que la machine asynchrone double alimentation à rotor bobiné est la meilleure machine pour l'utilisation éolienne car elle possède la robustesse de la machine asynchrone simple et elle travaille sur une grande plage de vitesse grâce à sa commande facile par le stator et/ou par le rotor, ce dernier n'est en besoin qu'un convertisseur électrique moins coûteux et moins volumineux.

Finalement on a expérimenté la commande de la MADA d'éolienne dans les deux cas ;

- Au cas l'éolienne est connectée au réseau, dans ce cas on régule les puissances active et réactive fournies au réseau.
- Au cas de la charge isolée on régule la tension et la fréquence du stator qui va alimenter cette charge.

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources comme photovoltaïque, éolien qui sont combinés avec un générateur diesel pour assurer la continuité de la puissance en cas de charge isolée ou ils connectée au réseau.

En générale, le système hybride ou système multi-source se décompose en trois partie :

1^{ère} partie : les sources d'énergie (renouvelable/classique « générateur diesel »)

2^{ème} partie : les bus qui assurent la connexion entre les sources d'un côté et les charges et unités de stockage de l'autre côté

3^{ème} partie : les charges ou le réseau et les unités de stockage.

IV.1. Le stockage dans un système hybride :

IV.1.1. Les batteries

Le mode de stockage d'énergie électrique privilégié actuellement dans notre vie courante reste l'accumulateur. Qu'il s'agisse de téléphones portables ou de voitures, les batteries sont très largement répandues. La technologie est basée sur le concept chimique de pile : on accumule de l'énergie chimique. Fondamentalement, l'élément de base d'une batterie est composé de deux électrodes, jouant les rôles d'anode et cathode, ainsi que d'un électrolyte, en contact avec les électrodes, permettant la circulation des ions, et donc la création d'un courant.

Parmi les nombreuses filières actuellement développées :

Les batteries au plomb, utilisées couramment pour alimenter des installations ne pouvant supporter des coupures d'alimentation électrique (installation photovoltaïques ou hybrides des sites isolées);

Les batteries au nickel-cadmium, largement utilisées sur tous les véhicules électriques.

Cependant, le principal défaut de cette filière réside dans l'utilisation de Cadmium, métal lourd ! Il n'existe pas, malgré tout, de restrictions au niveau européen, compte tenu de la pression exercée par les industriels.

outes les filières dérivées des batteries au lithium : lithium-ion, lithiumpolymères, lithiummétal- polymères...

Le problème lié au développement de ces filières lithium n'est pas d'ordre technologique

mais plutôt géopolitique puisque les ressources de lithium sont réparties entre 3 pays seulement (Chili, Australie et USA).

IV.2. La pile à combustible

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est le même que celui d'une pile traditionnelle, En effet, quand l'intérêt pour la pile à combustible s'est réveillé vers la fin des années 1980, les développements ont porté bien davantage sur la pile que sur le combustible. Aujourd'hui, du fait des progrès technologiques obtenus sur la pile, force est de constater qu'un déséquilibre inverse est apparu et que l'on est moins avancé sur le combustible que sur la pile.[13]

IV.2.1. Par voie électrostatique

Le principe de base d'un supercondensateur est le suivant : un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) est placé entre deux électrodes conductrices à très grande surface spécifique, c'est-à-dire à très grande surface de contact entre l'électrode et l'électrolyte. En général, les matériaux utilisés pour les électrodes sont des grains de carbone (charbon activé, fibres de carbone, aérogels de carbone...) ou des polymères conducteurs qui ont des surfaces spécifiques pouvant atteindre plusieurs milliers de m² par gramme de matière. Lorsqu'on applique un champ

électrique entre les électrodes, des ions positifs et négatifs se déplacent dans l'électrolyte et forment à la surface de chaque électrode une couche de charges électriques, appelée double couche (voir figures 3 et 4). Comme cette surface est très

grande, la quantité de charges accumulées est bien plus importante que dans le cas de condensateurs classiques. L'énergie volumique stockée est d'ailleurs comprise entre 1 et 10 kWh/m³ contre 0,1 à 1 kWh/m³ pour les condensateurs ou hypercondensateurs. Comme il n'y a pas de réaction chimique à la surface des électrodes, la longévité (ou cyclabilité) est beaucoup plus élevée ici (100 000 à 500 000 cycles de charge/décharge) que pour la voie électrochimique étudiée précédemment (300 à 1500 cycles).

Cependant, pour obtenir des systèmes exploitables, il faut mettre en série un grand nombre de cellules pour aboutir à une tension de stockage élevée.

IV.2.2. Par voie électromagnétique

Un des supports de la filière de stockage électromagnétique est la bobine supraconductrice. Le principe de fonctionnement est assez simple : un courant parcourant un bobinage engendre un champ magnétique, auquel est associée une énergie magnétique, fonction de l'inductance de la bobine et du volume magnétisé. La particularité de cette bobine est qu'elle a une résistance nulle audessous d'une certaine température critique, caractéristique du matériau. En conséquence, si le bobinage est fermé, le courant se maintient et il n'y a pas de dissipation d'énergie par effet Joule :

Celle-ci reste stockée sous forme magnétique.

Il existe deux catégories de supraconducteurs :

basse température : cette technique met en jeu des conducteurs fonctionnant à 4K, en présence d'un champ magnétique de 5T ;

haute température : celle-ci a connu un développement très récent. Les matériaux mis en jeu sont utilisables sous 10T, à des températures variant de 20 à 30K.

IV.2.3. Par voie mécanique

IV.2.3.1. Le stockage sous forme d'énergie gravitaire

Ce type de stockage existe principalement à l'heure actuelle sous la forme de Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Ces stations permettent de pomper et de turbiner de façon cyclique la même eau entre un bassin supérieur et un bassin inférieur. En général, on pompe en utilisant l'électricité bon marché des heures creuses (comme par exemple la nuit en été), et on turbine pour produire de l'électricité d'une valeur plus élevée aux heures de pointe.

IV.2.3.2. Le stockage sous forme de pression

Dans ces installations, l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des nappes aquifères, des cavernes ou des cavités salines souterraines, le poids des terrains au dessus permettant de résister à la pression de l'air. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel ou de fioul, puis détendu dans une turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée.

IV.2.3.3. Le volant d'inertie

Les volants d'inertie ont été employés historiquement dans les transports en commun. Leur principe de fonctionnement est le suivant : un disque ou un cylindre tournant est accéléré par un moteur/générateur électrique, lorsque l'on désire stocker de l'énergie électrique et freiné par ce même moteur/générateur (fonctionnant dans ce cas en générateur), lorsque l'on désire récupérer l'énergie stockée. Les frottements devant être limités le plus possible, le volant est placé dans une enceinte sous vide et sur des paliers à suspension magnétique. La durée de vie du système est quasi illimitée (>10 000 cycles). L'absence de lubrifiant permet aussi de travailler dans des gammes de températures et de pression assez larges.

IV.3. Les différentes topologies du système hybride pour une charge isolée:

IV.3.1. Architecture à bus AC [5]

Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs excepté le Générateur Diesel qui peut fixer la fréquence du bus (figureIV.1).

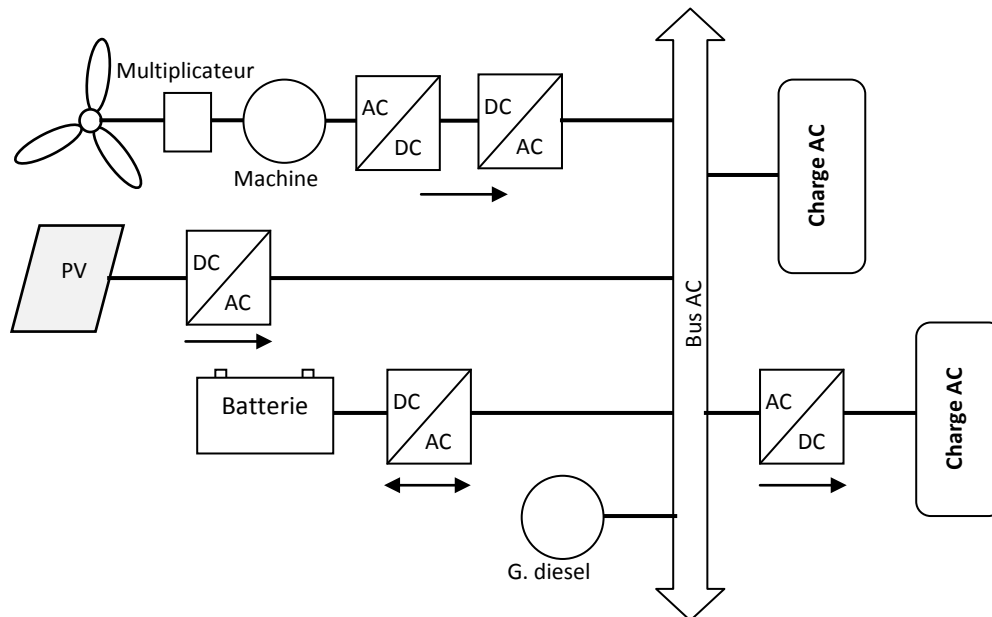


Figure IV.1 ; la structure à bus AC d'un système hybride (charge isolée)

IV.3.1.1. Avantage :

- Un découplage des différents sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres.
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence du bus.

IV.3.1.2. Inconvénients

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

- Les charges continues pouvaient être connectées directement sur les sources continues ou en utilisant un redresseur

IV.3.2. Architecture à bus DC [5]

IV.3.2.1. Avantages:

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

IV.3.2.2. Inconvénients

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

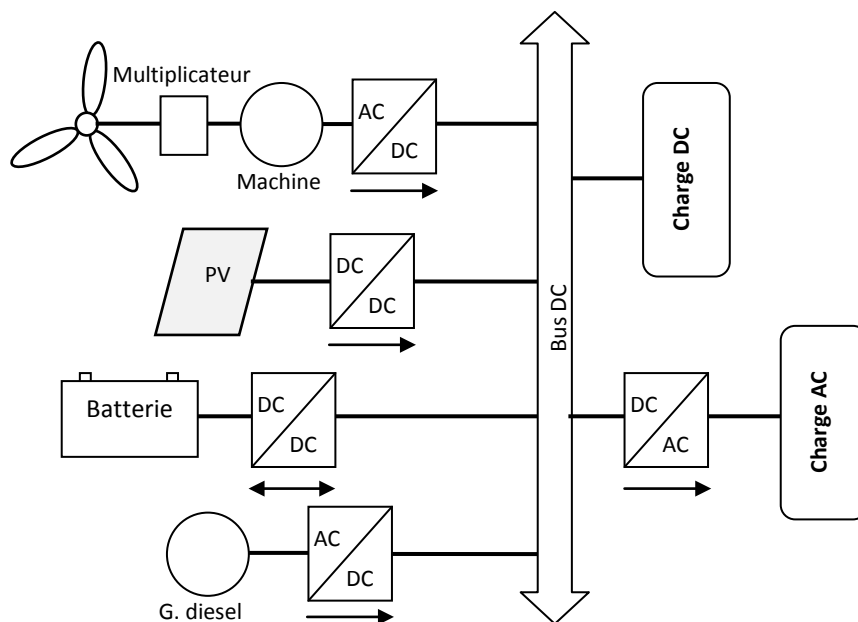


Figure IV.2 ; la structure à bus DC d'un système hybride (charge isolée)

IV.3.3. Architecture mixte : DC-AC [5]

Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de charge à AC directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du groupe diesel et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant les tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion continue-alternative (fonctionnement onduleur). (figureIV.3)

IV.3.3.1. Avantages:

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

IV.3.3.2. Inconvénients.

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

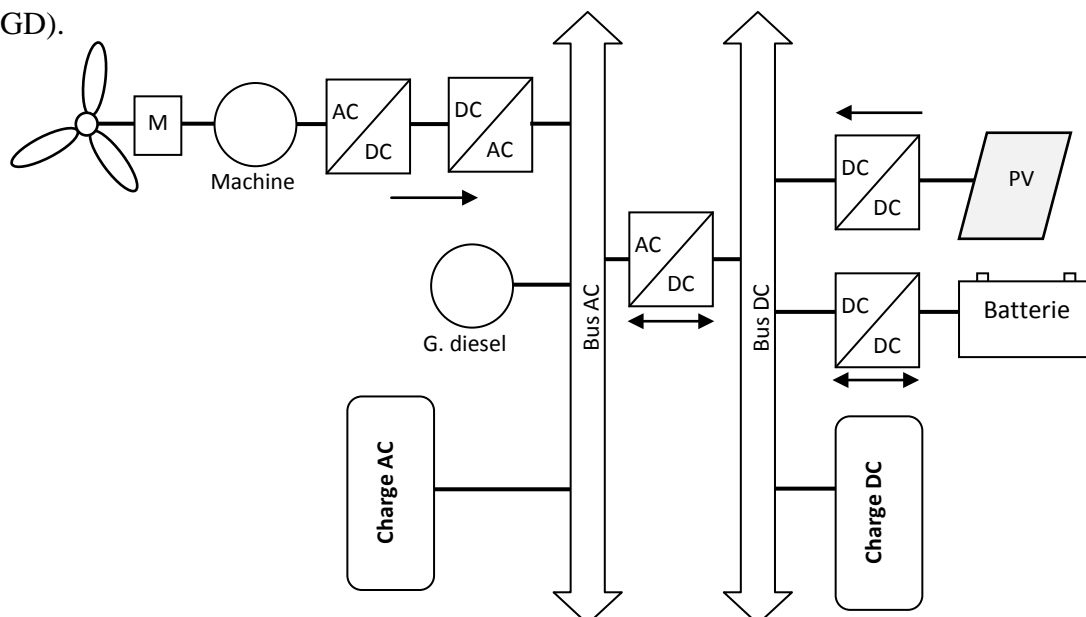


Figure IV.3 : la structure à bus mixte d'un système hybride (charge isolée)

IV.3.4. La stratégie de commande et le MPPT du système hybride :

Dans les deux chapitres précédents nous avons vu comment assurer le MPPT de chaque système indépendamment ;

Dans le système photovoltaïque, on cherche le point optimal (la tension optimale) par l'agitation sur le convertisseur DC/DC, et dans le système éolien on cherche la vitesse optimale de la MADA pour fournir la puissance maximale par l'agitation sur le convertisseur rotorique AC/DC.

Dans ce chapitre on cherche le MPPT du système hybride (PV+éolien) dans les deux cas ;

Si le système est connecté au réseau ou une charge isolée.

IV.3.4.1. Le MPPT dans le système connecté au réseau :

Le but de système hybride connecté au réseau c'est de fournir la puissance maximale dans tous les cas selon les conditions d'environnement, et le rôle de stockage c'est le lissage de cette puissance.(figure IV.4)

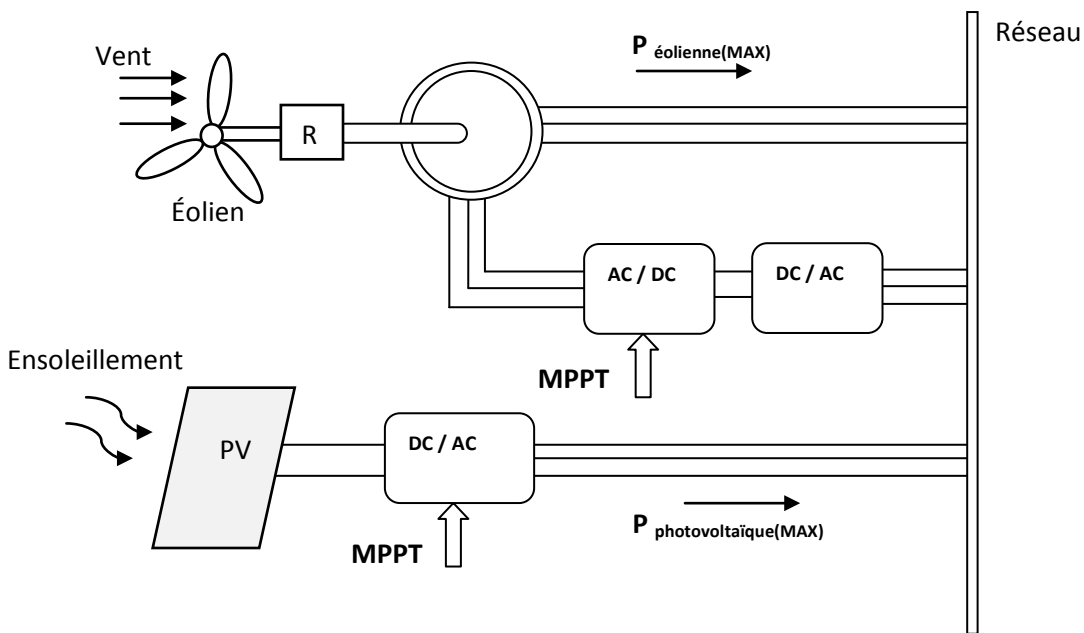


Figure IV.4 ; la stratégie de commande d'un système hybride connecté au réseau

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{éolienne(MAX)}} + P_{\text{photovoltaïque(MAX)}}$$

Avec : P_{tot} (la puissance totale qui va fournir au réseau)

IV.3.4.2. Système connecté à une charge isolée

Le but de ce système c'est de fournir la puissance qui besoins par la charge suivant les variations de la charge et les conditions d'environnement et la puissance surplus est stockée dans les unités de stockage (batteries).

IV.4. Le système hybride à étudier

Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne sont reliées en parallèle au bus DC à travers des convertisseurs statiques (figure IV.5)

Le stockage se fait par des batteries électrochimiques

La charge est une charge continue (Résistance) reliée au bus DC à travers convertisseur DC/DC.

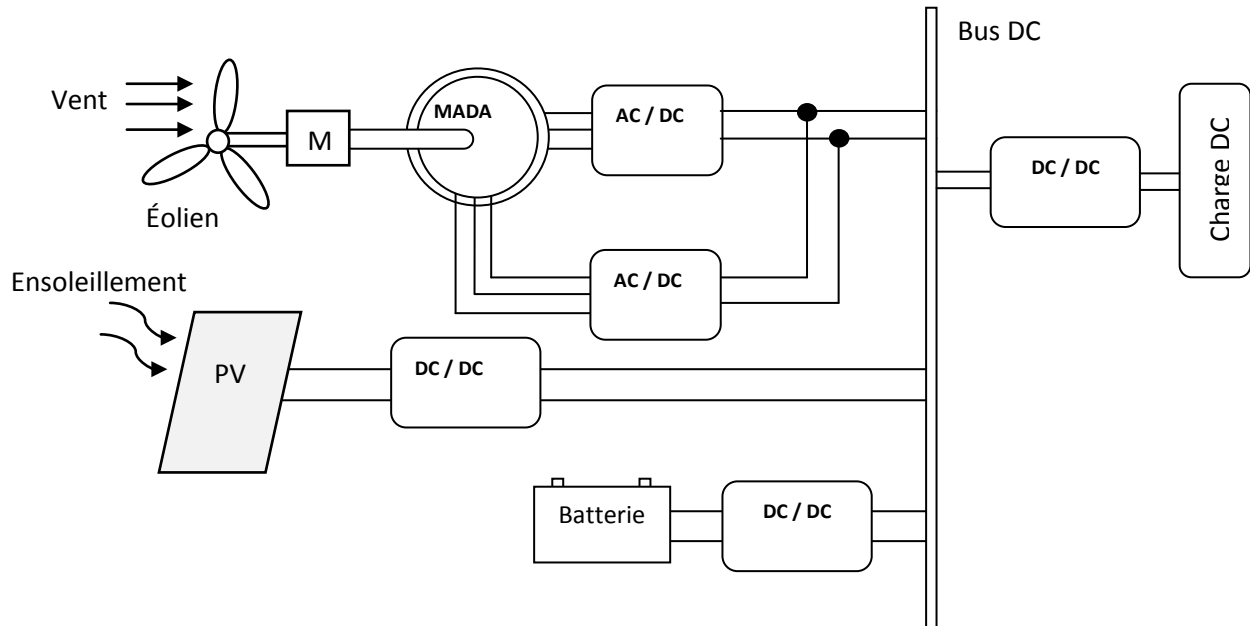


Figure IV.5 ; système hybride à bus DC avec une charge résistive (continue)

IV.4.1. La simulation du système avec une application du MPPT

Dans notre simulation on fait une hybridation entre les deux sources d'énergie avec une charge résistive variable et les batteries pour le stockage (figure IV.7). Le système se compose de ;

IV.4.1.1. Les sources d'énergie :

- Ensemble des panneaux photovoltaïques reliés en série et en parallèle qui possèdent les caractères suivants :

$V_{co}=305V$ ($T=25^{\circ}c$)

$I_{cc}=3.26 A$ ($E=1000W/m^2$)

P_{max} ($E=1000W/m^2$; $T=25^{\circ}c$)= $760W$

- Un générateur éolien utilisant une machine MADA de puissance= $1500W$

IV.4.1.2. Le stockage

Pour le stockage, on utilise un Bank de batterie.

IV.4.1.3. Les convertisseurs statiques

On utilise les convertisseurs statiques suivants :

- Le convertisseur statique DC/DC (buck-boost) entre le générateur photovoltaïque et le bus continu son rôle est réalisé le MPPT du PV
- Le convertisseur statique AC/DC (redresseur) entre le stator de la MADA et le bus continu, il assure l'écoulement d'énergie dans un seul sens (de la MADA vers le bus continu)
- Le convertisseur statique AC/DC (redresseur MLI) entre le rotor et le bus continu pour commander la MADA en puissance.
- Le convertisseur DC/DC (buck-boost réversible en courant) pour contrôler la charge et la décharge des les batteries et maintenir la tension du bus continu constante.
- Le convertisseur DC/DC (buck-boost) entre le bus continu et la charge résistive pour contrôler l'écoulement d'énergie vers la charge et maintenir la tension à la borne de la charge fixe.

IV.4.1.4. Le bus continu

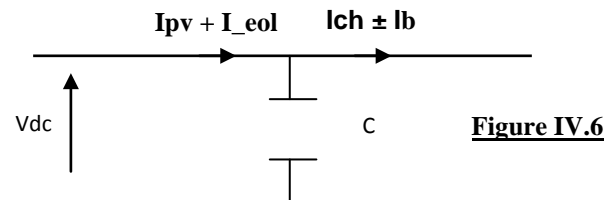
Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et la charge, en modélisant le bus continu comme une capacité, et chaque convertisseur statique qui sont reliés avec lui exerce une influence par le courant (figure IV.6)

I_{pv} = le courant de G. photovoltaïque

I_{eol} = le courant de G. éolien = P_{eol} / V_{dc}

I_b = le courant de charge/décharge de la batterie

I_{ch} = le courant de la charge R.



Il est important de fixer la tension du bus continu V_{dc} pour assurer le fonctionnement correcte des organes qui sont attachés à lui, pour maintenir $V_{dc} = cte$ on régule le courant I_b (courant de charge et décharge) de la batterie par le convertisseur DC/DC entre le bus et la batterie.

IV.4.1.5. La charge

La charge est une résistance (une charge continue), elle consomme une puissance $P_c = V_c \cdot I_c$;

La charge est reliée au bus continu par un convertisseur DC/DC. Le rôle de ce convertisseur est d'assurer une tension fixe (tension nominale) à la borne celle-ci.

Le but de ce système est de fournir la puissance nécessaire demandée par la charge (charge isolée). Pour assurer ce fonctionnement, il faut ;

1. **Dimensionnement du système** ; il faut bien dimensionner le système pour donner l'énergie demandée par la charge isolée, alors il faut dimensionner le stockage (batteries) pour accepter l'énergie surplus dans les bonnes conditions et donner l'énergie manquante dans les conditions pires.

2. **Algorithme de commande** ; Choisir un algorithme pour gérer les flux d'énergie dans ce système suivant les conditions variables de l'environnement et la demande aussi variable de la charge.

- **Hypothèse ;**

Avant de faire cette simulation on suppose ;

Le système est bien dimensionné. La batterie peut accepter l'énergie en surplus.

Dans le démarrage du système, la batterie possède l'énergie nécessaire pour alimenter les circuits de commande des interrupteurs des convertisseurs statiques.

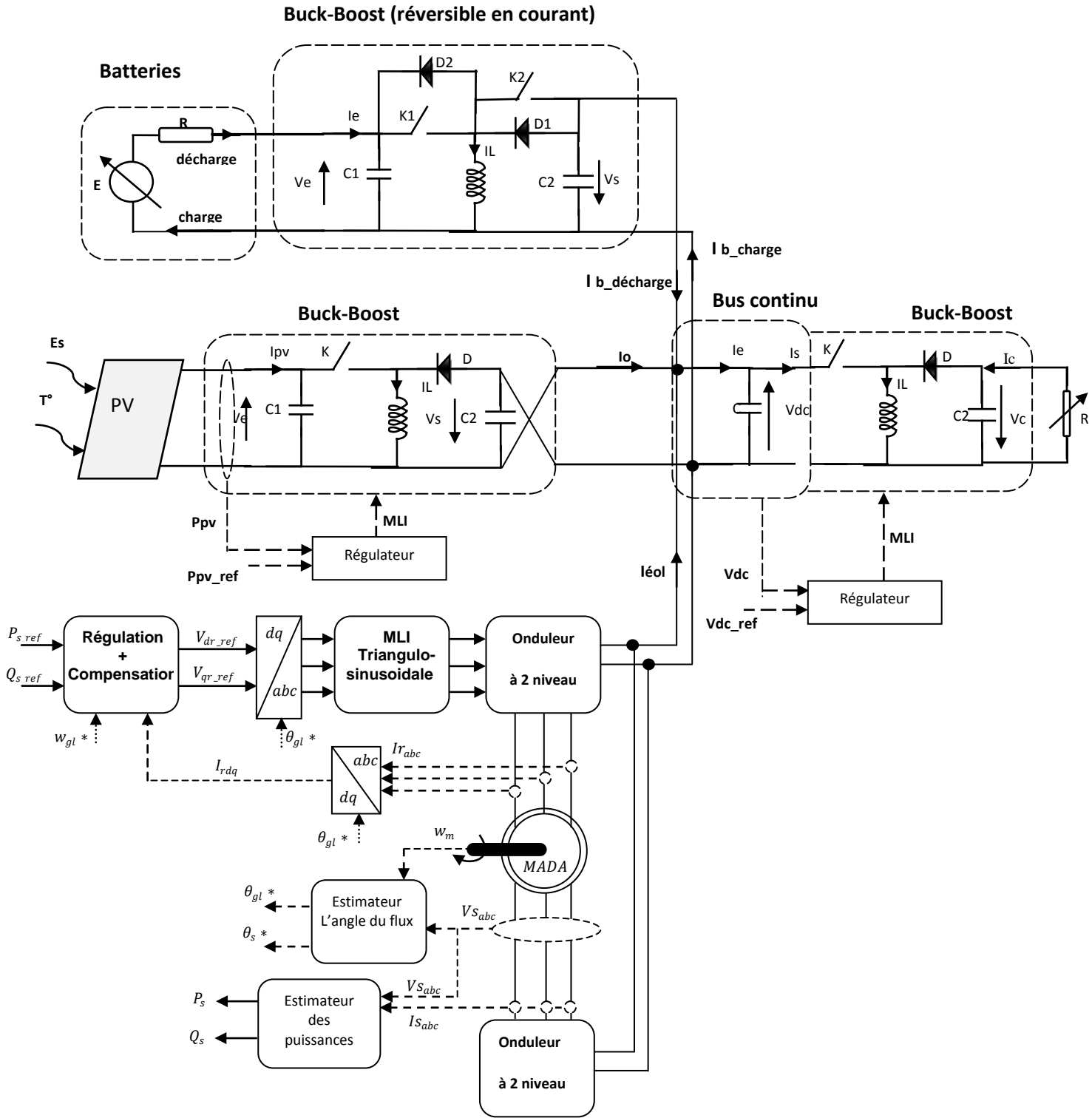


Figure IV.7 : schéma détaillé pour un système hybride à bus DC et charge résistive

IV.4.1.6. L'Algorithme du système hybride :

IV.4.1.6.1. Dans le 1^{er} cas : le chargement de la batterie :

Dans le cas où la batterie doit être chargée, il faut que la somme des puissances maximales de deux sources est plus grande que l'énergie demandée par la charge.

La stratégie de commande (figure IV.8) soit ;

- on charge la batterie par l'énergie du surplus

on a : $I_b * V_{dc} = (P_{eol_max} + P_{pv_max}) - V_c^2 / R$ avec ;

P_{eol} : la puissance d'éolien.

P_{pv} : la puissance du générateur photovoltaïque.

V_{dc} : la tension du bus continu.

V_{pv} : la tension du générateur photovoltaïque

V_c : la tension aux bornes de la charge $R=100$ ohm

La puissance de la charge de la batterie est :

Où I_b : le courant d'entrée du convertisseur DC/DC entre le bus et la charge.

- Si la batterie est chargée, il faut la déconnecter et minimiser la puissance de référence du générateur éolien à :

$$P_{eol} = P_{pv_max} - V_c^2 / R$$

Si $P_{pv_max} > V_c^2 / R$ alors $P_{pv_ref} = V_c^2 / R$.où P_{pv_ref} : la puissance de référence de générateur PV.

Dans le 2^{ème} cas : le déchargement de la batterie :

Dans le cas de ; $P_{eol_max} + P_{pv_max} < V_c^2 / R$ (la consommation est supérieure à la puissance fournie par les deux sources) avec la batterie est chargée, on la décharge par l'énergie :

$$I_b * V_{dc} = V_c^2 / R - (P_{eol_max} + P_{pv_max})$$

Si la batterie atteint la décharge approfondie, on débranche la charge, et on charge la batterie par l'énergie :

$$P_{eol_max} + P_{pv_max}$$

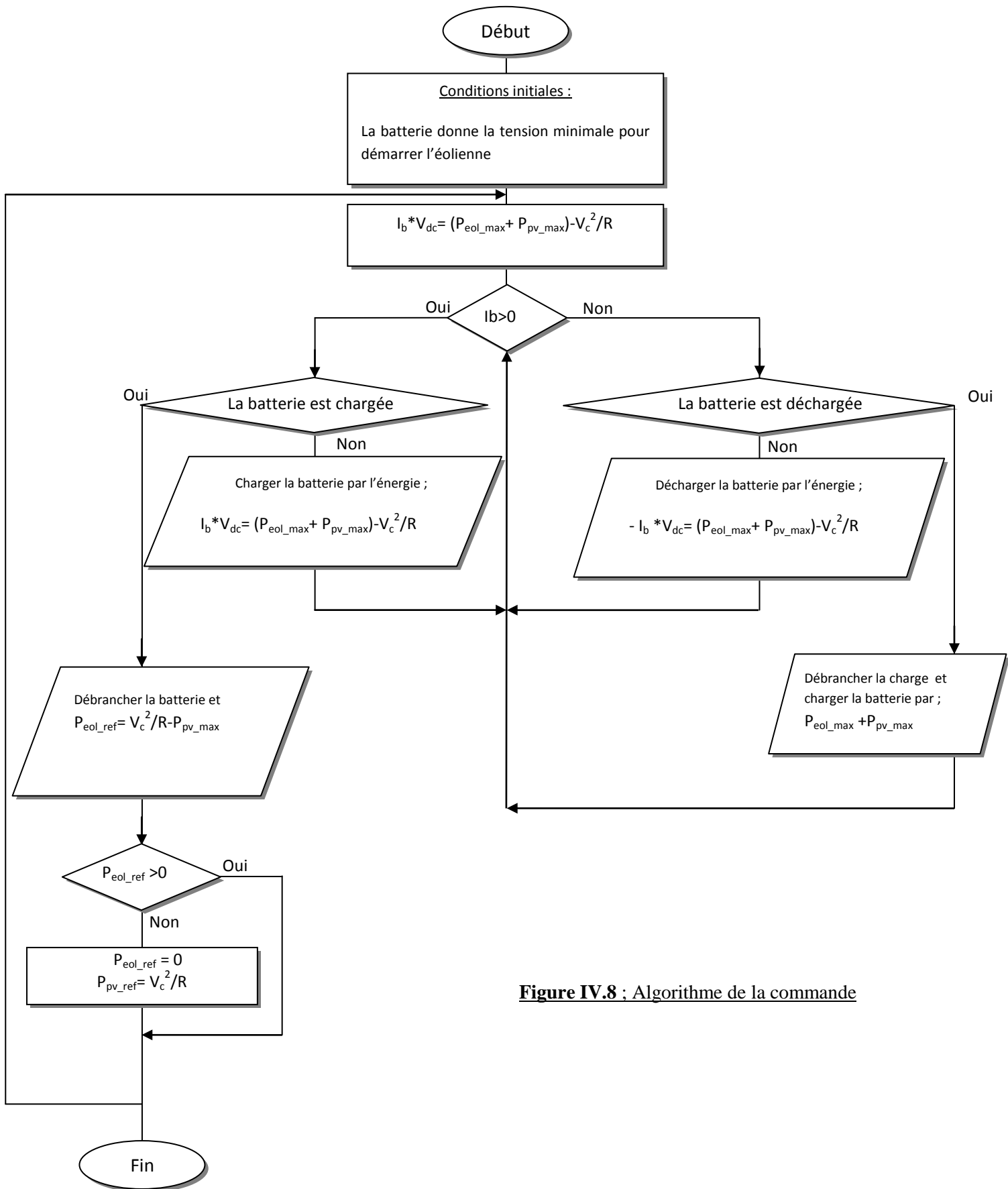


Figure IV.8 : Algorithme de la commande

IV.4.1.7. Simulation de régulation de la tension V_{dc} avec V_c , E et P_{eol} variables

Le but de cette simulation est de garder respectivement la tension de V_{dc} , V_c fixes à l'aide des deux convertisseurs DC/DC de la batterie et de la charge.

Les conditions initiales :

$$E=1000\text{W/m}^2$$

$P_{eol}=400\text{ W}$, il s'introduit à $t=2\text{s}$

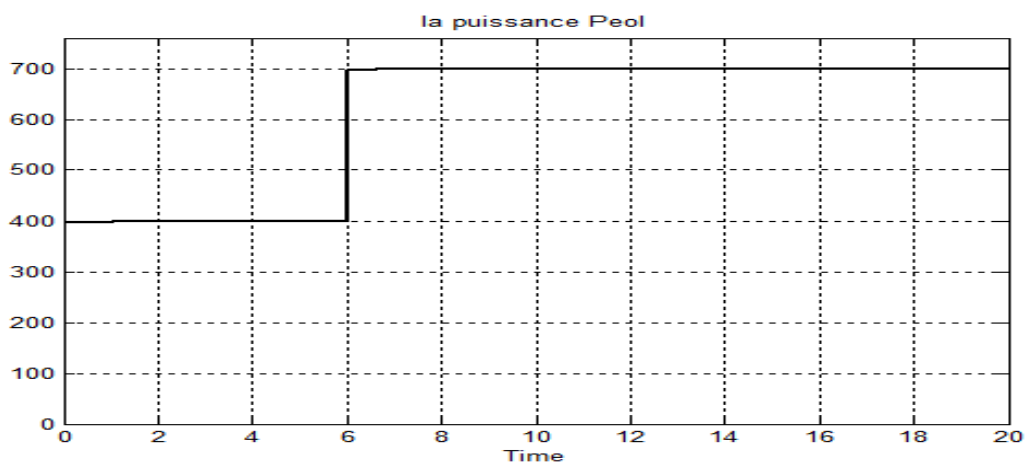
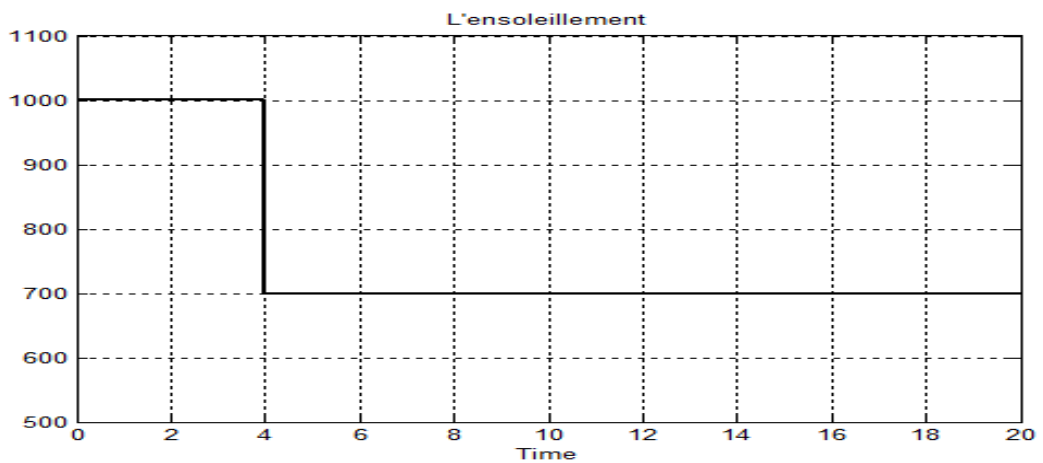
$$V_c=150\text{ v}$$

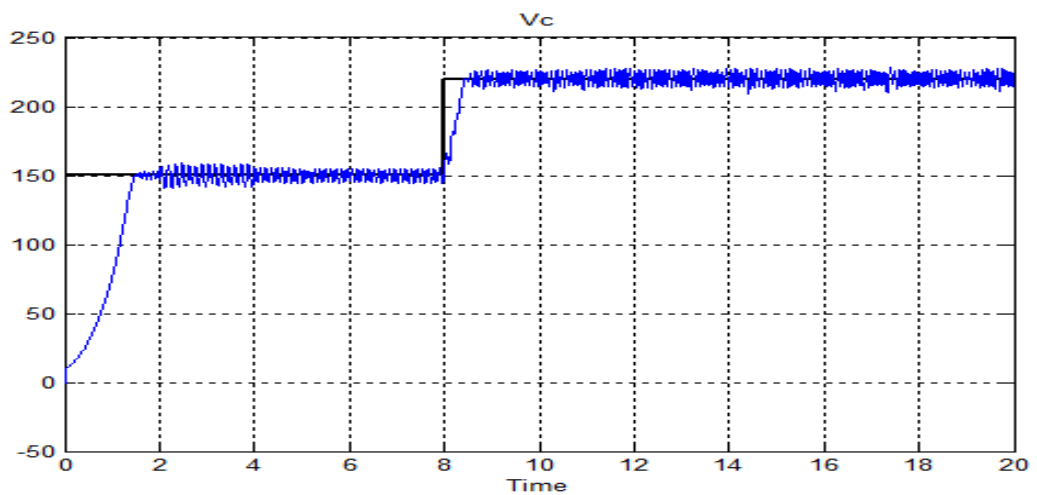
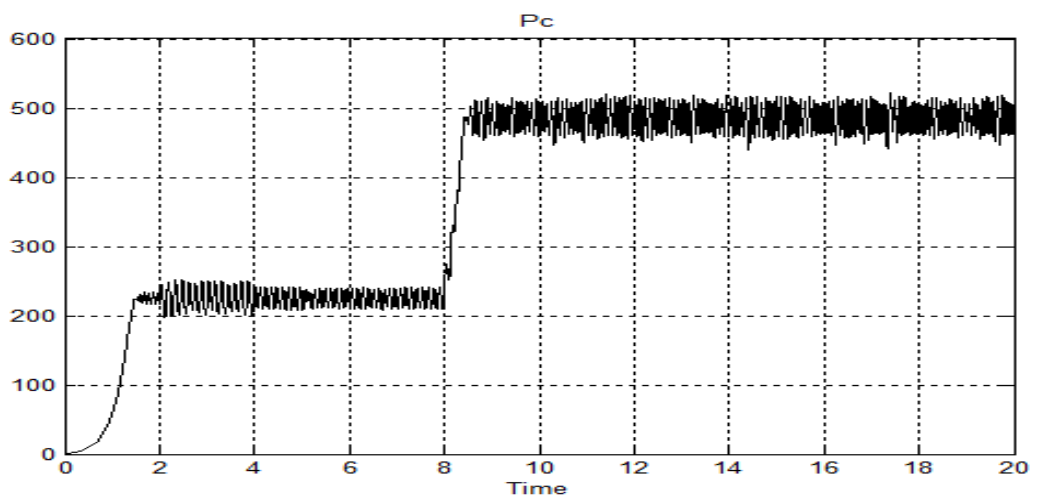
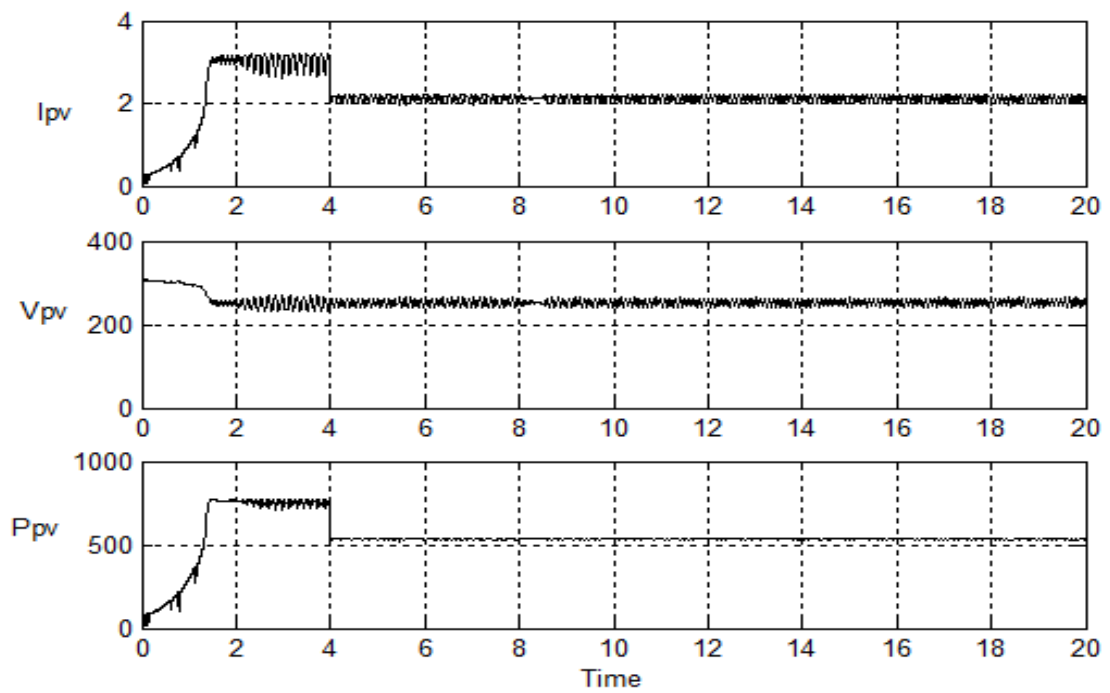
On a :

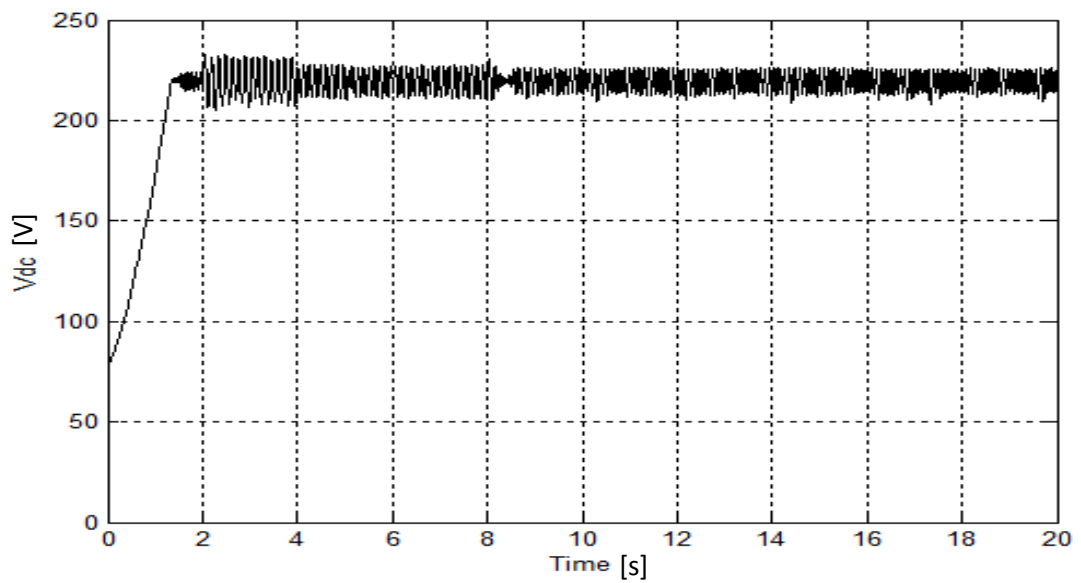
A $t=4\text{ s}$ on change à $E=700\text{ W/m}^2$

A $t=6\text{ s}$ on change à $P_{eol}=700\text{ W}$

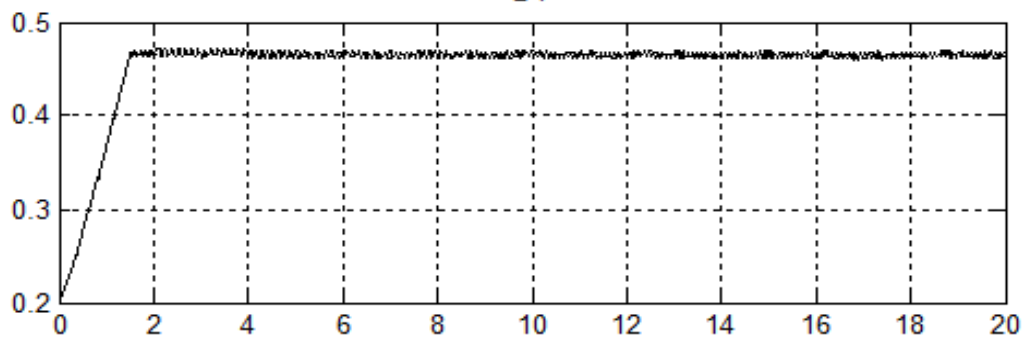
A $t=8\text{ s}$ on chang à $V_{c_ref}=220\text{v}$



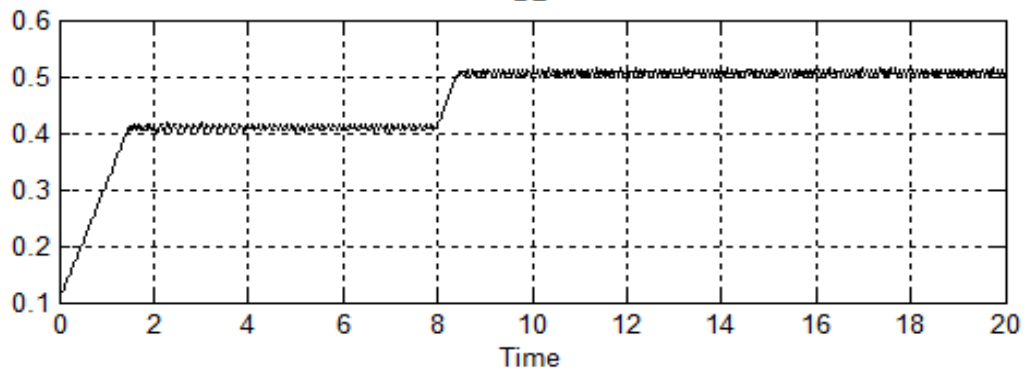


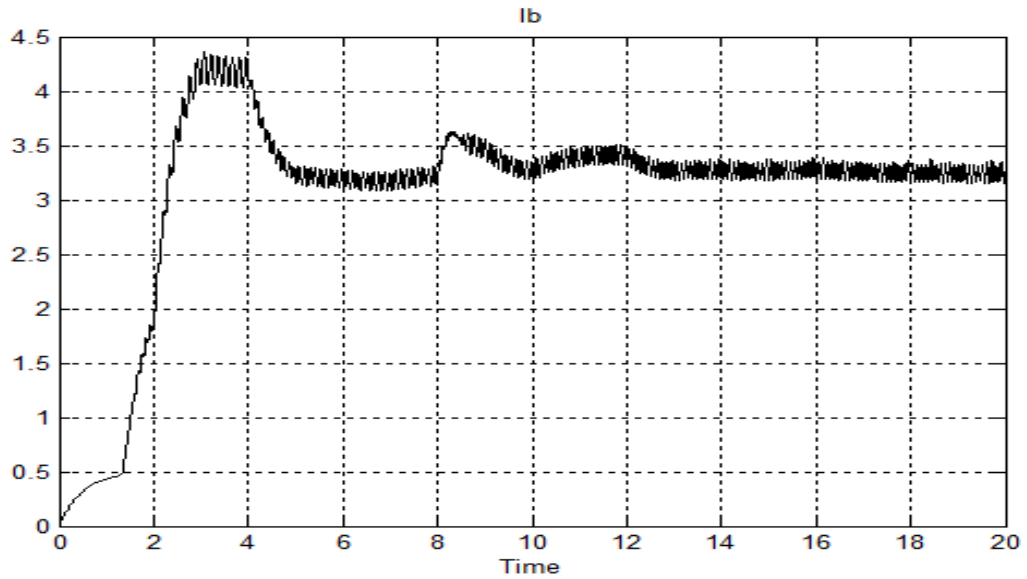


D1



D2





Interprétation :

- On constate que la tension de Vdc reste fixe même si on varie E, P_{eol} et P_c grâce de convertisseur DC/DC de la batterie qui s'influe sur le courant I_b .
- Le générateur PV suit le MPP grâce à la présence du convertisseur DC/DC entre le PV et le bus.

IV.4.1.8. La simulation du chargement de la batterie

Dans cette simulation, on fixe l'ensoleillement à $E=700 \text{ W/m}^2$ qui correspond à la puissance maximale $P_{pv-max}=540 \text{ W}$. La puissance maximale de l'éolienne $P_{eol-max}=700 \text{ W}$

Alors la puissance totale maximale $P_{tot-max}=P_{eol-max}+P_{pv-max}=1240 \text{ W}$

A $t=0 \text{ s}$ (condition initiale) ;

- On charge la capacité du bus continu, ce qui augmente le Vdc.

A $t=4 \text{ s}$;

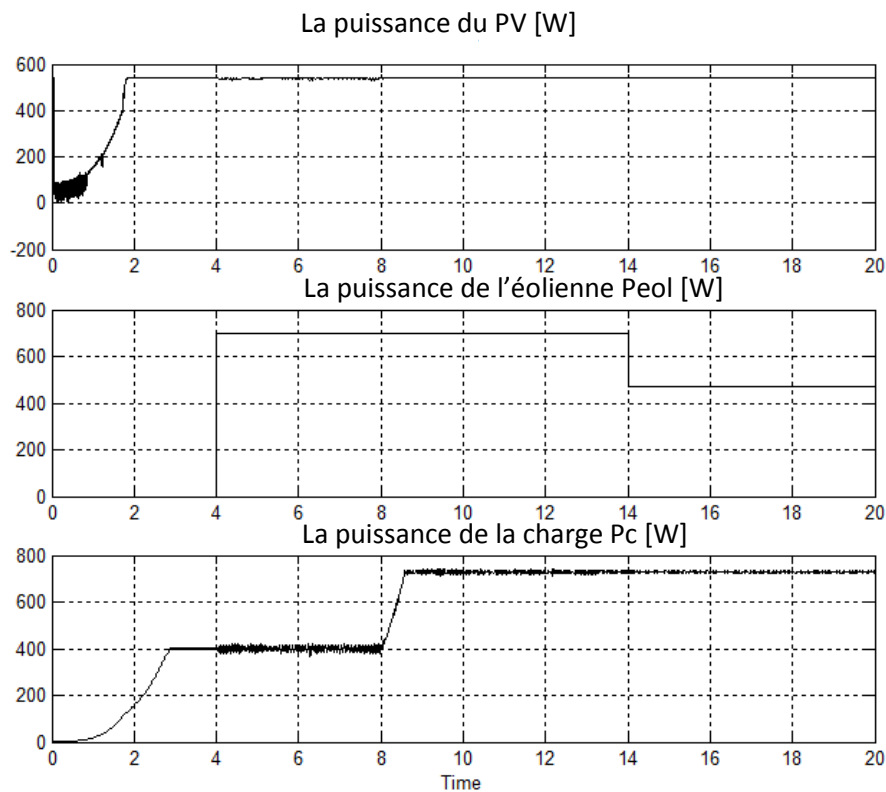
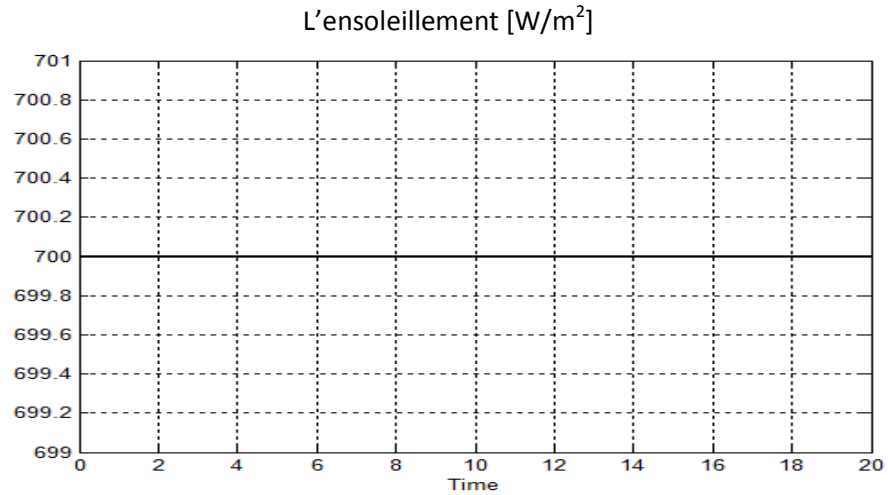
- On connecte l'éolienne
- En connectant la charge résistive de $R=100 \text{ ohm}$ et on fixe la tension de référence $V_{c_ref} = cte=200\text{V}$, donc la résistance consomme une puissance de $P_c=V_c^2/R=400\text{W}$.

La puissance surplus ($P_{tot}-P_c$) va charger la batterie.

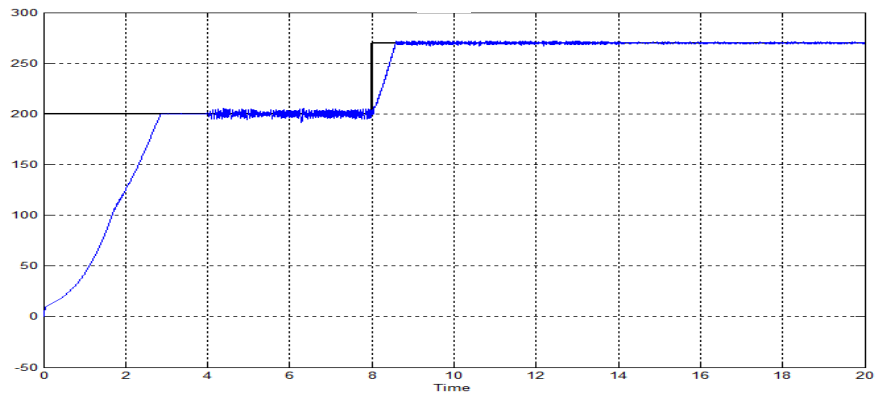
Chapitre IV. Le système hybride (photovoltaïque+éolien)

A $t=8s$: on change le V_{c_ref} de 200 v. à 270v ($P_c=729 W$).

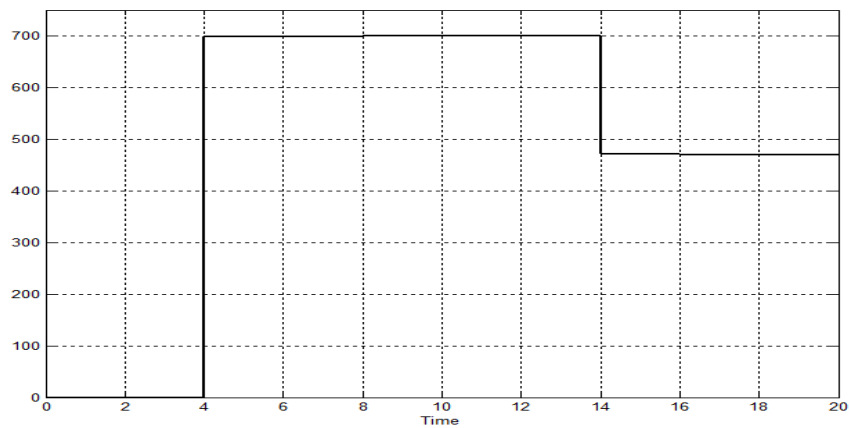
A $t=14s$: on suppose que la batterie est chargée alors on change la puissance de référence de MADA à $P_{eol} = P_c - P_{pv-max}$



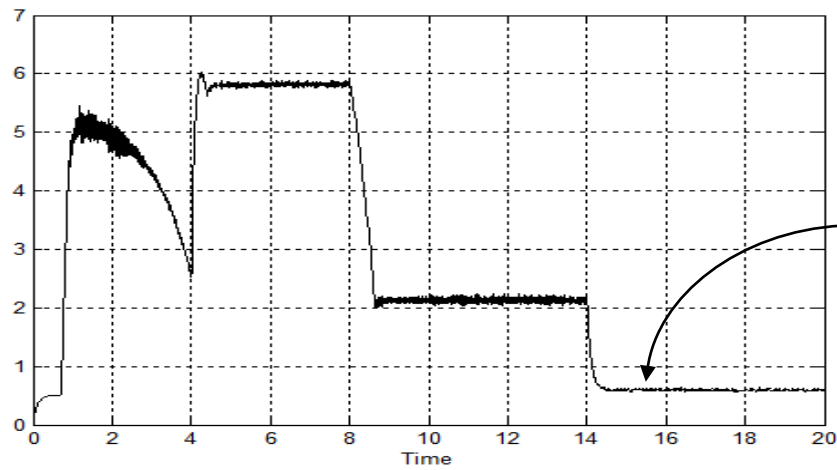
La tension de la charge [V]



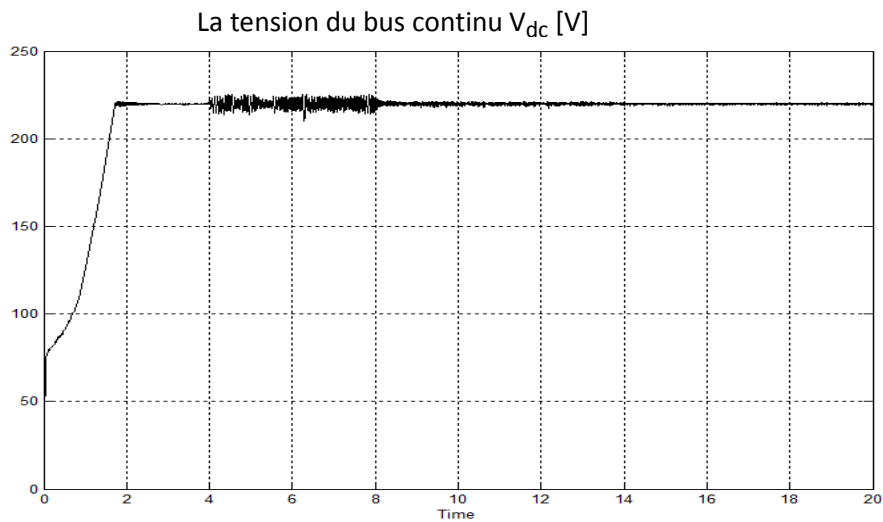
La puissance de l'éolienne Peol [W]



Le courant de chargement de la batterie I_b [A]



Le courant de maintien



Interprétation :

- On remarque que la tension du bus continu reste fixe dans tous les cas à l'aide du convertisseur DC/DC de la batterie.
- A $t=9$ s quand la batterie est chargée on change la puissance de référence de l'éolienne, et on remarque que le courant de charge de la batterie est minimisé à courant $I=0.6$ A (le courant de maintien), et P_c (la puissance de la charge) presque égale la somme de deux puissances de sources (éolien+photovoltaïque).

IV.5. La conclusion

Ce chapitre a révélé un bon comportement du SEH face aux variations climatiques. Les systèmes de poursuite du point de puissance maximale utilisés par les sources d'énergie renouvelable sont très efficaces pendant les variations de l'éclairement et de la puissance éolienne.

Un excellent comportement du système de régulation de la tension du bus à DC.

La dynamique du bus à DC a été analysée aussi par rapport aux variations de la charge résistive (la puissance demandée).

Des améliorations dans la conception et le fonctionnement des SEH sont toujours nécessaires pour rendre l'intégration des sources d'énergies alternatives dans le bilan des systèmes globaux de production d'énergie plus compétitive. Notre travail de recherche, présente une modélisation et commande d'un système hybride éolien-photovoltaïque alimentant un site isolé.

Dans ce mémoire, notre démarche a été développée en trois étapes pour atteindre ces objectifs:

- Une définition sur le système hybride;
- L'étude des moyens de maximisation pour l'utilisation des ressources renouvelables (éolien, photovoltaïque) ;
- Une stratégie de commande de l'énergie électrique générée pour alimenter une charge isolée.

Après un rappel sur les SEH en général, leurs architectures et les outils de dimensionnement, nous nous sommes intéressés au SEH du type Eolien/Photovoltaïque et Batteries de stockage. Pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables, le choix du fonctionnement des composants a été réalisé 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 ont été développés sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Concernant le module « générateur photovoltaïque », le modèle de cinq paramètres a été développé prenant en compte les variations de l'éclairement et de la température.

Le générateur photovoltaïque est équipé d'un système MPPT qui permet de varier le point statique de fonctionnement pour que les capteurs photovoltaïques puissent délivrer le maximum de puissance. L'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale consiste en « P&O ». Cet algorithme est appliqué sur les différents types de hacheur avec la prise en compte de la variation de la charge et des conditions d'environnement

Le module « générateur éolien » qui utilise la MADA a été développé par la modélisation de la MADA, et pour maximiser la récupération de l'énergie contenue dans le vent, la commande adoptée pour la chaîne de production éolienne était la

Commande indépendante de la puissance active et réactive appliquée sur la machine à double alimentation (MADA)

Les différents modèles développés pour chaque constituant du système ont été ensuite interconnectés afin d'analyser le comportement dynamique du SEH complet.

On utilise la structure du bus DC pour alimenter une charge continue (resistive) selon un algorithme de commande

Les simulations ont permis de tester les performances des stratégies de poursuite du point de puissance maximale utilisées. Elles ont aussi mis en évidence un comportement bien stable des bus à DC (la tension fixe) en présence des variations des sources et des charges résistive (la puissance demandée)

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

- Utilisation d'une charge alternative avec prise en compte du cas de déséquilibre de la charge triphasée.
- Utilisation d'une structure différente de l'interconnexion du système SEH
- Utilisation de système SEH connecté au réseau.
- Introduire un groupe diesel pour assurer la continuité de l'alimentation dans le cas de charge isolé et réduire la capacité de stockage
- Prendre en considération le comportement de la batterie (l'échauffement et la stratégie de commande)
- Faire une hybridation dans le stockage (Volant d'inertie, pile à combustible...)
- Changer la stratégie de commande (logique floue...)

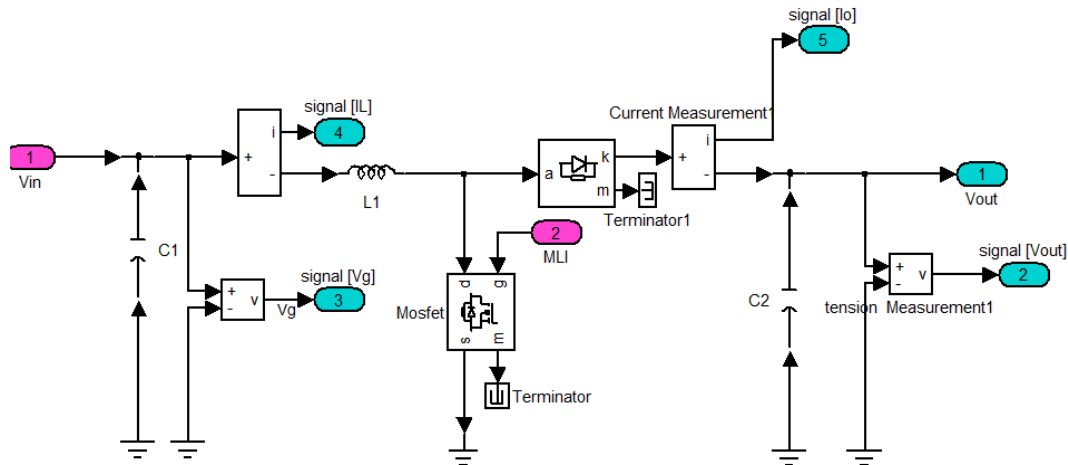
- [1] Observ'ER, l'Observatoire des Energies Renouvelables. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. Neuvième inventaire édition 2007.
- [2] DIAF Said, « Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé », thèse Doctorat ENP 2009.
- [3] Le site internet wikipédia « Énergie solaire »
- [4] Ministère de l'Énergie et des Mines. Guide des énergies renouvelables. Edition 2007.
- [5] VECHIU Ionel, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse Doctorat Havre 2005.
- [6] SOBAIHI khaled « Étude et réalisation d'un hacheur de tracking du point de puissance maximale (MPPT) à cote réaction de tension » Mémoire de magister ENP 2007.
- [7] NICHIPORUK Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat Lille 2005.
- [8] « Analysis and expermental validation of various photovoltaic system models » 7th international ELECTRMACS CONGERS, Montréal August 2002.
- [9] « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques » article nationale Béjaïa 2007.
- [10] « Livre Énergie solaire photovoltaïque », ANNE Labouret, VILLOZ Michel, 2^e édition DUNOD 2005.
- [11] Mohamed Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique ». Thèse de doctorat Batna 2008.
- [12] Blhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». mémoire Magister, Bechar 2008.
- [13] POITIERS Frédéric. « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Nante 2003.
- [14] KHIRENNAS Abdelhamid « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation en vue d'une application pour la Conversion de l'Énergie Éolienne » Étude et réalisation. Magister EMP 2010.

- [15] BOYETTE Armand. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour production éolienne ». Thèse de doctorat, Nancy 2006.
- [16] AKEL Fathi. « Étude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne ». Mémoire Magister EMP 2009.
- [17] HAMZAOUI Ihssen. « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur ». Mémoire de Magister ENP 2008.
- [18] Sejir KHOJET EL KHIL. « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) ». Thèse de doctorat, Toulouse 2006.
- [19] ABASS Mourad. « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne ». Mémoire PFE ENP, 2006.
- [20] ELBIA Youcef. « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ». Mémoire Magister Batna 2009.
- [21] « Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application », IEEE 2009.
- [22] MERRAHI Farid. « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ». Mémoire Magister ENP 2007.
- [23] CIMUCA Gabriel-Octavian. « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens ». Thèse de doctorat, Lille 2005.
- [24] Cours de Pr. MAHMOUDI (professeur en ENP). Modélisation et commande vectorielle de machine asynchrone.
- [25] État de l'art dans les aérogénérateurs électriques.
- [26] ZAROOUR Laid, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque éolien hors réseau », mémoire Magister Constantine 2010.
- [27] GERGAUD Olivier, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse Doctorat Cachan 2002.

- [28]** DALI Mehdi, BELHADJ Jamel, ROBOAM Xavier, « Disign of stand-alone hybride PV-wind Generating sys with battery storage »
- [29]** KIM Seul-Ki, KIM Eung-Sang and AHN Jong-Bo, « Modeling and Control of a Grid-connected Wind-PV Hybrid Generation System », 2006 IEEE.
- [30]** KRICHEN Lotfi, « Modeling and Control of a Hybrid Renewable Energy Production Unit» ICGST-ACSE Journal, Volume 7, Issue 1, May 2007.
- [31]** GUY Séguier ; « Électronique de puissance (les fonctions de base et leurs principales applications) », Livre édition DUNOD 7^e édition 1999.
- [32]** BOUHARCHOUCHE Abderezzaque, BOUABDALLAH Ahmed Nasrallah « Etude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Mémoire PFE, ENP 2010.
- [33]** BOUHALI Omar, « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique » thèse de Doctorat, ENP, 2007.

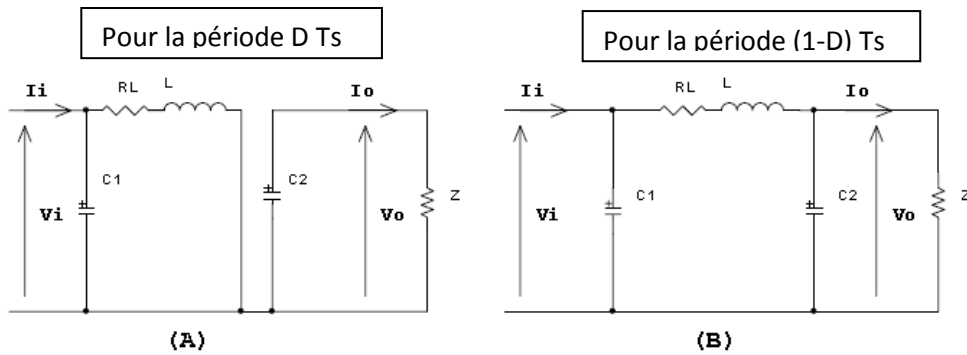
SIMULATION DU CONVERTISSEUR STATIQUE

- **Simulation d'hacheur parallèle par logiciel SIMPOWR (MATLAB 6.1)**



Modélisation et Simulation d'hacheur parallèle par logiciel SIMULINK (MATLAB 6.1)

Modèle mathématique (D : rapport cyclique et Ts : période de MLI)



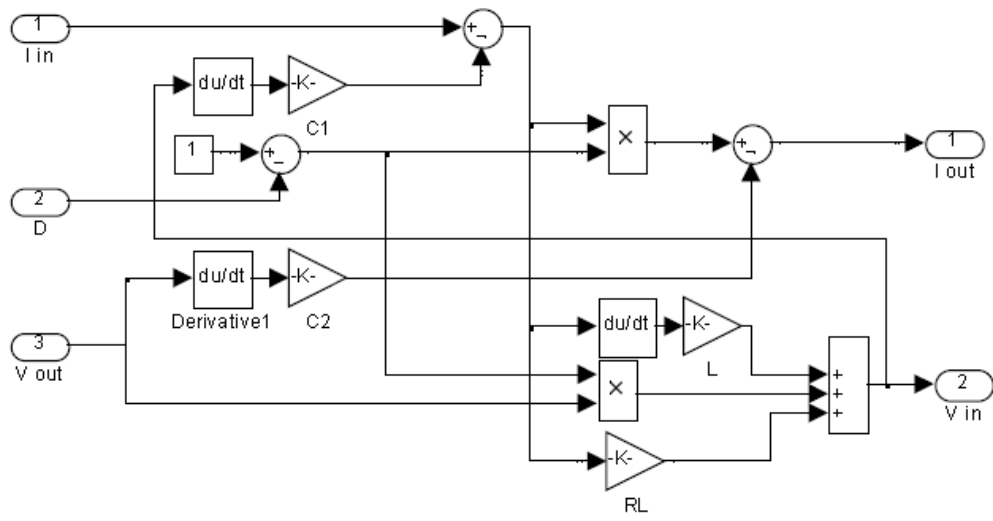
$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - R_L i_L \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - R_L i_L \end{cases}$$

Après une approximation

$$\begin{cases} C_1 \frac{dvi}{dt} Ts = DTs(i_i - i_L) + (1-D)Ts(i_i - i_L) \\ C_2 \frac{dv_o}{dt} Ts = -DTs i_o + (1-D)Ts(i_L - i_o) \\ L \frac{di_L}{dt} Ts = DTs(v_i - R_L i_L) + (1-D)Ts(v_i - v_o - R_L i_L) \end{cases}$$

La modélisation dans simulink ;



ملخص:

العمل المقدم في هذه المذكرة يتعلق بالمحاكاة والسيطرة على نظام هجين يتكون من اثنين من مصادر الطاقة المتجددة، الشمسية والناعورة الهوائية وذلك لتغذية شحنة منعزلة. للاستعمال الأمثل لهذه الموارد ، أولا قدمنا الحالة على كل نظام وطريقة الربط المختلفة لهذا النظام الهجين. وقدمت النموذج والمحاكاة لمولد الضوئي مع تطبيق الرقابة MPPT لتعظيم إنتاج الطاقة وفي نظام الناعورة الهوائية اخترنا التحكم في ماكنة لا تزامنية ثنائية التغذية من خلال المتغيرات لعضو الدوار وطبقنا عليها التحكم الشعاعي لتحكم في الاستطاعة P و Q للجزء الثابت، ثم قمنا بالتهجين بين النظامين مع التخزين الكهروكيميائية .

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة , المولد الشمسي , الناعورة الهوائية , نظام هجين , التحاكي , شحنة منعزلة , الناقل المستمر , ماكنة لا تزامنية ثنائية التغذية , التحكم الشعاعي في الإستطاعة , المحول الثابت .

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la commande d'un système hybride qui se compose de deux sources d'énergie renouvelable, photovoltaïque et éolienne qui alimente une charge isolée. Pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables, tout d'abord nous avons présenté un état de l'art sur chaque système et les différentes architectures du système hybride. La modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque ont été présentées avec application d'une commande MPPT pour maximiser la puissance délivrée. Pour le système éolien, nous avons choisi la machine asynchrone double alimentation pilotée à travers les variables rotoriques. Ainsi nous avons appliqué une commande vectorielle pour commander la puissance active et réactive statorique. Ensuite, nous avons fait l'hybridation entre les deux systèmes avec un stockage électrochimique sous architecture du bus continu. Un algorithme de supervision du système hybride en mode isolé a été développé.

Mots clé : énergie renouvelable, photovoltaïque, éolienne, système hybride, supervision, MPPT, modélisation, commande, charge isolée, bus continu, Machine asynchrone à double alimentation, Commande vectorielle en puissance active et réactive, Convertisseurs statiques.

Abstract:

The work presented in this Memory concerns the modeling and control of a hybrid system consisting of two renewable energy sources, photovoltaic and wind which are fed a isolation load. To maximize the use of renewable resources, the first we presented a state of the art on each system and the different architectures of the hybrid system. Modeling and simulation of photovoltaic generator were presented with an application MPPT control to maximize power output. In the wind system we chose double feed induction machine controlled through the rotor variables and we used a vector control for control the stator active and reactive power, then we did the hybridization between the two systems with electrochemical storage in the DC bus architecture. A single mode control has been developed.

Keywords: renewable energy, photovoltaic, wind, hybrid system, MPPT, simulation, isolated load, DC bus, Asynchronous machine with double power supply, vector control in active and reactive power, static converters.