



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Modélisation et commande d'un système multi-sources (Photovoltaïque - éolienne)

Présenté par :

GHOUL Kawther

Encadrée par :

ATTIA MOUSSA

Devant le jury :

HOUAM Ala	MAA	Président	Université Larbi Tebessi Tébessa
ATTIA Moussa	MAA	Encadreur	Université Larbi Tebessi Tébessa
DAOUADI Rabah	MAA	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa
Moghrani Redhwane	MAA	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa

Promotion 2021-2022



Remerciement

En préambule, je souhaite rendre grâce à Dieu, le clément et le
miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience
de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à remercier très sincèrement mon encadreur,

Mr, ATTIA MOUSSA, pour ses conseils
précieux, ses orientations judicieuses, sa patience, sa diligence,
ainsi que ses suggestions et critiques qui ont facilités l'achèvement
de ce présent travail.

Mes précieux remerciements vont également au président
et membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de
juger ce travail et aussi l'institut des Mines – Université de LARBI
TEBESSI.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu
de près ou de loin, pour élaborer ce travail



Je dédie ce modeste travail à

A l'âme de mon père, que Dieu ait pitié de lui et le mette en
paix.

Ma cher Mère qui est peiné pour mon éducation, mes
études et à mon bien-être. Que Dieu Allah la bénisse,

Et

pour leur patience et leurs sacrifices.

A mes chères sœurs « Samira et Djennat ».

A mes frères « Ayoub et Madjid »

A tous mes proches.

A tous mes amis.

A tous ce que j'aime.

Ce projet leur est dédié.

GHOUL kawther

Résumé :

En raison de leur flexibilité par rapport aux sources d'énergie primaires, les projets d'énergie renouvelable multi-sources susciteront une certaine attention à moyen terme. L'objectif de cette recherche est d'étudier un système de production hybride qui combine deux sources d'énergie renouvelables (éolienne et photovoltaïque) avec un stockage et un générateur de secours. Un gestionnaire supervise la gestion de l'énergie des différentes sources, ce qui comprend le contrôle de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs en fonction des conditions météorologiques (éclairage, vitesse du vent).

Même si les nouvelles solutions technologiques apportées par les systèmes hybrides ne sont pas encore économiquement viables, elles offrent d'excellents niveaux de sécurité. Cependant, compte tenu de la nécessité d'une durabilité à long terme, ces alternatives, avec le soutien du public, peuvent être économiquement viables à moyen et à long terme.

Mots clés : Eolien, Système Hybride, Photovoltaïque, Energie Solaire, Energie Eolienne, Energie Renouvelable, Simulation.

الملخص

ستشهد التركيبات الكهربائية التي تستخدم الطاقات المتجددة متعددة المصادر، على المدى المتوسط، اهتمامًا معينًا بفضل مرونتها مقابل مصادر الطاقة الأولية. الهدف من هذا العمل هو دراسة نظام الإنتاج الهجين ، الذي يجمع بين مصدرين للطاقة المتجددة (الرياح، الكهروضوئية) مع التخزين ومولد الطوارئ. يتم ضمان إدارة الطاقة للمصادر المختلفة من قبل المدير الذي يتحكم في فتح وإغلاق المفاتيح ، وفقًا لظروف الأرصاد الجوية (الإضاءة ، سرعة الرياح).

تأتي الحلول التكنولوجية الجديدة والناجمة عن النظم الهجينة لتوليد الطاقة الكهربائية بديلاً جذو منافس للحلول العادية بالرغم من تكلفتها الباهظة نسبياً في الوقت الحالي وذلك نظراً للأمان العالي الذي توفره هذه الحلول.

الكلمات المفتاحية: ناعورة هوائية، نظام هجين، كهروضوئي، الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الطاقة المتجددة

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux.....	xii
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables	
I.1.Introduction	6
I.2.les énergies renouvelables	6
I.3.les différent types des énergies renouvelables	7
I.3.1.la biomasse.....	7
I.3.2.L'hydraulique.....	7
I.3.3.La géothermie.....	8
I.3.4.l'hydrogène	8
I.3.5.Le solaire.....	9
I.3.5.1.Energie solaire photovoltaïque	10
I.3.5.1.1.Définition.....	10
I.3.5.1.2.Effet photovoltaïque.....	10
I.3.5.1.3.Cellules photovoltaïques ou photopiles.....	11
I.3.5.1.4.Fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	12
I.3.5.1.5.Différents types des cellules solaires.....	12
a)Cellules mono cristallines.....	12
b) Cellules poly cristallines.....	12
c) Cellules amorphes	13
I.3.5.1.6.Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	13
a) Avantage.....	13
b) Inconvénients.....	13
I.3.6.L'éolienne.....	14
I.3.6.1.Constitution d'un système éolien	14
I.3.6.2.Classification des éoliennes.....	15
I.3.6.2.1.Taille des aérogénérateurs	15
I.3.6.2.2.L'organe capteur.....	15

a) Capteurs à axe horizontal	16
b) Capteurs à axe verticale	16
I.3.6.3.Principe de Fonctionnement	16
I.3.6.4.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	17
a) Avantage.....	17
b) Inconvénients.....	17
I.4.Energies solaire et éolienne en Algérie	17
I.4.1.potentiel solaire en Algérie	18
I.4. Potentiel éolien.....	19
Conclusion	20
Chapitre II : Modélisation d'un système multi-sources éolien-photovoltaïque	
II.1 Introduction	22
II.2. Modalisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque.....	22
II.2.1. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.....	23
II.2.1.1 Modélisation du panneau photovoltaïque	23
II.2.1.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	23
II.2.1.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire	24
II.2.1.4 Modèle simplifié du module photovoltaïque	25
II.2.1.5 Paramètres externe de la cellule photovoltaïque	27
II.2.2 Modélisation et commande des convertisseurs (DC -DC)	28
II.2.3 Point de Puissance Maximale	29
II.3 Modélisation de la chaîne de production éolienne	32
II.3.1 Modélisation de la vitesse du vent	32
II.3.2 Modèle de la turbine éolienne	33
II.3.3 Modèle du multiplicateur	34
II.3.4 Modèle de l'arbre	35
II.3.5 Modèle de l'actionneur des pales	35
II.3.6 Modélisation de la génératrice	37
II.3.6.1 Modélisation de la génératrice synchrone a aimant permanent (GSAP)	37
II.3.6.2 Commande de la GSAP	38
II.3.6.2.1 Commande PI standard	38
II.3.6.2.2 Mode glissant d'ordre supérieur	38
II.4 Modélisation du système de stockage	39
II.4.1 Modèle de Copetti de batterie au plomb	39

II.4.2	Modèle de la capacité de la batterie	39
II.4.3	Modèle de la tension de la batterie	40
II.4.4	Modèle de la charge de la batterie.....	40
II.4.5	Modèle de la décharge de la batterie	40
II.5	Modélisation des convertisseurs statiques	41
II.5.1	Redresseur	41
II.5.2	Modélisation du convertisseur DC-AC.....	42
II.5.2.1	Modélisation l'onduleur de tension	42
II.5.2.2	Modulation de Largeur D'impulsion M.L.I.	43
	Conclusion	44
Chapitre III : Méthodes MPPT appliquées au système éolien-photovoltaïque		
III.1.	Introduction:	46
III.2.	Définition de la commande MPPT :.....	47
III.3	La connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance.....	48
III.4	La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation :	49
III.5.	Principe de la recherche du point de puissance maximale:.....	50
III.6.	Différents types de commandes MPPT pour un Générateur PV:.....	52
III.7.	Classification des technique MPPT:.....	53
III.7.1.	Les premiers types de technique MPPT:.....	53
III.7.2.	Les technique MPPT à algorithme performants:.....	54
III.7.2.1.	Technique “ Perturbe and Observe” (P&O)	55
III.7.2.2.	Technique MPPT à pas auto adaptatif.....	56
III.7.2.3.	Technique de la conductance Incrémentale (Incrémental Conductance)	58
III.7.3.	Les techniques MPPT basées sur des relations de proportionnalité.....	61
III.7.3.1.	Technique de la fraction de la tension de circuit ouvert du générateur.....	61
III.7.3.2.	Technique de court-circuit:.....	62
III.7.4.	Les techniques de différenciation :.....	63
III.7.5.	Les techniques MPPT basées sur le principe de logique floue:.....	63
III-7-5-1.	Loi de commande :.....	65
III.7.5.2.	Optimisation à cinq classes :.....	66
III.7.5.3.	Structure de base d'un contrôleur flou dédié au GPV :.....	68
III.7.6.	Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificielle:.....	69
III.8.	Optimisation du rendement énergétique du système éolien:.....	70

III.8.1. Stratégie de la recherche de la puissance maximale pour une turbine éolienne :.....	70
III.8.1.1. Recherche de la puissance maximale en connaissant la courbe caractéristique $CP(\lambda)$:	71
III.8.1.1.1. Commande en vitesse:.....	72
III.8.1.1.2. Commande en couple :.....	73
III.8.1.1.3. Commande indirecte par le pilotage du courant :.....	76
III.8.1.2. Recherche de la puissance maximale sans la connaissance de la courbe caractéristique $CP(\lambda)$:	78
III.8.1.2.1. La Stratégie P&O(Perturb and Observe) basique :.....	80
III.8.1.2.2. P&O évoluée combinée à l'ORB :.....	81
III.8.2. Autres méthodes MPPT appliquées à un système éolien[88]:.....	83
III.8.2.1: Méthode de gradient :.....	83
III.8.2.2. Structure de base d'un contrôleur flou dédié à l'aérogénérateur :.....	84
III-9- Conclusion :.....	85
Chapitre IV : Simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque	
IV.1. Introduction :.....	87
IV.2. Systèmes Hybrides (SEH) :.....	87
IV.3. Architecture Des Systèmes Hybrides :.....	88
IV.3. 1. Architecture à bus CC:.....	88
IV.3. 2. Architecture mixte à bus CC / CA :.....	89
IV.3. 3. Architecture à bus CA :.....	91
IV.4. Systèmes de stockage :.....	92
IV.5. L'environnement MATLAB/Simulink:.....	94
IV.6. Processus de simulation sous MATLAB/Simulink :.....	95
IV.7. Boîte à outils SimPowerSystems.....	95
IV.8. Optimisation de l'électrification d'un site isolé :.....	95
IV.8.1 Caractéristique du système hybride simulé :.....	98
IV.8.1.1 Système Photovoltaïque :.....	98
IV.8.1.2 Système Eolien :.....	99
IV.8.1.3 Système de stockage :.....	100
Conclusion	102
Conclusion Générale.....	104
Références	106

Liste des figures

Fig. I.1 : les chiffres clés de l'énergie en 2020.....	6
Fig. I.2 : Énergie Biomasse	7
Fig. I.3 : Différent types de l'hydraulique	8
Fig. I.4. Une source d'énergie géothermique	8
Fig. I.5 : Énergie solaire thermique	10
Fig. I.6 : Système Photovoltaïque.....	10
Fig. I.7:principe de fonctionnement d'une cellule solaire	12
Fig. I.8 : Schéma des différents éléments de l'éolien.....	15
Fig. I.9 : Eolienne à axe horizontal.....	17
Figure II-1 : schéma hybride éolien-photovoltaïque	21
Figure II-2 : Chaîne production photovoltaïque.....	22
Figure II-3 : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	23
Figure II-4 : Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque	24
Figure II-5 : Schéma block global d'un panneau photovoltaïque sous matlab-simulink.....	26
Figure II-6 : (a) Caractéristique Tension/Courant.....	26
Figure II-6 : (b) Tension/Puissance d'un panneau PV	26
Figure II-7 : Schéma détaillé du système de conversion photovoltaïque	28
Figure II-8 : (a) Hacheur survolteur à commutation	28
Figure II-8 : (b) Hacheur survolteur à valeurs moyennes	28
Figure II-9 : Modèle de la chaîne photovoltaïque sous Matlab-simulink	29
Figure II-10 : Caractéristique Courant/Tension/Puissance d'un panneau photovoltaïque	29
Figure II-11 : Recherche du MPP par la méthode de l'incrément de la conductance	30
Figure II-12 : Bloc-diagramme de l'algorithme MPPT « Incrément de la conductance	31
Figure II-13 : Convertisseurs (DC -DC) avec MPPT sous Matlab-simulink	31
Figure II-14 : Modèle de la turbine éolienne	31
Figure II-15 : Modèle et résultat de la vitesse de vent sous Matlab-simulink	32
Figure II-16 : Configuration d'une éolienne	32
Figure II-17 : Modèle de la turbine sous Matlab-simulink	33
Figure II-18 : Courbes du coefficient CP (λ, β)	34
Figure II-19 : Orientation des pales	35
Figure II-20 : Modèle et commande du système de calage de pale	36
Figure II-21 : Modèle sous simulink du système de calage de pale	36
Figure II-22 : Modèle complet de la turbine éolienne	36
Figure II-23 : Schéma électrique équivalent de nb éléments de batteries en séries	39
Figure II-24 : Redresseur triphasé pont de diodes	42
Figure II-25 : Représentation des composants bidirectionnels	42
Figure II-26 : Modèle simulink de la commande de l'onduleur	43

Figure III -1: Schéma synoptique d'une commande MPPT.....	46
Figure III -2: Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.....	47
Figure III -3: Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque.....	48
Figure III -4: Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.....	49
Figure III -5: Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.....	50
Figure III-6 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale.....	51
Figure III-7: Principe de la première technique MPPT numérique.....	53
Figure III-8: Recherche du MPP.....	54
Figure III-9: Caractéristique Ppv(Vpv) d'un panneau solaire.....	55
Figure III-10 : Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O)	55
Figure III-11 : Algorithme MPPT à pas auto-adaptatif.....	57
Figure III-12 : Positionnement du point de fonctionnement ($G=1kW/m^2$, $T=25C^\circ$).....	59
Figure III-13 : Algorithme MPPT conductance Incrémentale (Inc .Con).....	59
Figure III-14 : Rapport entre la tension optimale et la tension de circuit ouvert.....	61
Figure III-15 : Schéma bloc d'une logique floue.....	64
Figure III-16 : Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques de l'erreur normalisée et de la variation de l'erreur normalisée.	65
Figure III-17: Structure du contrôleur flou pour MPPT photovoltaïque.....	68
Figure III-18: Exemple d'un réseau de neurones.....	69
Figure III-19: Schéma global de système de conversion d'énergie éolienne.....	70
Figure III-20: Calcul de la vitesse de référence.....	72
Figure III-21: Poursuivre du point de puissance maximale	73
Figure III-22: Gauche: Famille De Courbe Du Couple Pour Différents Vitesses De Vent.....	74
- Droite: Courbe Du Couple Maximal	
Figure III-23: Couple De Référence En Fonction De La Vitesse De Rotation.....	75
Figure III-24: Convergence Vers Le Point Optimal – Contrôle En Couple.....	75
Figure III-25: Schéma d'une chaîne de conversion d'éolienne, avec redresseur à diodes et hacheur.....	76
Figure III-26: Courant De Référence En Fonction De La Vitesse De Rotation.....	77
Figure III-27: Courant De Référence En Fonction De La Tension Bus.....	77
Figure III-28: Structure a redresseur MLI.....	78
Figure III-29: Principe de fonctionnement d'un MPPT à vitesse du vent variable.....	79
Figure III-30: Algorithme P&O.....	80
Figure III-31: Courbe Du Courant Optimal Et La Tension Optimale.....	81
Figure III-32: Courbe Caractéristique Du Courant En Fonction du Carre de La Tension, et de La Puissance En Fonction de La Tension.....	82
Figure III-33: MPPT éolienne selon la puissance fournie.....	83
Figure III-34: Algorithme : MPPT gradient.....	83
Figure III-35: Structure du contrôleur flou pour MPPT éolienne.....	84
Figure VI-1 : Configuration d'un SH à bus à Courant Continu (CC)[108].....	89
Figure VI-2 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA [108].....	90
Figure VI-3 : Configuration du SH à bus CA.....	91
Figure VI-4 : Cellule électrochimique de base.....	92
Figure VI-5 : Coûts ; durée de vie et rendement des différentes technologies	

d'accumulateurs électrochimiques [112].....	93
Figure IV-6 : Navigateurs des bibliothèques Simulink.....	94
Figure IV-7 : Structure d'un système isolé.....	96
Figure IV-8 : Schéma bloqué d'un système hybride alimentant un site isolé.....	97
Figure IV-9 : Schéma bloqué détaillé du Système hybride	98
Figure IV-10 : Variation de l'éclairement et la température du Panneau Photovoltaïque en fonction du temps	99
Figure IV-11 : Caractéristique de la puissance générée par la turbine pour un angle d'attaque $\beta=0^\circ$	100
Figure IV-12 : Caractéristique de décharge de la batterie pour différents valeurs du courant.....	101

Liste des Tableaux :

Tableau I.1 : Taille des éoliennes	15
Tableau II-1 : Paramètres Pour une batterie de plomb acide	40
Tableau III-1 : Table de règles à cinq classes.....	66
Tableau IV-1 : Caractéristiques électriques de Module PV BP SX 3190.....	99
Tableau IV-2 : Caractéristiques Techniques de l'éolienne.....	99

Introduction Générale

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout nouveau; dans l'histoire de l'humanité, les énergies renouvelables ont été pendant longtemps la première possibilité de produire de l'énergie. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de cet humanité. Ceci a seulement changé avec la révolution industrielle. Qui apparaît à travers deux petits pics, l'un au cours du 19^{ième} siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au 20^{ième} siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire. Ce qui a diminué de l'application des énergies renouvelables en termes absolus et relatifs. Aujourd'hui, Une grande partie de l'énergie utilisée dans le monde (plus de 76%) provient de gisements de combustibles fossiles carbonés (charbon, pétrole, gaz).

Ces gisements constitués au fil des âges sont évidemment en quantité limitée; ils sont épuisables et non renouvelables. Ils ont été et continueront à être une cause importante de pollution et de changement de climat. Contrecoup l'émission des gaz à effet de serre est l'un des effets secondaires indésirables des énergies fossiles.

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie les matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés dans le Protocole de Kyoto doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources d'Energies Renouvelables, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial .Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici et au future, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, pour cela plusieurs travaux de recherches ont été lancés dans plusieurs laboratoires de recherche dans le domaine de développement durable, pour but de satisfaire la demande de consommation énergétique d'une part et d'autre part pour réduire les effets négatives des ressources d'origine fossile sur l'environnement.

Parmi les principales ressources d'énergie renouvelable, on distingue l'énergie solaire (l'énergie que transporte le rayonnement solaire), l'énergie éolienne, l'énergie hydro-éolienne (ces éoliennes sous marines utilisent les courants marins pour produire de l'électricité), l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique. On cite comme exemple la conversion du rayonnement solaire, soit par la conversion du

Introduction générale

rayonnement solaire en énergie électrique directement utilisable par les systèmes photovoltaïques, ou par les systèmes de concentration du rayonnement solaire afin de produire la vapeur d'eau à haute pression, qui sert à actionner les turbines et en fin produire de l'énergie électrique ainsi que le chauffage. La source d'énergie solaire et l'éolienne sont les deux sources renouvelables distribuées d'une manière plus au moins équitable sur notre planète terre, qui sont disponible partout sur le globe terrestre. Qui sont de mieux en mieux exploitées.

La conversion d'énergie solaire par l'effet photovoltaïque, destinée principalement à l'alimentation en électricité d'équipements industriels et d'appareils domestiques, est très répandue. Elle est mise en œuvre dans des projets photovoltaïques autonomes à faible consommation et dans les réalisations de centrales électro-solaires adaptées aux sites isolés ou raccordées au réseau électrique local. Généralement les technologies solaires continueront de s'améliorer, de ce fait réduisant les coûts, particulièrement à l'échelle économique. En conséquence les panneaux photovoltaïque sont descendus en coût environ de 30\$/w approximativement à 3\$/w dans les trois dernières décennies mais le coût de système global est autour de 6\$/w, qui est toujours trop élevé pour concurrencer autre ressources d'énergie électrique. Cependant les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont devenus rentables telles que les systèmes photovoltaïques intégrés au toit ou aux façades des bâtiments.

Tandis que le secteur d'énergie éolienne s'est développé d'une manière étonnante en point de vue technologie et coût. Cette évolution a contribué à la rentabilité économique des installations éolienne, l'efficacité de production d'énergie éolienne repose sur le potentiel éolien de l'emplacement considéré, puisque toutes les valeurs de l'électricité produite par l'éolienne dépendent de la ressource du vent, tellement il y a une gamme des valeurs du régime des vents. Conformément au département d'énergie d'Amérique (DOE, the U.S department of energy's) prédit pour un régime de vent de classe allant de 4 à 6 m/s (vitesse moyenne annuelle du vent est de 5.8 et 6.7 m/s à une hauteur de 10 m) d'un site, le coût de l'énergie produite par un parc d'éoliennes est approximativement de 0.03\$/kWh en 2010. Mais globalement les facteurs critiques, en déterminant s'il est financièrement intéressant d'installer des éoliennes, sont le coût originel de l'installation et la production énergétique annuelle.

En ce qui concerne notre pays : l'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus

Introduction générale

de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie. Ainsi de sa part sa situation géographique, l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne .En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu (169.440 TWh/an), le plus important de tout le bassin méditerranéen. Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important à la région sud Adrar très précisément, donne un autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelables dans les décennie à venir.

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie citées ci-dessus, est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du KWh électrique produit, en raison de l'irrégularité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire qui posent le problème du stockage d'énergie. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est un grand intérêt pour les pays en développement, comme l'Algérie. Elle possède des nombreuses régions, isolées et éloignées de réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi l'extension de ces réseaux serait d'un cout financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont on dispose doit être une grande priorité.

Le premier chapitre parle de Généralité sur les énergies renouvelables .On va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables. Et précisément sur les systèmes solaires photovoltaïques et les systèmes éoliens..

Dans ces chapitre02 d'abord. La modélisation du système hybride PV-E-D. en ce proposons l'élaboration des modèles mathématiques pour les systèmes de productions.

Dans ces chapitre 03, nous allons exposer succinctement les différentes architectures des chaines de conversion Eolien. Photovoltaïque MPPT.

Dans ces chapitre 04. Ensuite il est suite il est simulé sur le logiciel Matlab/ Simulink en exploitant les déparent outils existants .

Chapitre I :

**Généralité sur les
énergies renouvelable**

I.1. Introduction :

Si la consommation d'une source d'énergie ne limite pas son utilisation future, elle est renouvelable. Cela est vrai pour l'énergie dérivée du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et de la biomasse en général. À l'échelle de la durée de vie de l'humanité, humide ou sec. Pour les énergies fossiles et nucléaires, cependant, ce n'est pas le cas.

Il est évident que la dynamique énergétique du 21ème siècle rassemblera de nouveaux acteurs issus du secteur des énergies renouvelables assurant ainsi un développement durable.

Parmi les systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, on mentionne les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire et les systèmes éoliens fonctionnant avec l'énergie du vent. Plusieurs technologies des systèmes solaires et éoliens sont envisageables, mais les plus intéressants ce sont ceux solaires photovoltaïque et éoliens à axe horizontal.

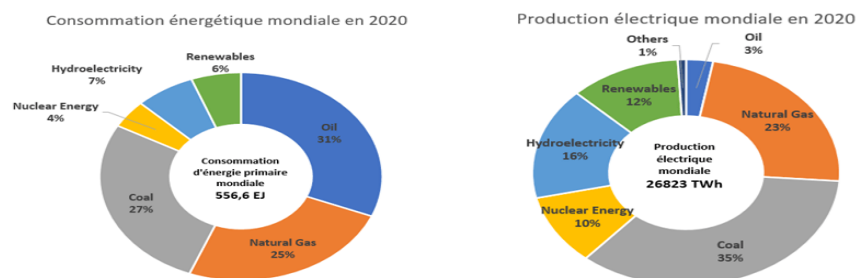
Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables, et précisément sur les systèmes solaires photovoltaïques et les systèmes éoliens qui représentent l'actualité des énergies renouvelables.

I.2.les énergies renouvelables :

Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont explosé en popularité ces dernières années. Tout système énergétique durable dans 20 à 30 ans sera construit sur l'utilisation judicieuse de sources anciennes et une dépendance croissante aux énergies renouvelables.

Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. [1]



I.1 Les chiffres clés de l'énergie en 2020.

I.3.les différent types des énergies renouvelables :

I.3.1.la biomasse :

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques.

L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro. [2]



Fig. I.2 : Énergie Biomasse

I.3.2.L'hydraulique :

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternatif relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie

aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [3]

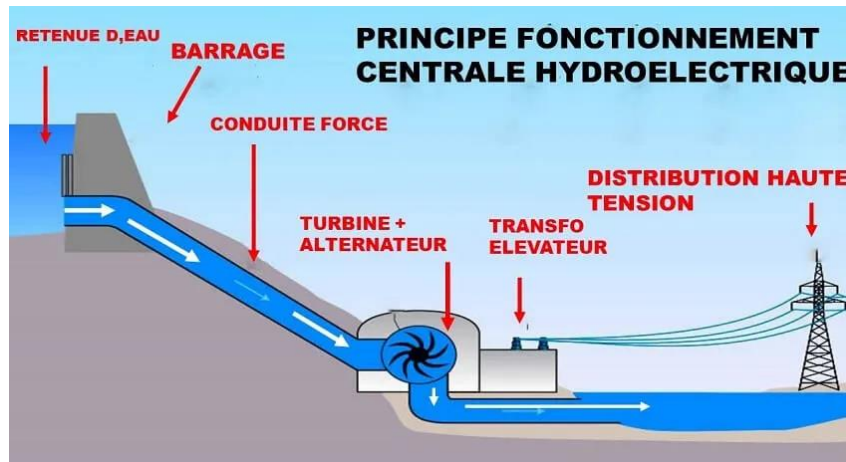


Fig.I.3 : les énergies hydraulique

I.3.3. La géothermie :

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques.

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure [2]

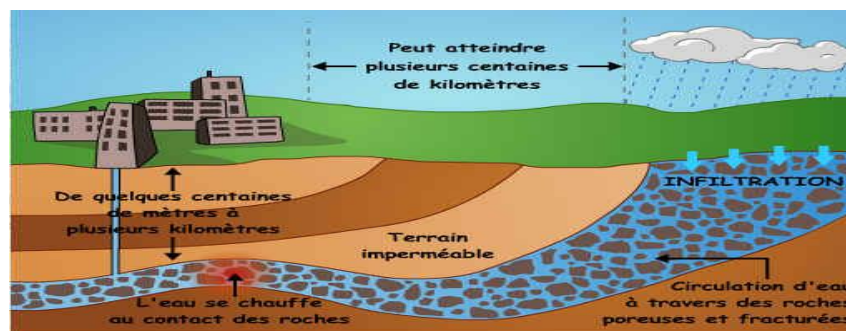


Fig. I.4. Une source d'énergie géothermique

I.3.4. l'hydrogène :

L'hydrogène pourrait constituer un vecteur énergétique de l'avenir. En effet, d'une part les réserves de carburants fossiles ne sont pas éternelles et d'autre part on sait que le moteur à hydrogène est beaucoup plus respectueux de l'environnement que le moteur thermique,

puisqu'il permet d'éviter les émanations de gaz carbonique et l'effet de serre. Le cœur du moteur à hydrogène est une pile à combustible qui fonctionne suivant le modèle d'une centrale électrique, avec un apport d'hydrogène et d'oxygène, l'oxygène étant prélevé directement dans l'air extérieur.

Au contact chimique de l'oxygène, l'hydrogène produit de l'eau. Ce processus dégage de l'énergie sous forme d'électricité qui fait tourner le moteur. [4]

I.3.5. Le soleil :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW c/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. [5]

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique
- L'énergie solaire photovoltaïque
- l'énergie solaire passive.

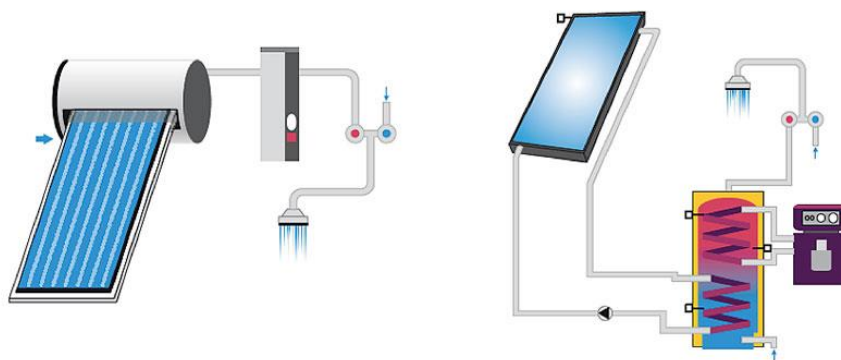


Fig. I.5 : Énergie solaire thermique

I.3.5.1 Energie solaire photovoltaïque :

I.3.5.1.1. Définition :

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

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble.

[3]

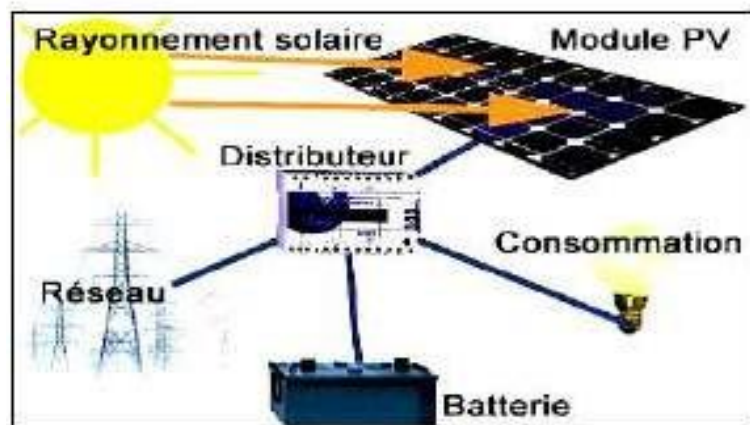


Fig. I.6 : Système Photovoltaïque

I.3.5.1.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie. Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap (E_g) de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. [6]

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de

phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

I.3.5.1.3. Cellules photovoltaïques ou photopiles: [7]

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

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

Toutefois, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium pur obtenu à partir de la silice (quartz ou sable) par transformations chimiques et métallurgiques. [5]

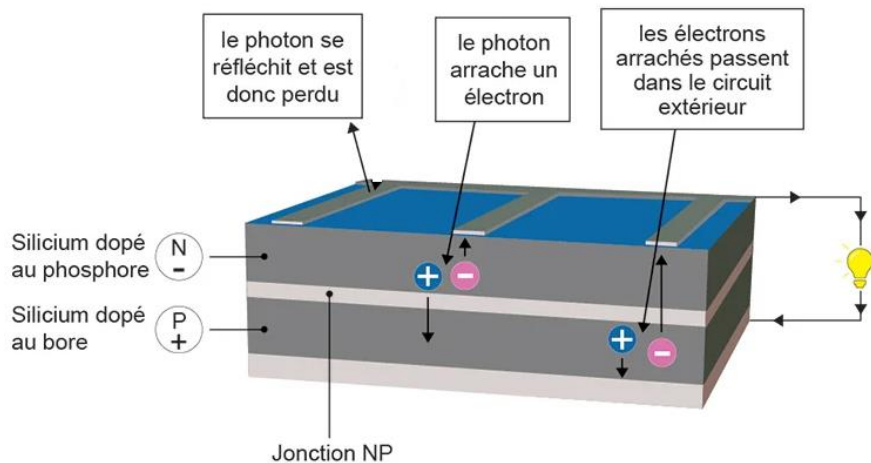


Fig. I.7: principe de fonctionnement d'une cellule solaire

I.3.5.1.4. Fonctionnement des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs. La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite: [8]

Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.

Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

I.3.5.1.5. Différents types des cellules solaires:

Il existe trois types principaux de cellules :

a) Cellules mono- cristallines :

Les cellules monocristallines qui s'approchent le plus du modèle théorique, est effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches. [9]

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Première génération de photopiles. [10]
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur

b) Cellules poly-cristallines :

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et hétérogènes. [7]

Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par : [11]

Coût de production moins élevé.

Procédé moins gourmand en énergie.

Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

c) Cellules amorphes :

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible). [7]

Coût de production bien plus bas.

- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement. [10]

I.3.5.1.6. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque :

a) Avantage :

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on site :

- une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il nécessite combustible, un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes. [1]

b) Inconvénients :

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication :

- ❖ une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ❖ le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.
- ❖ Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il

dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante. [12]

I.3.6. L'éolienne :

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement.

L'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours l'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moudre le grain ou pomper l'eau. L'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus « prometteuses » à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental.

Pendant ces dernières années l'éolien c'est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. Les avancements technologiques dans ce domaine, ne cessent de progresser . [13]

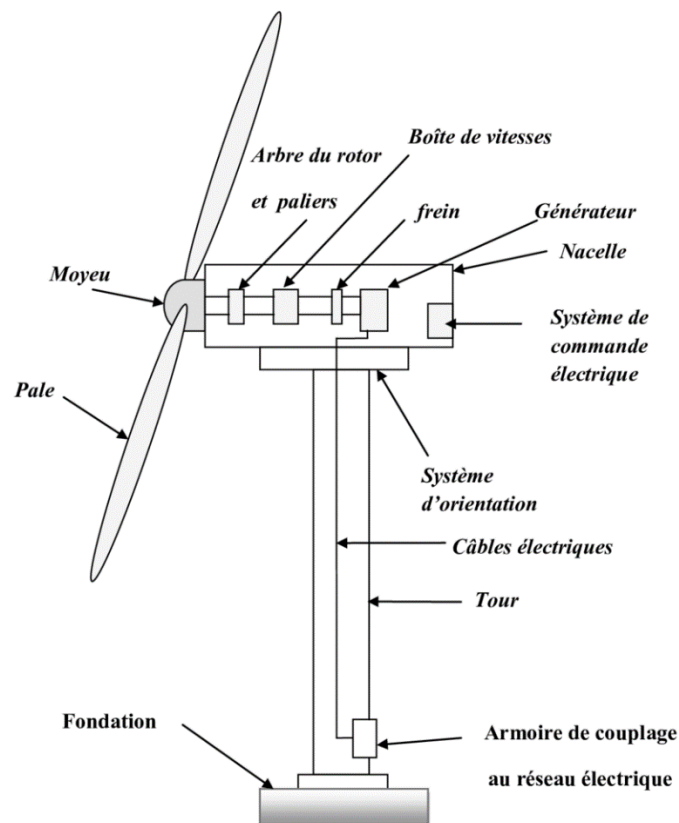


Fig. I.8 : Schéma des différents éléments de l'éolien

I.3.6.1 Constitution d'un système éolien :

Le système de conversion éolienne est principalement constitué par :

- Une turbine éolienne avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Un générateur électrique qui transforme une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique.
- Une charge électrique qui peut être statique ou dynamique, ou un réseau de distribution d'énergie électrique.
- Une interface d'électronique de puissance, qui est en général placée entre le générateur et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qui exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire, et éventuellement en régime dynamique. [14]

I.3.6.2 Classification des éoliennes :

Dans cette partie nous présentons les différentes éoliennes rencontrées dans la production de l'énergie électrique, pour cela on peut les classer selon les catégories suivantes :

I.3.6.2.1 Taille des aérogénérateurs :

Les besoins en énergie électrique conduit les chercheurs et les constructeurs à usiner des éoliennes de plus en plus puissantes ; la puissance de l'éolienne va avec la longueur des hélices.

La classification des éoliennes selon leurs tailles se réduit à trois types, les éoliennes de petites tailles, de moyenne et de grande taille. [15]

TAILLE	Diamètre de l'hélice	Puissance Délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40KW à 1MW
Grande	45 m et plus	1MW et plus

Tableau I.1: Taille des éoliennes

I.3.6.2.2. L'organe capteur :

Le but de l'organe capteur est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour des raisons de conversion d'énergie électromécanique, on cherche à obtenir un mouvement de rotation. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. [16]

a) Capteurs à axe horizontal :

Toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire un arbre principal horizontal).

Leur principal avantage revient sur leur rendement très supérieur à celui des autres types. [17]

b) Capteurs à axe verticale :

Ce type d'éoliennes ne peuvent pas démarrer toute seule, Un système de lancement s'avère donc nécessaire. Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol. [18]

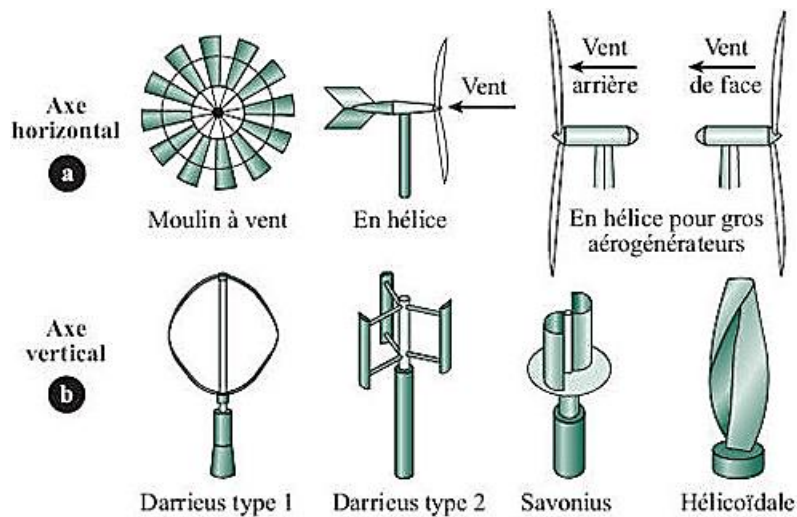


Fig. I.9 : Eolienne à axe horizontal et vertical.

I.3.6.3.Principe de Fonctionnement :

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

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [19]

I.3.6.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

a) Avantages :

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [20]
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique. [21]
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance. [22]
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles. [23]

b) Inconvénients:

- Le vent peut parfois souffler à des intensités irrégulières.
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région.
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie. [24]

I.4 Energies solaire et éolienne en Algérie :

L'intérêt pour le développement des énergies nouvelles et renouvelables a été perçu très tôt en Algérie. Toutefois, les efforts consentis dans ce domaine n'ont pas permis l'évolution attendue compte tenu de leur disponibilité et leur importance dans le développement économique et sociale.

Le potentiel techniquement exploitable en énergies renouvelables en Algérie est considérable et la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés pour leur développement. Trois raisons principales plaident en faveur d'un tel développement:

- Les énergies renouvelables constituent une solution économique viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud ;
- Les énergies renouvelables permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement
- La valorisation des énergies renouvelables ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

La Loi sur la maîtrise de l'énergie de juillet 1999 traduit la volonté et l'engagement des pouvoirs publics en faveur du développement des énergies renouvelables et fixe un nouveau cadre juridique pour la gestion et l'orientation de la demande d'énergie à tous les niveaux de la chaîne énergétique. Cette politique énergétique s'articule autour des préoccupations d'utilisation rationnelle de l'énergie, de promotion des énergies renouvelables et de protection de l'environnement.

Compte tenu des enjeux futurs que représentent ces sources d'énergies durables, les pouvoirs publics ont consacré le caractère prioritaire et stratégique des énergies renouvelables à travers un cadre législatif mis en place récemment.

En effet, les pouvoirs publics se sont engagés à accorder un soutien direct au programme de développement des énergies renouvelables notamment au profit des populations défavorisées et des régions déshéritées. [1]

I.4.1. potentiel solaire en Algérie :

L'étude de gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7 KWh/m²/jour. Elle est répartie comme suit : Au Nord : 5,6kWh/m²/jour ; Au sud : 7,2kWh/m²/jour [25]

I.4.2. Potentiel éolien :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes.

Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheïter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud [26]

Conclusion

Les énergies renouvelables représentent une part importante de notre avenir énergétique. Ils permettent un développement futur et sont une solution à nos problèmes énergétiques et environnementaux. Il existe plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'homme car elles ont un coût élevé. Leur création est due au changement climatique et à la pollution et aux gaz d'échappement des industries. Ils ont leurs propres avantages : ils sont inépuisables, respectueux de l'environnement (pas de déchet rejeté dans la nature) par rapport aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Ils permettent également de lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique. Ils sont aussi une source d'emploi. Un argument permet de parler davantage des énergies renouvelables, c'est l'épuisement des énergies fossiles (charbon, pétrole, etc.)

CHAPITRE II :
Modélisation d'un système multi sources
éolien- photovoltaïque

II.1 Introduction

La modélisation est une stratégie de représentation mathématique d'un processus technique. Son but est d'examiner théoriquement le comportement de paramètres spécifiques et de les optimiser tout en restant dans un ensemble de contraintes. A cet effet, la modélisation du système d'énergie multi-source PV-E-D est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par le système et la demande de l'utilisation. Tandis que l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année est obtenue à partir d'une étude théorique et expérimentale.

Dans ce cadre, nous présenterons dans ce chapitre d'abord, la modélisation du système hybride PV-E-D, en ce proposons l'élaboration des modèles mathématiques pour les systèmes de productions, afin de renforcer la maîtrise de leur exploitation, surtout du point de vue des écoulements des puissances de production en fonction des conditions météorologiques données ou estimées.

II -2. Modélisation d'un système hybride éolien –photovoltaïque :

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

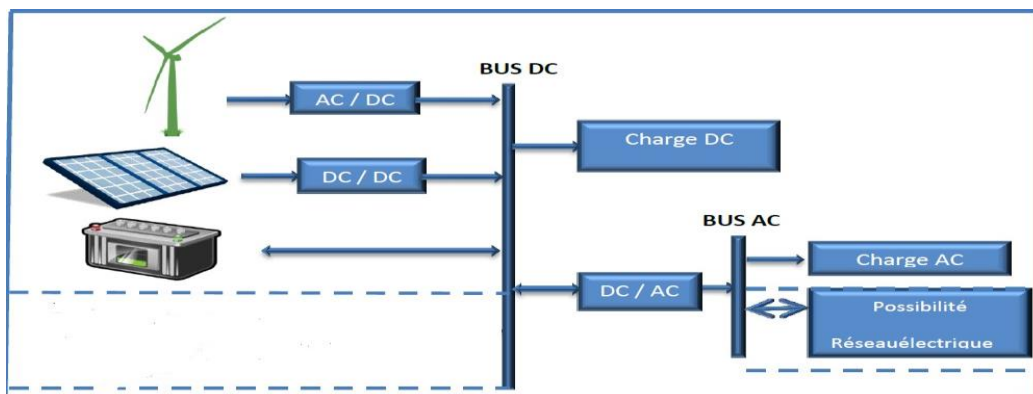


Figure II-1 : système hybride éolien –photovoltaïque

Les systèmes hybrides éolien-photovoltaïque comprennent généralement :

- Un système générateur ;
- Un système de régulation ;
- Un système de stockage ;
- Des équipements de puissance ;
- Une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs. Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu. La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

⊗ Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas, [27]

⊗ L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

II.2 .1. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

Le but de cette section est de décrire les modèles mathématiques des différents composants de la chaîne de production photovoltaïque. Ce système est basé sur des blocs modulaires, comme présenté dans la figure II-1.

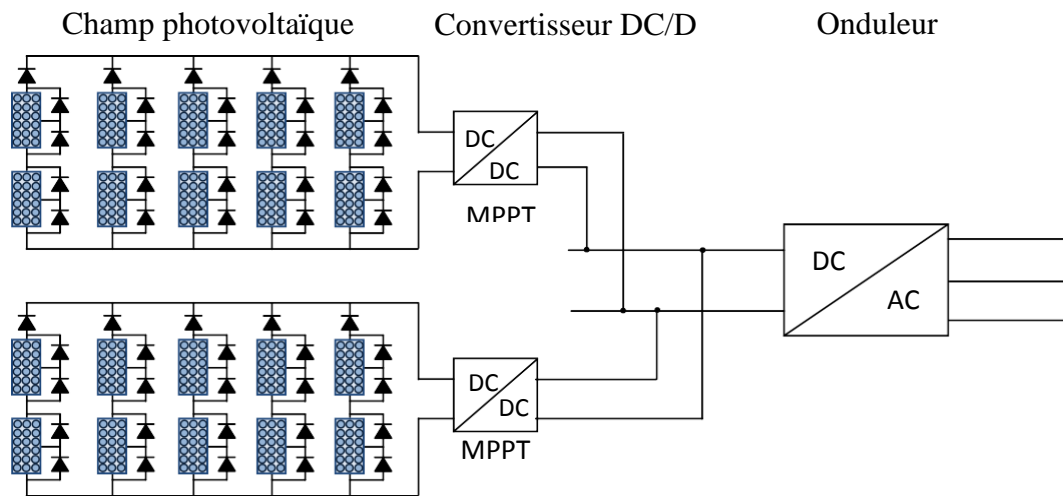


Figure II-2 : Chaîne production photovoltaïque

II.2.1.1 Modélisation du panneau photovoltaïque

L'objectif est de déterminer de la puissance fournie par les panneaux photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques c'est à dire l'éclairement dans les panneaux solaires G et leur température T_j

II.2.1.1.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle le plus classique de la littérature est le modèle à une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule associée à un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident et deux résistances (série et shunte) pour les pertes. Le circuit équivalent résultant est celui de la figure II-2. La résistance R_s représente les pertes interne dû à la circulation du courant or la résistance R_p représente correspond au courant de la fuite à la terre et il est ignoré normalement. Dans une cellule idéale $R_s = R_p = 0$ qui est une supposition commune. Le circuit équivalent d'un module PV qui consiste en une combinaison de série et cellules parallèle est le même. [28]

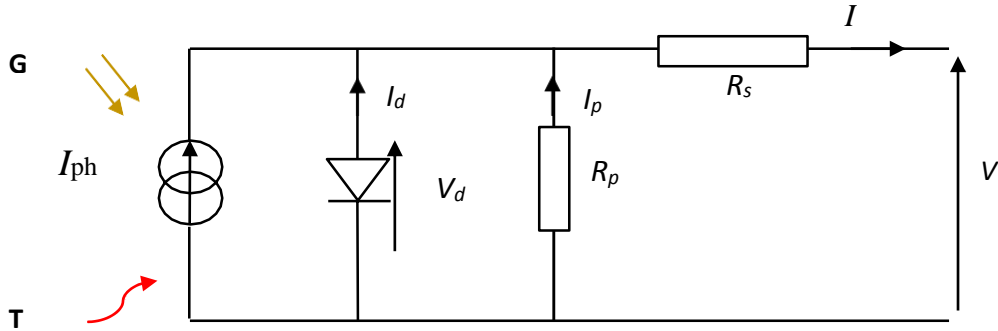


Figure II-3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

En appliquons la loi de kirchoff aux nœuds on obtient: [29]

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II.1)$$

I : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0(e^{\frac{qV_d}{AKT}} - 1) \quad (II.2)$$

$$V_d = V + R_s I \quad (II.3)$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (II.4)$$

I_0 : courant de court de saturation

T : Température de la jonction des cellules PV [°K];

K : Constante de Boltzman; ($1,38 \cdot 10^{23} \frac{J}{K^0}$)

q : Charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C);

A : Facteur d'idéalité de la jonction qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace, pour les cellules actuellement commercialisées au silicium : A=1;

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

V : La tension de sortie ;

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p ;

R_p : Résistance parallèle représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

En substituant les équations (II-2), (II-3) et (II-4) dans l'équation (II-1) le courant I_{pv} devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(v+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{v+R_s I}{R_p} \quad (II.5)$$

II.2.1.1.2. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux, présentés aussi dans la figure II-3

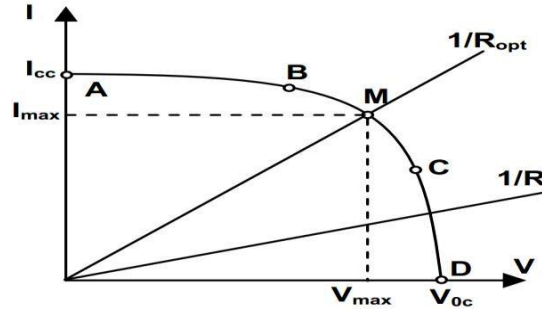


Figure II-4 : Caractéristique $I (V)$ d'une cellule photovoltaïque [30]

Courant de court circuit : $I_{cc} = I_{ph}$, est proportionnel à l'éclairement et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit ($V=0$)

La tension à vide: V_{co} correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_d=I_{ph}$), $I_c=0$

- Le Point de Puissance Maximale: c'est le point de fonctionnement $M(V_m, I_m)$ dans la figure II-3, pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.
- Le rendement maximal: c'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad (II.6)$$

Où P_{in} est la puissance incidente, G est l'éclairement et S_c est la surface de la cellule.

- Le facteur de forme: c'est le rapport entre la puissance délivrée à la charge et le produit de I_{cc} et V_{ce} :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II.7)$$

II.2.1.1.3. Modèle simplifié du module photovoltaïque

Pour un module photovoltaïque de N_s cellule en série l'équation (II-5) s'écrit comme suite: [31]

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{N_s A K T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (II.8)$$

La valeur de la résistance parallèle R_p est entre 100Ω et 10000Ω , donc $\left(\frac{V+R_s I}{R_p} \right)$ peut être négligé par rapport au Photo-courant I_{ph} . R_s est inférieur à 1Ω donc $I_{ph} = I_{cc}$ [11]

$$I = I_{cc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{V}{c_2 V_{co}}} - 1 \right) \right] \quad (II.9)$$

Au point puissance maximale: $V = V_m$ et $I = I_m$

$$I = I_{cc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{V_m}{C_2 V_{co}}} - 1 \right) \right] \quad (\text{II } 10)$$

sous la température normal on a

$$\left(e^{\frac{V_m}{C_2 V_{co}}} \right) \gg 1 \quad C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) e^{\frac{-V_m}{C_2 V_{co}}} \quad (\text{II } 11)$$

Au moment de circuit ouvert : $V = V_{co}$ et $I = 0$ on a

$$0 = I_{cc} \left[1 - \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) e^{\left(\frac{-V_m}{C_2 V_{co}} \right)} \left(e^{\frac{1}{C_2}} - 1 \right) \right] \quad (\text{II } 12)$$

sous la température normal on a

$$e^{\frac{1}{C_2}} \gg 1 \quad C_2 = \frac{\left(\frac{V_m - 1}{V_{co}} \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right)} \quad (\text{II } 13)$$

On voit qu'avec les paramètres communs comme V_{co} , I_{cc} , V_m et I_m , C_1 et C_2 peut être calculé et le modèle de la cellule photovoltaïque peut être créé.

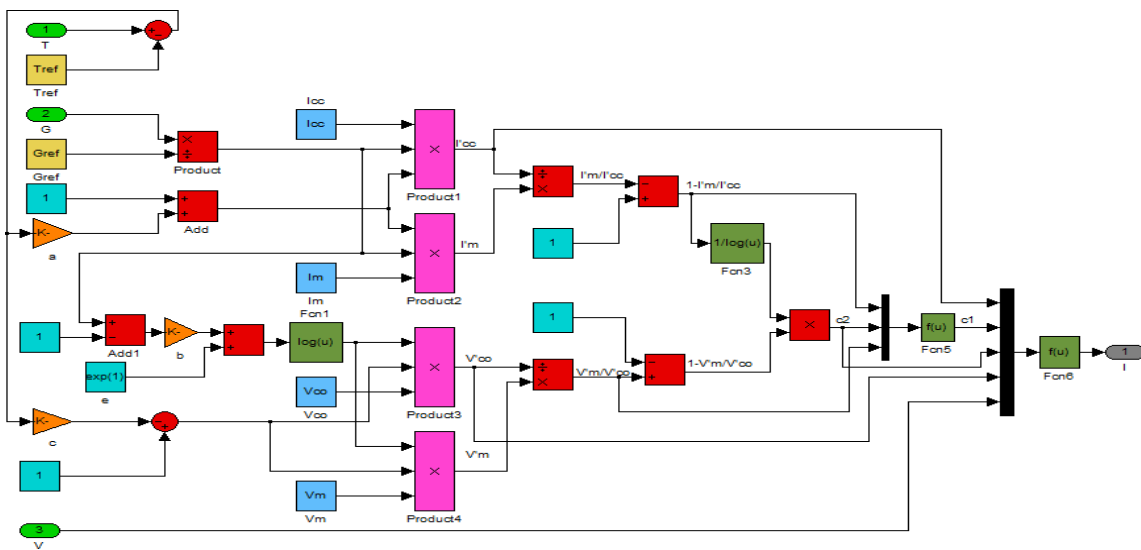


Figure II-5 : Schéma block global d'un panneau photovoltaïque sous matlab-simulink

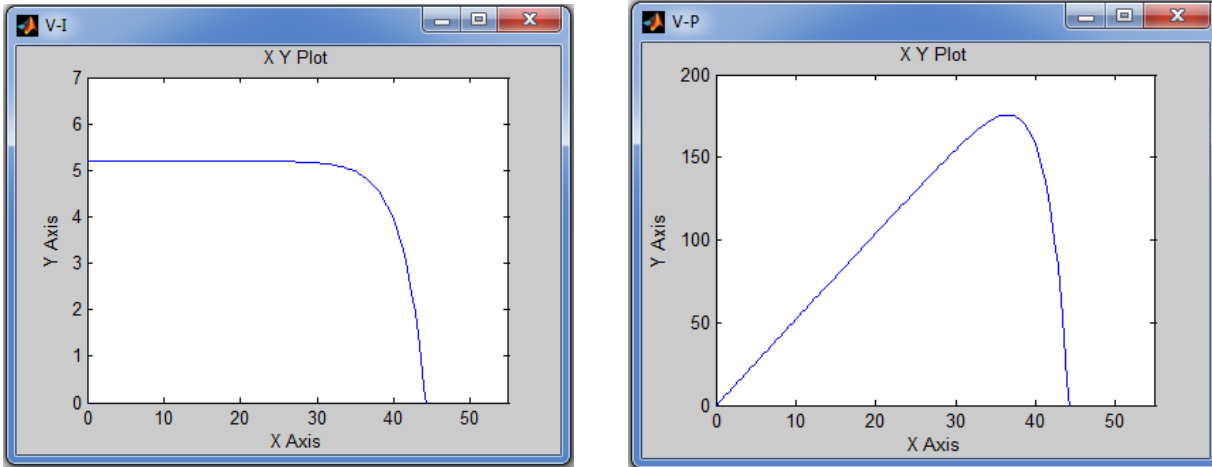


Figure II-6 : (a) Caractéristique Tension/Courant (b) Tension/Puissance d'un panneau PV

II.2.1.1.4 Paramètres externe de la cellule photovoltaïque

Les valeurs des paramètres communs du panneau photovoltaïque change avec le changement de température du panneau et l'irradiation. En utilisant un modèle mathématique approprié pour avoir la relation entre les paramètres du module photovoltaïque et les paramètres de l'environnement. [32]

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (II.14)$$

$$\Delta G = \frac{G}{G_{ref}} - 1 \quad (II.15)$$

$$I_{CC} = I_{CC} \frac{G}{G_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (II.16)$$

$$I'_m = I_m - \frac{G}{G_{ref}} (1 + a\Delta T) \quad (II.18)$$

$$V'_m = V_m (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta G) \quad (II.19)$$

Où : les coefficients $a = 0,0025/^\circ C$, $b = 0,5$ et $c = 0,00288/^\circ C$

Pour distinguer entre les paramètres en différents conditions nous défini :

- Dans les conditions standards I_{CC_ref} , V_{co_ref} , I_{m_ref} , V_{m_ref} et G_{ref}
- Dans les conditions actuelles I_{CC} , V_{co} , I_m , V_m et G
- Dans les conditions prévues I_{CC}' , V_{co}' , I_m' , V_m' et G'

Pour avoir les caractéristique du module photovoltaïque il suivre les étapes suivantes : [28]

– Premièrement il faut remplacer les paramètres sous-dessus aux équations de (II-16) à (II-19).

- Dans les conditions standards $I_{CC_}$, V_{co_ref} , I_{m_ref} , V_{m_ref} et G_{ref}

- Dans les conditions actuelles I_{cc}, V_{co}, I_m et G
- Dans les conditions prévues $I'_{cc}, V'_{co}, I'_m, V'_m$ et G'

Pour avoir les caractéristique du module photovoltaïque il suivre les étapes suivantes: [28]

- Premièrement il faut remplacer les paramètres sous-dessus aux équations de(II-16) à (II-19)

$$I_{cc_ref} = \frac{I_{cc}G_{ref}}{G(1+a\Delta T)} \quad (II.20)$$

$$V_{co_ref} = \frac{V_{co}}{(1-c\Delta T)\ln(e+b\Delta G)} \quad (II.21)$$

$$I_{m_ref} = \frac{I_mG_{ref}}{G(1+a\Delta T)} \quad (II.22)$$

Deuxièmement il faut remplacer les paramètres des équations de (II-16) à (II-19) aux équations de (II-20) à (II-23).

$$\Delta T' = T' - T'_{ref} \quad (II.24)$$

$$\Delta G' = \frac{G'}{G_{ref}} - 1 \quad (II.25)$$

$$I'_{cc} = \frac{I_{cc}G(1+a\Delta T')}{G(1+a\Delta T)} \quad (II.26)$$

$$V'_{co} = \frac{V_{co}(1-c\Delta T')\ln(e+b\Delta G')}{(1-c\Delta T)\ln(e+b\Delta G)} \quad (II.27)$$

$$I'_m = \frac{I_mG(1+a\Delta T')}{G(1+a\Delta T)} \quad (II.28)$$

$$V'_m = \frac{V_m(1-c\Delta T')\ln(e+b\Delta G')}{(1-c\Delta T)\ln(e+b\Delta G)} \quad (II.29)$$

II.2.2 Modélisation et commande des convertisseurs (DC -DC)

Le convertisseur DC/DC est le circuit qui transfère la puissance maximale du générateur photovoltaïque vers la charge. Ce dispositif adapte la tension d'entrée pour une charge donnée. Le convertisseur DC-DC dans cette étude est un hacheur survolteur. Le modèle du hacheur a été simplifié en utilisant le théorème des valeurs moyennes (Figure II-7).

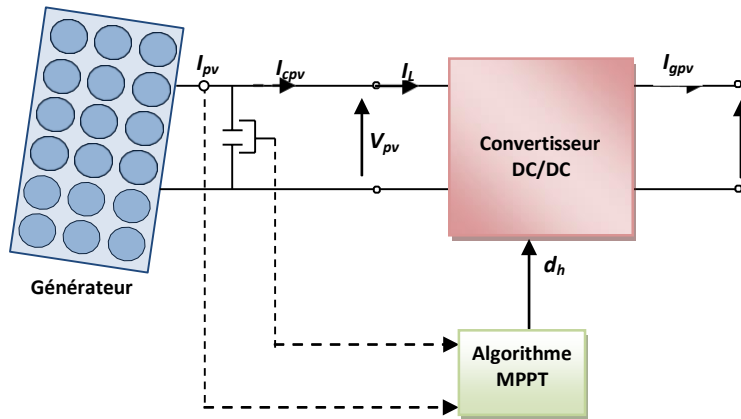


Figure II-7 : Schéma détaillé du système de conversion photovoltaïque

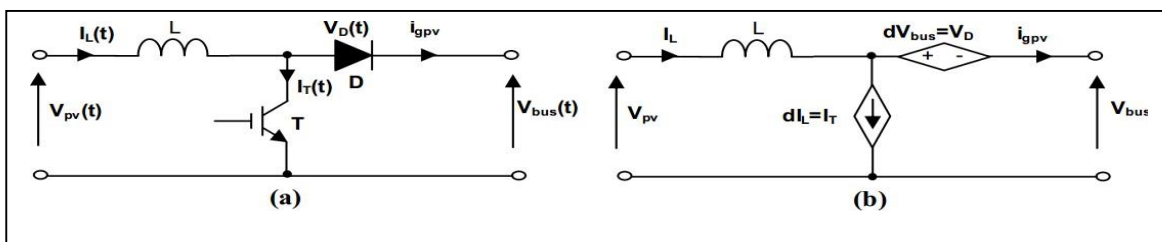


Figure II-8 : (a) Hacheur survolteur à commutation, (b) Hacheur survolteur à valeurs moyennes

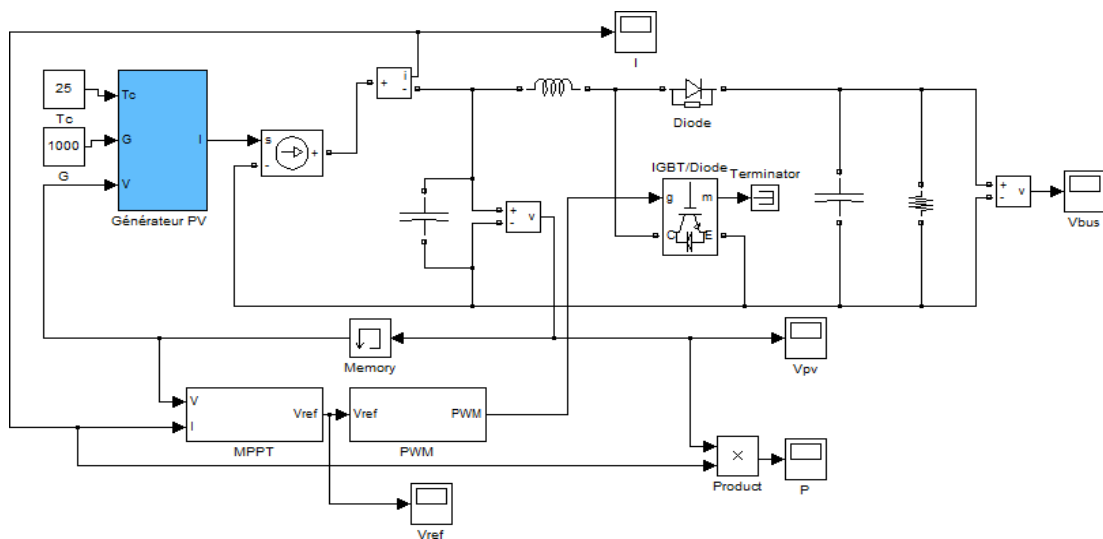


Figure II-9 : Modèle de la chaîne photovoltaïque sous Matlab-simulink

II.2.3. Point de Puissance Maximale

Comme il est présenté dans la figure II-8, pour produire la puissance maximale il existe un seul point sur la caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque. Quand un panneau est connecté directement sur une batterie (couplage direct), en général le point de fonctionnement n'est pas le Point de Puissance Maximale (MPP maximum power point)

figure II-9. La puissance délivrée par les panneaux PV dépend de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes. Ainsi, dans un système à couplage direct, le système PV doit être surdimensionné pour assurer la puissance demandée par la charge. Pour optimiser le rendement énergétique du système PV, une solution est l'utilisation d'un MPPT (Maximum Power Point Tracker). Celui-ci permet de suivre le point de puissance maximale en contrôlant la tension ou le courant PV indépendamment de la charge.

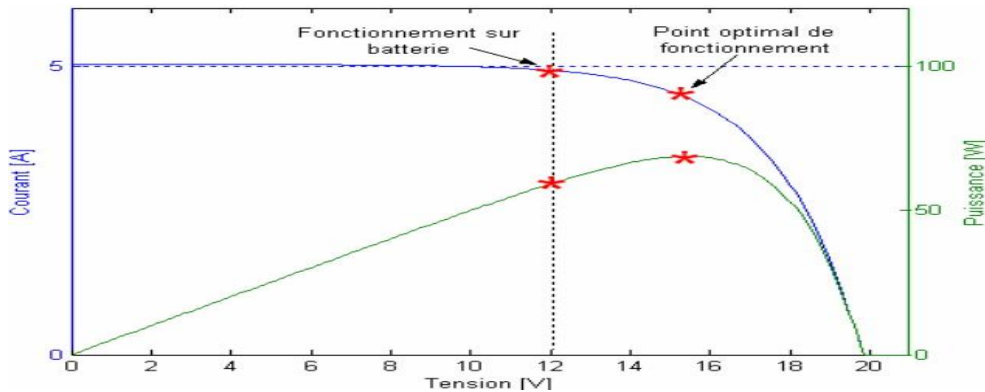


Figure II-10 : Caractéristique Courant/Tension/Puissance d'un panneau photovoltaïque

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation du MPPT. De bons résultats sont obtenus avec l'algorithme « incrémentation de la conductance », L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement. C'est cet algorithme qui a été choisi pour la commande du MPPT étudié dans le cadre de ce travail et sa description sera présentée par la suite. La puissance produite par le générateur PV peut être exprimée par :

$$P_{pv} = I_{pv} V_{pv} \quad (\text{II.30})$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation (II-30) par rapport à la tension V_{pv} :

$$\frac{I}{V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.31})$$

Ainsi, on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance :

$$E = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.32})$$

$$\Delta E = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.33})$$

Comme il est présenté dans la figure II-10, l'algorithme cherche le point pour lequel la conductance est égale à la conductance incrémentée

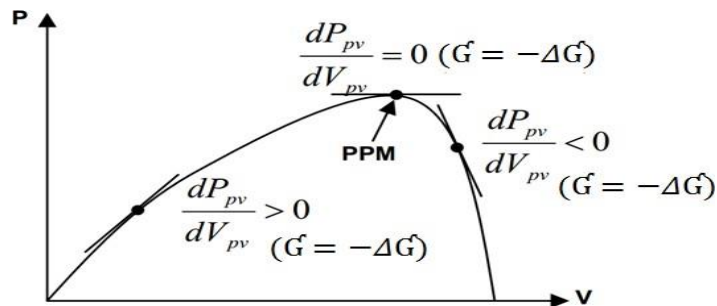


Figure II-11 : Recherche du MPP par la méthode de l'incrémentation de la conductance

L'algorithme, basé sur la surveillance de la tension et du courant, est illustré dans le diagramme-bloc présenté dans la figure II-11.

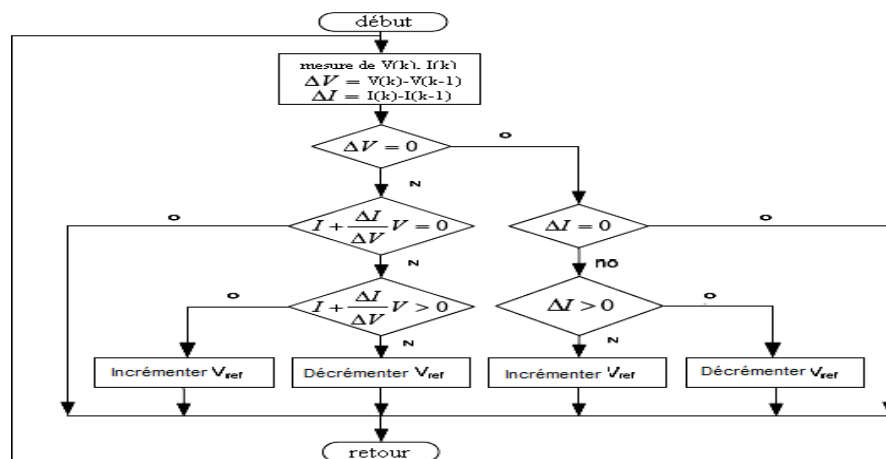


Figure II-12 : Bloc-diagramme de l'algorithme MPPT « Incrémentation de la conductance »

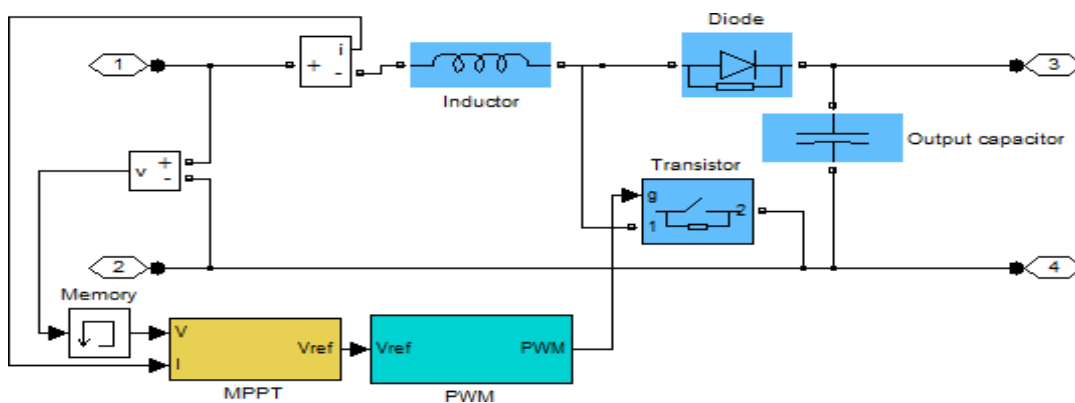


Figure II-13 : Convertisseurs (DC -DC) avec MPPT sous Matlab-simulink

II.3. Modélisation de la chaîne de production éolienne

Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne (Figure II-13). [4]

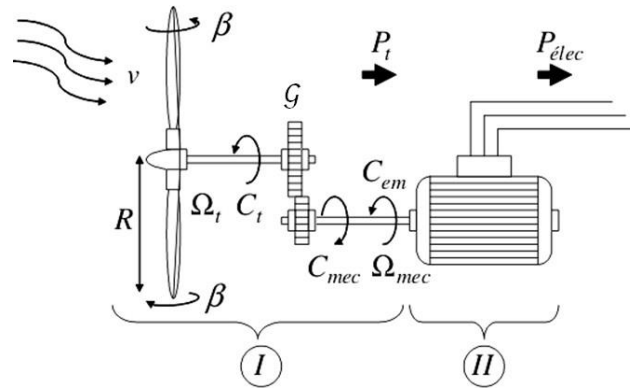


Figure II-14 : Modèle de la turbine éolienne

II.3.1. Modélisation de la vitesse du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'avoir un profil de vent reflétant au maximum la réalité de ce que l'on peut trouver sur un site éolien. La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude (Figure II-14), sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (\text{II.34})$$

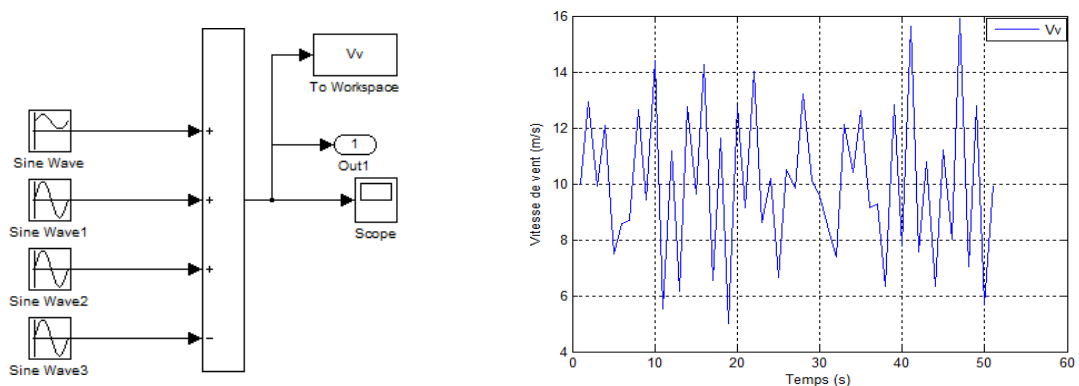


Figure II-15 : Modèle et résultat de la vitesse de vent sous Matlab-simulink

II.3.2. Modèle de la turbine éolienne

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure II-15. La turbine éolienne est caractérisée par les courbes du coefficient de puissance C_P qui est une fonction du rapport de vitesse $\lambda = \frac{R\Omega_t}{v}$ et de l'angle de calage des pales β (deg).

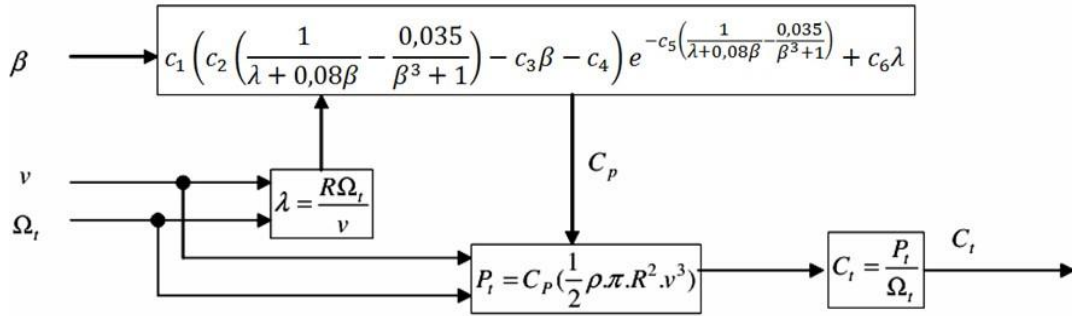


Figure II-16 : Configuration d'une éolienne

Où :

Ω_t = Vitesse angulaire mécanique (rad/s mécanique) de la turbine.

V_v = Vitesse du vent (m/s).

ρ = Densité de l'air 1.22 (kg /m³) à la pression atmosphérique à 15°C.

R = Rayon de la turbine = longueur de pale en (m).

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance C_P est donné par la relation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right) - C_3\beta - C_4 \right) e^{-C_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)} + C_6\lambda$$

$$c_1=0.5109 \quad c_2=116 \quad c_3 = 0.4$$

$$\text{Avec } c_4 = 5 \quad c_5=21 \quad c_6 = 0.0068$$

La figure II-17 illustre les courbes de $C_P(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation (II.34).

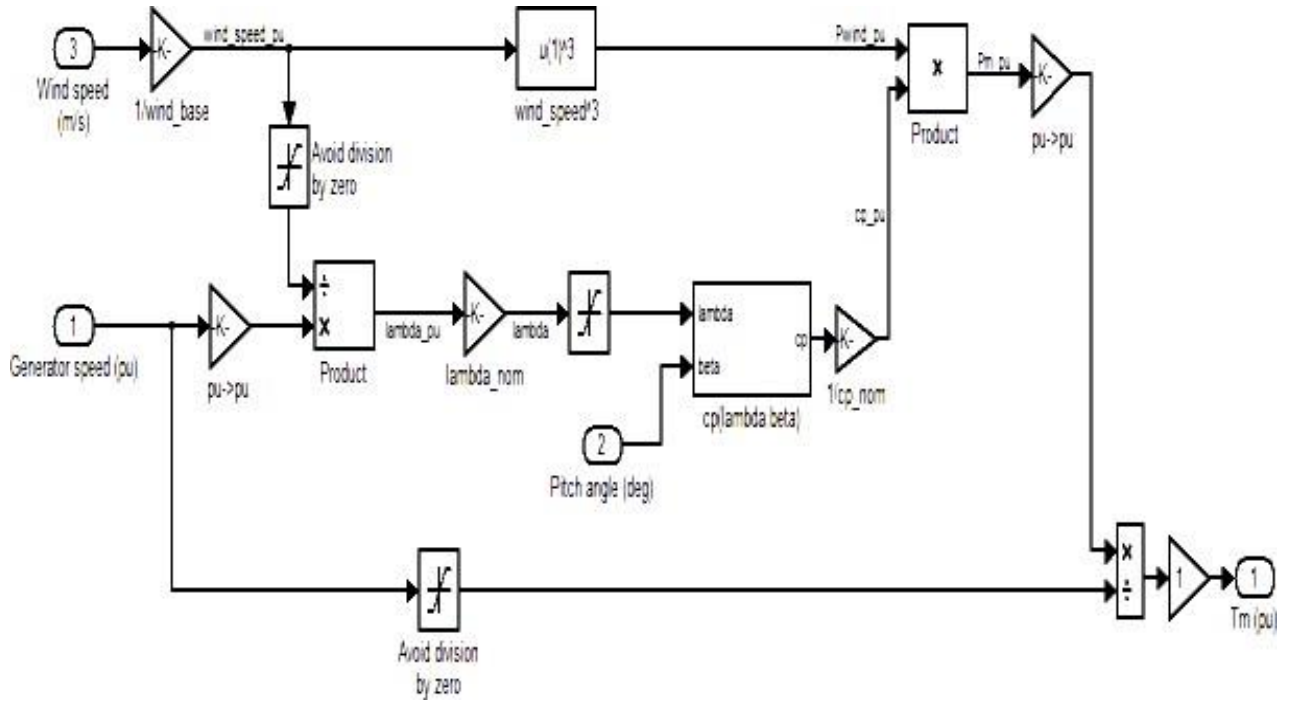


Figure II-17 : Modèle de la turbine sous Matlab-simulink

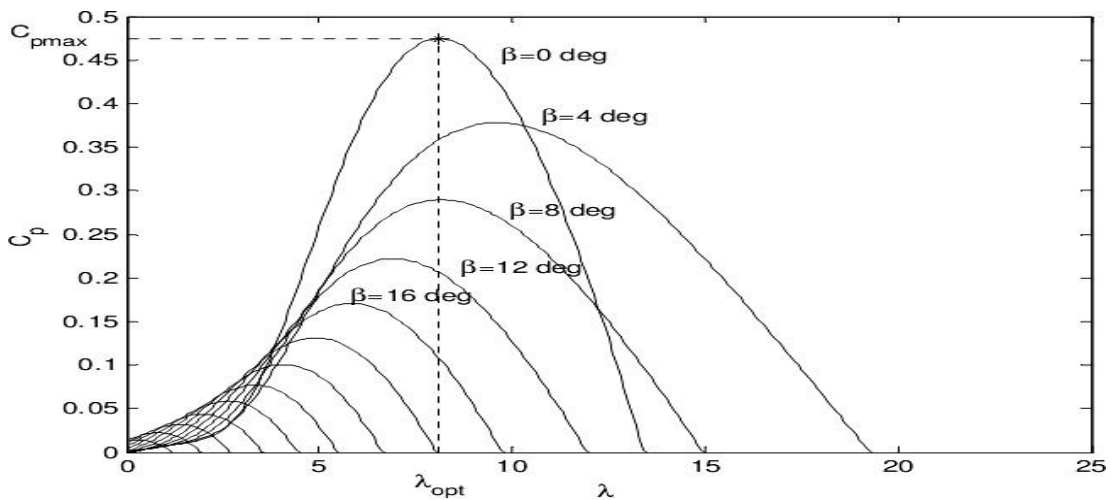


Figure II-18 : Courbes du coefficient $C_P(\lambda, \beta)$

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{0.5 C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega_t} \text{ en } (N.m) \quad (II\ 36)$$

II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et

modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (\text{II } 37)$$

Où :

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

G : Rapport de multiplication (-).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.38})$$

Où :

Ω_{mec} : Vitesse du générateur (rad/s mécanique).

II.3. 4.Modèle de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant :

$$J \frac{\Omega_{mec}}{dt} = C_t - f_v \Omega_{mec} \quad (\text{II } 39)$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes ($kg.m^2$).

$C_t = C_{mec} + C_{em}$: Couple total de l'éolienne.

f_v : Coefficient de frottements visqueux.

C_{em} : Couple électromagnétique du générateur en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif. [33]

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + J_{Générateur} \quad (\text{II } 40)$$

II.3.5.Modèle de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (Pitch

control). En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, voir la figure (II.18). Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

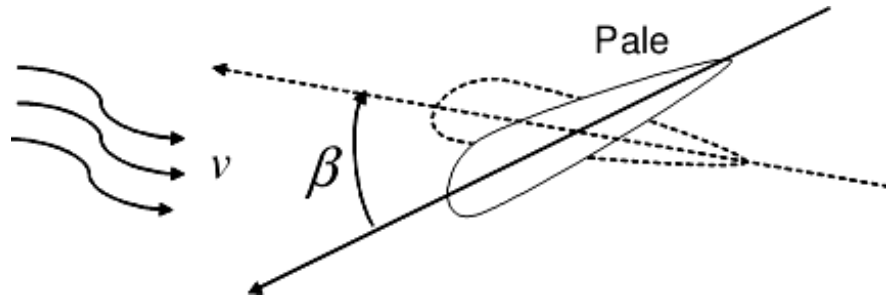


Figure II-19 : Orientation des pales

Le système d'orientation de l'angle des pales est approché par une fonction de transfert de 1^{er} ordre. Cet actionneur est commandé en boucle fermée pour asservir l'angle de calage des pales β avec des contraintes sur β , voir la figure II-19.

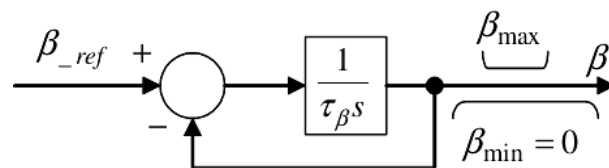


Figure II-20 : Modèle et commande du système de calage de pale

Où :

τ_β : Constante de temps de l'actionneur (s).

β_{min}, β_{max} : Limites de l'angle de calage des pales dépendant de la conception physique.

s : Opérateur de Laplace.

β_{ref} : Référence d'angle reçue du processus de la commande de la puissance électrique.

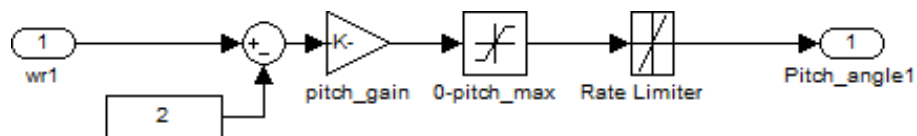


Figure II-21 : Modèle sous simulink du système de calage de pale

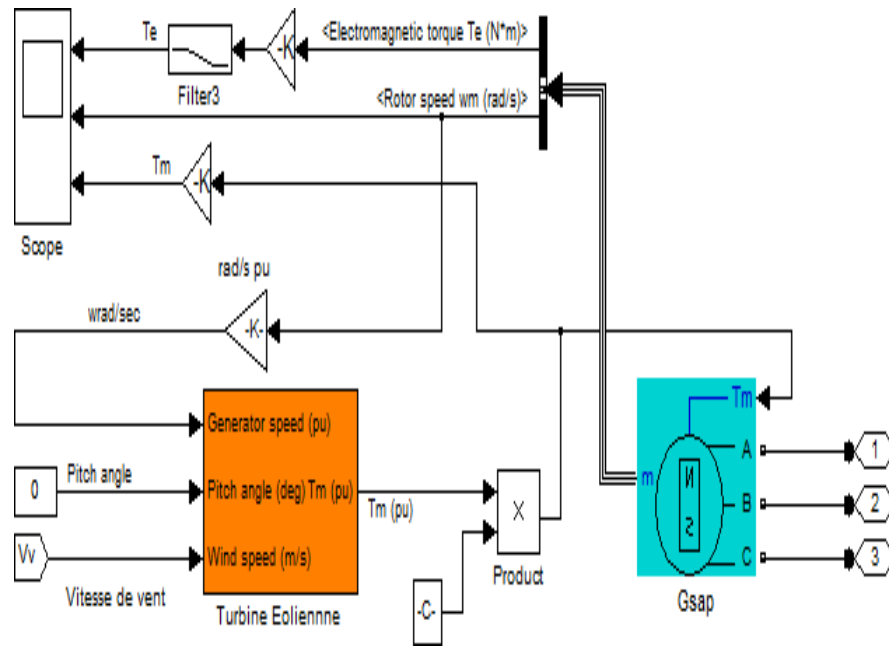


Figure II-22 : Modèle complet de la turbine éolienne

II.3. 6.Modélisation de la génératrice

II.3.6.1.Modélisation de la génératrice synchrone a aimant permanent (GSAP)

La génératrice synchrone à aimant permanent est modélisée en considérant les mêmes hypothèses de la machine asynchrone. L'expression des tensions des phases du stator de la machine est donnée par la relation suivante :

- Expression des tensions et flux statoriques.

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_a][I_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \\ [\phi_{abc}] = [L_{tt}][I_{abc}] + [\phi_{abc}] \end{cases} \quad (\text{II } 41)$$

L'application des transformations de Park fait aboutir aux équations des tensions du stator et des flux :

$$\begin{cases} V_d = R_a I_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega_s \Phi_q \\ V_q = R_a I_q + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega_s \Phi_d \\ \Phi_d = L_d I_d + \Phi_e \\ \Phi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II } 42)$$

L_d, L_q : Respectivement les inductances directe et quadratique du stator.

V_d, V_q : Respectivement tension statoriques direct et quadratique. I_d, I_q : Respectivement courant statoriques direct et quadratique. Φ_d, Φ_q : Respectivement flux statoriques direct et quadratique.

En combinant les expressions II.41 et II.42, on aboutit à la représentation sous la forme d'équations d'état suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_d} & \frac{\omega L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega L_q}{L_d} & -\frac{R_a}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{V_q - \omega \Phi_e}{L_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II 43})$$

Le couple électromagnétique sera exprimé par :

$$C_{em} = P (L_d - L_q I_d + \Phi_e) I_q \quad (\text{II.44})$$

Φ_e : Flux d'aimant permanent par pôle.

II.3. 6.2. Commande de la GSAP

II.3. 6.2.1. Commande PI standard

La commande sera structurée autour de deux boucles de contrôle des courants I_{sd} et I_{sq} . La mise en œuvre de termes de découplage en réalisant une compensation des effets des perturbations connues permet de transformer le système multi variables des équations statoriques en deux systèmes mono variables indépendants. Ceci simplifie l'étude des correcteurs de type PI. [34]

Les sorties des correcteurs s'appliquent alors aux systèmes mono variables suivants :

$$\begin{cases} V_{cd} = R_a I_{sd} + L_a \frac{dI_{sd}}{dt} \\ V_{cq} = R_a I_{sq} + L_a \frac{dI_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II 45})$$

II.3.6.2.2. Mode glissant d'ordre supérieur

Les adaptations effectuées se résument très simplement dans les trois équations qui suivent. Dans ce cadre, nous considérons l'erreur suivante :

$$e = C_{ref} - C_{em} \quad (\text{II.46})$$

et la commande suivante :

$$u = -\gamma |e|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(e) + u_1 \quad (\text{II 47})$$

$$\text{Ou :} \quad u_1 = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > U_M \\ -(e)si & |u| \leq U_M \end{cases} \quad (\text{II } 48)$$

II.4. Modélisation du système de stockage

II.4.1. Modèle de Copetti de batterie au plomb

Parmi les modèles des batteries, celui basé sur l'observation du phénomène physico-chimique de la charge et de la décharge du système de stockage. Ce modèle est basé sur le schéma électrique (Figure II-22), la batterie est alors décrite par seulement deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres : une source de tensions et sa résistance interne. [35]

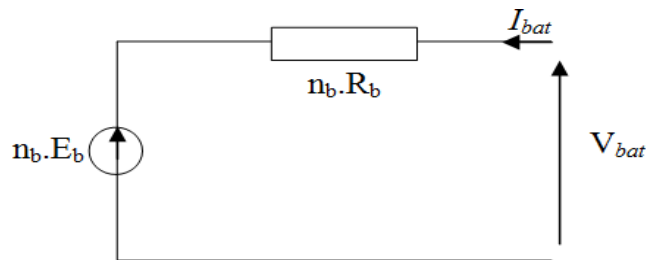


Figure II-23 : Schéma électrique équivalent de n_b éléments de batteries en séries

II.4.2. Modèle de la capacité de la batterie

La capacité représente la quantité du courant qui peut être extraite d'une électrode via les "masses actives", c'est-à-dire l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes, sur une décharge, et en pratique, elle dépend du courant moyen \bar{I} , ainsi que de la température.

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement \checkmark_{10} , dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25°C.

$$C = C_{10} \frac{1,67}{1 + 0,67 \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0,9}} (1 + 0,005 \cdot \Delta T) \quad (\text{II } 49)$$

La capacité \checkmark sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie "SOC», Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie "Q" [36]

$$soc = 1 - \frac{c}{Q} \quad (II\ 50)$$

L'évolution temporelle de "Q" dépend du mode de fonctionnement de la batterie.

II.4.3. Modèle de la tension de la batterie

Le modèle suivant, décrit la relation entre la tension, le courant et l'état de charge.

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot E_b(t) + n_b \cdot R_b \cdot I_{bat}(t) \quad (II.51)$$

Où $V_{bat}(t)$ et $I_{bat}(t)$ sont la tension et la courante batterie au temps t , R_b la résistance interne de batterie.

$$E_b(t) = V_F + b \cdot \log(EDC) \quad (II.52)$$

Où V_F est la force électromotrice, b est une tension empirique.

Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètre	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
b	0.810	0.724

Tableau II-1 : Paramètres Pour une batterie de plomb acide

II.4.4. Modèle de la charge de la batterie

Au moment quand les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut s'écrire avec l'équation :

$$C_{bat}(t) = (t - 1)(1 - \sigma) + \left(\frac{P_{ch}(t) - \left(\frac{P_l(t)}{\eta_{ond}} \right)}{\eta_{bat}} \right) \quad (II\ 53)$$

$C_{bat}(t)$ et $C_{bat}(t - 1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_c est la puissance fournie à la batterie pour le chargement, $P_l(t)$ est la charge demandée au temps t , η_{ond} et η_{bat} sont le rendements de l'onduleur et de la batterie successivement. Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0,65 à 0,85 selon le chargeant courant par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie à été mis égal à 1.

II.4.5. Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut exprimer comme suite:

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1)(1-\sigma) + \left(\frac{P_L(t)}{\eta_{ond}} - P_{ch}(t) \right) \quad (II.54)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{bat\ min} \leq C_{bat}(t) \leq C_{bat\ max} \quad (II.55)$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{bat\ max} = C_{bat\ N}$), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge *DOD* (Depth Of Discharge) [37]

$$C_{bat\ min} = DOD \cdot C_{bat\ N} \quad (II.56)$$

La valeur maximale de l'état de charge (*SOC*) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $SOC_{min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si *DOD* prend les valeurs de 30-50%. La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie. Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{bat} \cdot F_{dech} \cdot DOD} \quad (II.56)$$

$$C_{bat} = [Ah] \frac{C_{bat}}{V_{bat}} \quad (II.57)$$

C_{bat} : La capacité de stockage de la batterie.

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_{Bat} : La tension de la batterie.

DOD : La profondeur de décharge.

II.5. Modélisation des convertisseurs statiques

Dans un système multi-sources, deux types de convertisseurs sont souvent rencontrés : les redresseurs et les onduleurs.

II.5.1. Redresseur

Les redresseurs servent à convertir la tension triphasée sinusoïdale du bus AC en tension continue pour charger les batteries. Il existe deux types de redresseurs AC/DC redresseurs non commandés et commandés. Les redresseurs non commandés sont normalement appelés à diode (ou pont de diodes). La figure II-23 montre un redresseur un triphasé typique . Dans le cadre de cette étude, on utilise un redresseur à diodes. Les diodes sont supposées idéales et, par conséquent, leur conduction correspond à un court-circuit et leur blocage

correspond à un circuit ouvert. Lorsque $D1$ conduit l'une des deux diodes $D2'$ et $D3'$ conduit également; il en vient que $D1$ conduit lorsque $V1$ est supérieur à $V2$ et $V3$. [38]

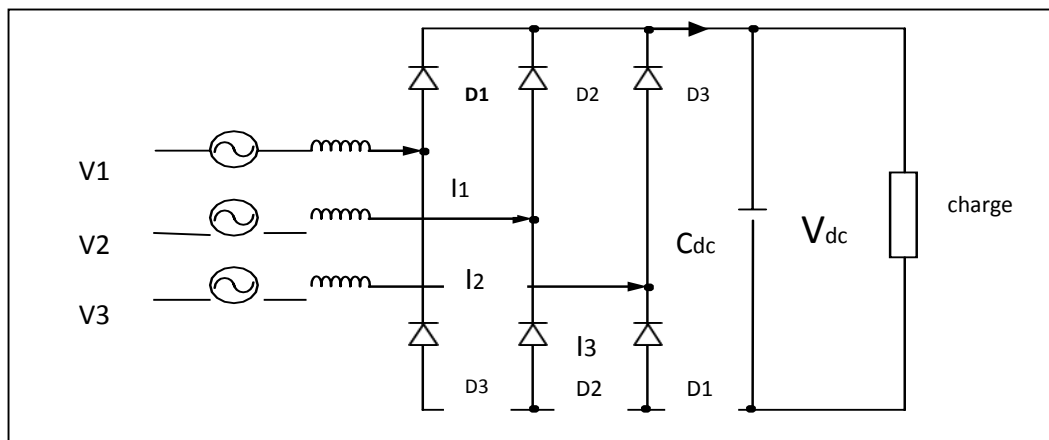


Figure II-24 : Redresseur triphasé a pont de diodes

II.5.2. Modélisation du convertisseur DC-AC

II.5.2.1 Modélisation l'onduleur de tension

L'association d'un transistor T_i et d'une diode D_i donne un composant bidirectionnel K_i . Comme les commandes des deux transistors du même bras sont complémentaires, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure II-24:

Soit F_i l'état de l'interrupteur K_i , il est donné par :

$$\begin{aligned} F_i = 0: & \text{ si } T_i \text{ est fermé et } T' \text{ est ouvert} \\ F_i = 1: & \text{ si } T_i \text{ est ouvert et } T' \text{ est fermé} \end{aligned} \quad (\text{II.59})$$

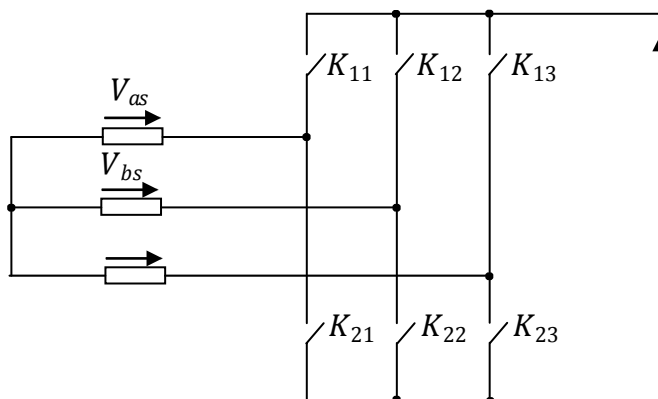


Figure II-25 : Représentation des composants bidirectionnels

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} F_1 - F_2 \\ F_2 - F_3 \\ F_3 - F_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II } 60)$$

Par conséquent, les tensions simples et le courant I_s à l'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des fonctions logiques comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 2F_1 - F_2 - F_3 \\ -F_1 \quad 2F_2 - F_3 \\ -F_1 \quad -F_2 \quad 2F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II } 61)$$

$$I_s = F_1 \cdot I_{sa} + F_2 \cdot I_{sb} + F_3 \cdot I_{sc} \quad (\text{II } 62)$$

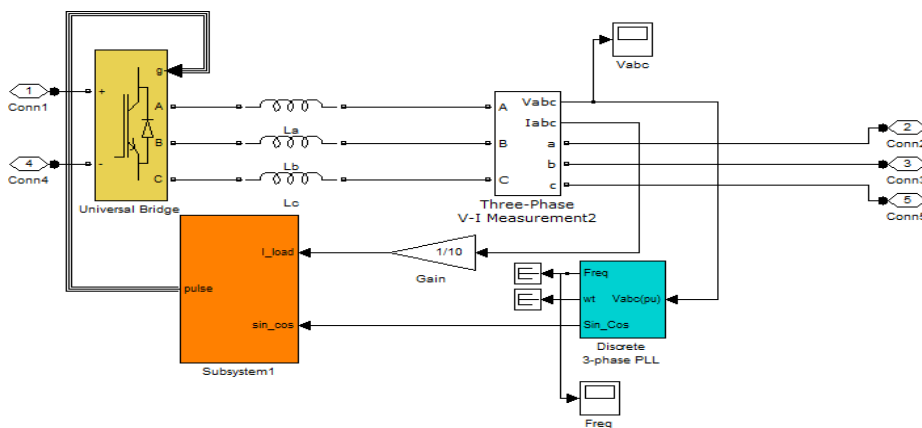


Figure II-26 : Modèle simulink de la commande de l'onduleur

II.5.2.2. Modulation de Largeur D'impulsion M.L.I.

Le MLI permet de former chaque alternance de la tension de sortie de plusieurs créneaux. Pour obtenir cela, il faut adopter certaine technique de commande des interrupteurs de l'onduleur. La stratégie triangulo-sinusoïdale est l'une des techniques les plus simples. Elle consiste à comparer les trois tensions de référence (Va^* , Vb^* , Vc^*) à un signal (porteuse) triangulaire d'amplitude fixe et de pulsation nettement supérieur à celle des tensions de référence. ($F=10$ kHz).

La stratégie triangulo-sinusoïdale est caractérisée par deux paramètres qui sont l'indice de modulation m qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence et r le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse.

Les instants de commutation sont obtenus par comparaison de trois tensions de référence avec le signal triangulaire [38]

Conclusion :

Présente la recherche sur la conception d'une nouvelle stratégie de contrôle pour les systèmes d'alimentation hybrides autonomes. Le système considéré est composé de deux sources, un groupe de panneaux photovoltaïques et une éolienne de faible puissance, et de deux types de stockage, un banc de batteries lithium-ion et un de supercondensateurs. Face au problème de gestion de l'énergie dans un système électrique hybride, et à la nécessité de maximiser la puissance produite, nous envisageons de développer une stratégie de contrôle basée sur l'énergie. Pour cela, nous présentons la modélisation Euler-Lagrange et la modélisation hamiltonienne du système. Ces modèles permettent d'utiliser la propriété de passivité, puis de concevoir des contrôleurs basés sur la passivité pour chaque source, afin de maximiser sa production, et pour les supercondensateurs, d'assurer un partage de puissance adapté entre les batteries et celles-ci. Les contrôleurs sont enfin implémentés dans un simulateur, puis dans un banc de test expérimental, afin de comparer leurs performances à des solutions préexistantes, et de valider la loi de commande du système hybride global.

Chapitre III :

**Méthodes MPPT appliquées aux
Systèmes Eolien-Photovoltaïque**

III.1. Introduction

Compte tenu du coût élevé des générateurs photovoltaïques et de la faible efficacité des développement de cette énergie à grande échelle nécessitera avant tout une amélioration de ces systèmes. afin qu'ils puissent fonctionner à pleine capacité en tout temps.

L'énergie des photons convertis en électricité est, en fait, une fonction très variable qui fluctue en fonction de l'éclairage, de la température et de la charge connectée au générateur photovoltaïque. En conséquence, un système de conversion de l'énergie éolienne se compose d'une turbine avec son propre ensemble de caractéristiques et dépend d'éléments de construction qui déterminent sa capacité à récolter de l'énergie à partir de masses d'air en mouvement. Le générateur est relié à l'aile par un multiplicateur.

Pour remédier à ces influences, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point afin de permettre à ces dispositifs hybrides de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit les conditions climatiques. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT) [39]

Dans ce chapitre, nous allons exposer succinctement les différentes architectures des chaînes de conversion Eolien, Photovoltaïque, MPPT, ainsi que le principe de la poursuite du Point De Puissance Maximale (PPM) avec des différentes méthodes.

III.2. Définition de la commande MPPT :

Les éoliennes et les capteurs solaires utilisés pour produire de l'électricité ont des caractéristiques de puissance / tension non linéaires en raison de l'irrégularité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire, avec la présence de plusieurs extrémités (PPM: Points de puissance maximale) qui varient avec la température, la lumière, la vitesse du vent et la direction. En conséquence, ces générateurs doivent être capables de produire une puissance maximale en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. De nombreux systèmes de contrôle, fonctionnant au niveau des composants mécaniques ou électriques, ont été conçus pour maximiser la conversion d'énergie afin d'atteindre cet objectif.

On parle alors ici d'un organe de commande qui, quelles que soient les conditions d'utilisation, assure que le système opère au PPM, ce type de commande est souvent nommé dans la littérature la commande MPPT.

Une connexion directe entre un générateur PV et/ou éolien et sa charge a peu de chance de placer le système à son point de fonctionnement maximum (noté **MPP** pour **Maximum Power Point**). La commande **MPPT** (**Maximum Power Point Tracking**) est un organe fonctionnel de ces systèmes qui permet de chercher le point de fonctionnement optimal des générateurs qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge [40]

Le MPPT a donc pour rôle de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) à partir d'un variateur à courant continu (convertisseur statique) qui assure l'adaptation entre les conditions d'opération optimales (I_{OPT} , V_{OPT}) avec les paramètres de fonctionnement (V , I) du système (Figure III -1).

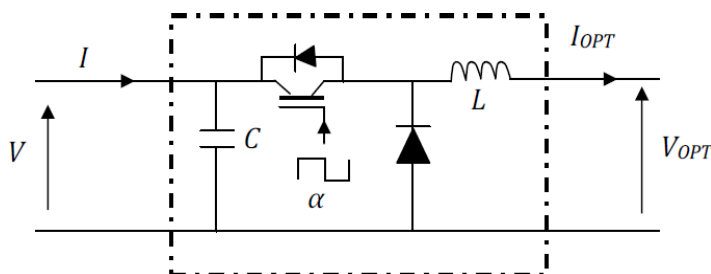


Figure III -1: Schéma synoptique d'une commande MPPT.

Malgré que les caractéristiques puissance/tension que présentent les générateurs PV

et éoliens sont presque similaires, ces deux sources énergétiques ont un comportement totalement différent. A cet effet, la stratégie de la recherche du PPM est spécifique pour chaque système. Pour cette raison, chaque système PV ou éolien sera étudié séparément avec sa propre commande MPPT.

III.3. La connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance :

Le graphique montre que les connexions directes d'un panneau solaire photovoltaïque à une charge restent la méthode de fonctionnement la moins chère et la plus courante, la figure (III-2) Bien sûr, la charge doit accepter la connexion directe à l'électricité du générateur avant de continuer. Le GPV est, après tout, une source d'alimentation CC qui ne peut être couplée à une charge CA que par un étage d'appariement de type onduleur.

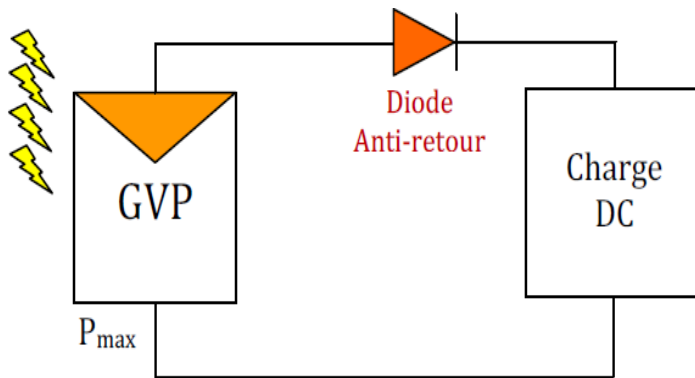


Figure III -2 Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du GPV et celle de la charge. Comme montre la caractéristique de la figure (III-3), la puissance transmise directement à une batterie ou charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectué à la puissance maximale P_{max} que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . Autre application directe est le pompage d'eau «au fil du soleil ». Dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge.

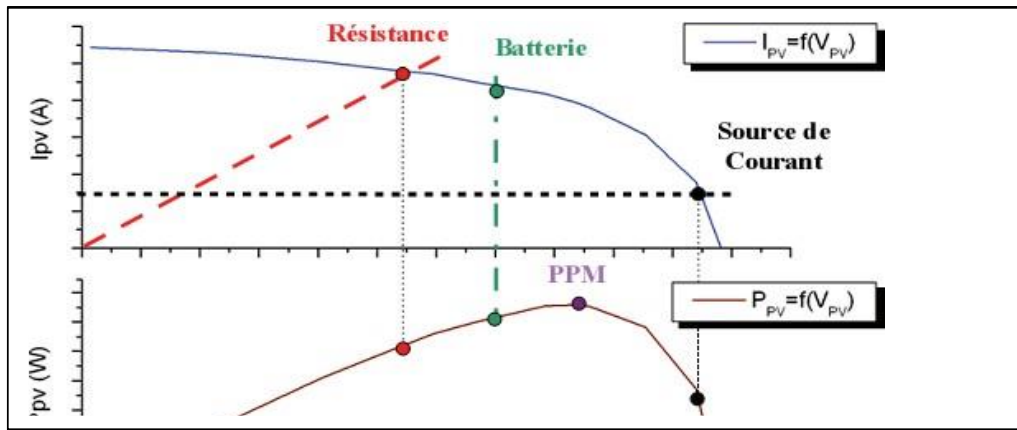


Figure III -3 caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque En connexion direct GPV-Charge

III.4. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation : [41]

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque V_{co} . Alors, aucun transfert de puissance peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la (figure III-4) est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge.

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions sinécessaire.
- Introduire une isolation galvanique.
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative.

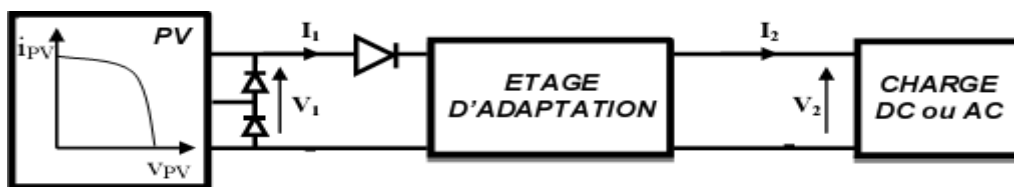


Figure III -4 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en

sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT qui effectue une recherche permanente du point de puissance maximale (PPM).

III.5.Principe de la recherche du point de puissance maximale :

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure (III-5) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

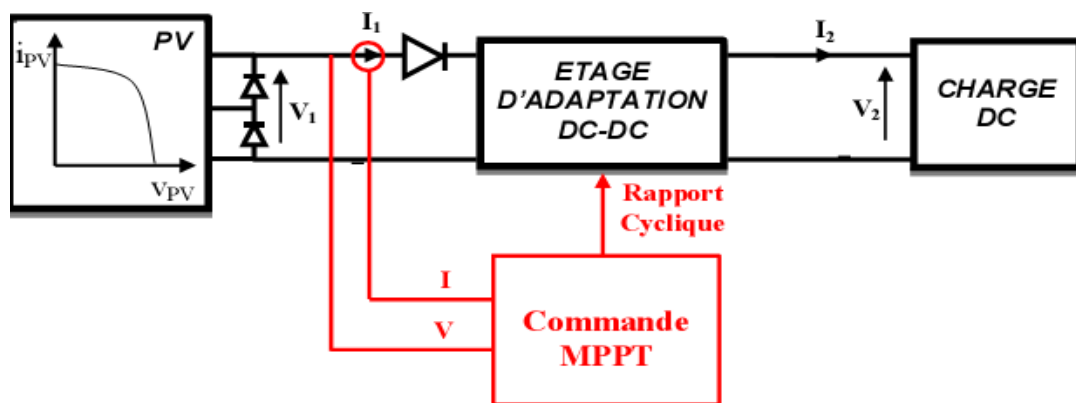


Figure III -5. Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (III-6) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximale PPM_2 . Pour une variation de la charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [41]

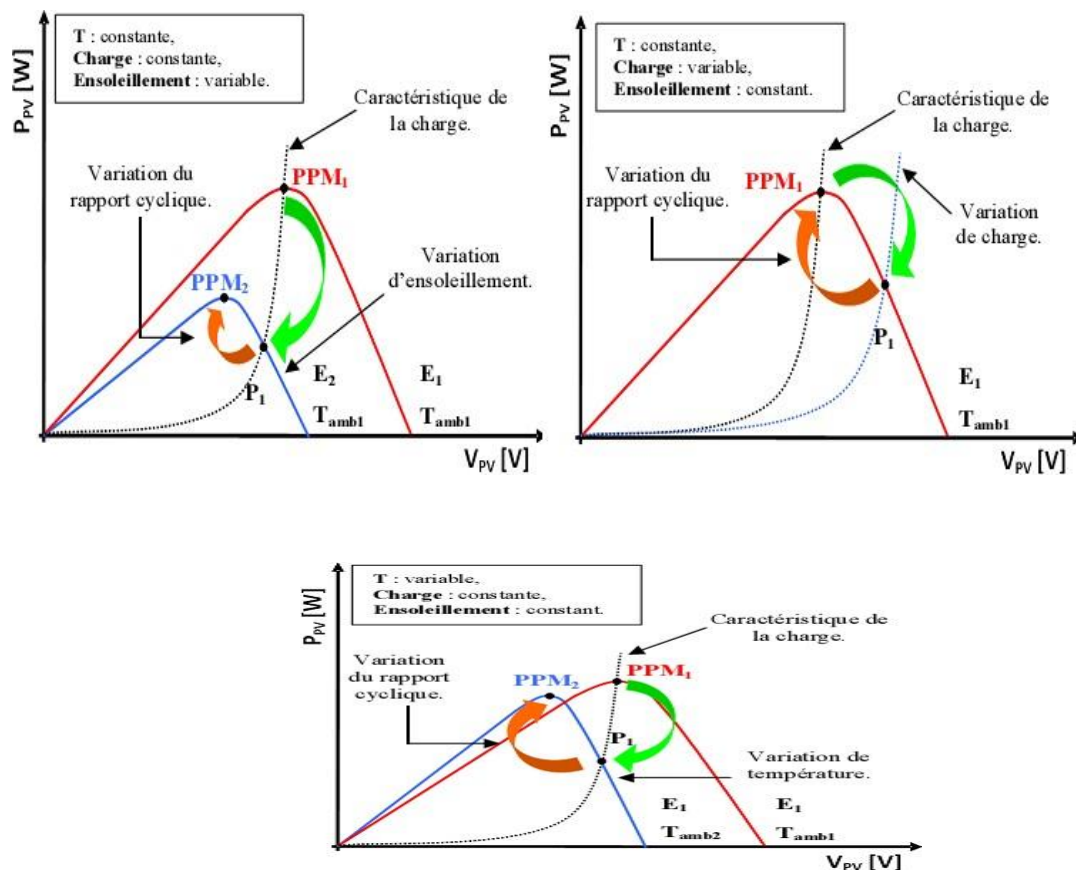


Figure III-6 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

- a) suite à une variation d'ensoleillement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température.

III.6. Différents types de commandes MPPT pour un Générateur PV :

Si l'on veut poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension V_{pv} à la sortie du panneau et le courant I_{pv} qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique ($P = V_{pv} * I_{pv}$), on pourra utiliser différents algorithmes de contrôle pour poursuivre le PPM du module PV. Trois implantations de commande MPPT sont possibles :

- ✓ Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis-à-vis de son équivalence numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire.
- ✓ Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor).
- ✓ Commandes MPPT à implantation numérique faisant intervenir que des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande. Ainsi, parmi les nouvelles MPPT publiées récemment, on peut citer la commande MPPT de type numérique proposé par M. Matsui. Celle-ci est basé sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction du son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source-charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement.

III.7. Classification des technique MPPT :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie

renouvelable de type photovoltaïque.

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes techniques MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative.

III.7.1. Les premiers types de technique MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres à l'époque.

Son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM).

Ce dernier est décrit en figure (III-7) et peut être implanté entièrement en numérique.

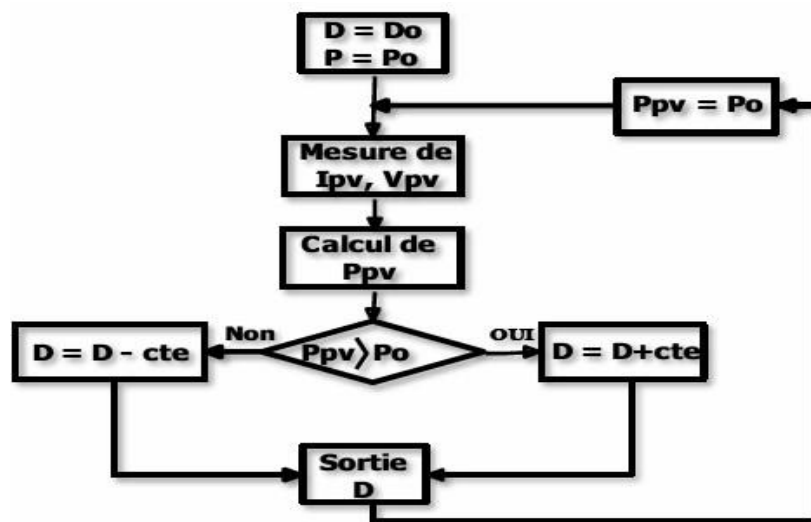


Figure III-7 Principe de la première technique MPPT numérique.

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_n à partir des mesures de V_{pv} et I_{pv} , et de la Comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{n-1} de là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants.

Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche

du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

III.7.2. Les techniques MPPT à algorithmes performants :

Ces derniers sont constitués pour des hacheurs dont la commande intègre le système MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette commande à base d'un microcontrôleur qui contrôle les variations de l'intensité du courant et de la tension et calcule la puissance P , afin d'optimiser le transfert d'énergie électrique fournie par les panneaux.

Le système MPPT cherche à faire débiter ces panneaux à leur puissance maximale en agissant sur le rapport cyclique D .

Le principe du contrôleur MPPT est souvent basé sur une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure (III-8) suivante qui illustre le principe de recherche du MPP.

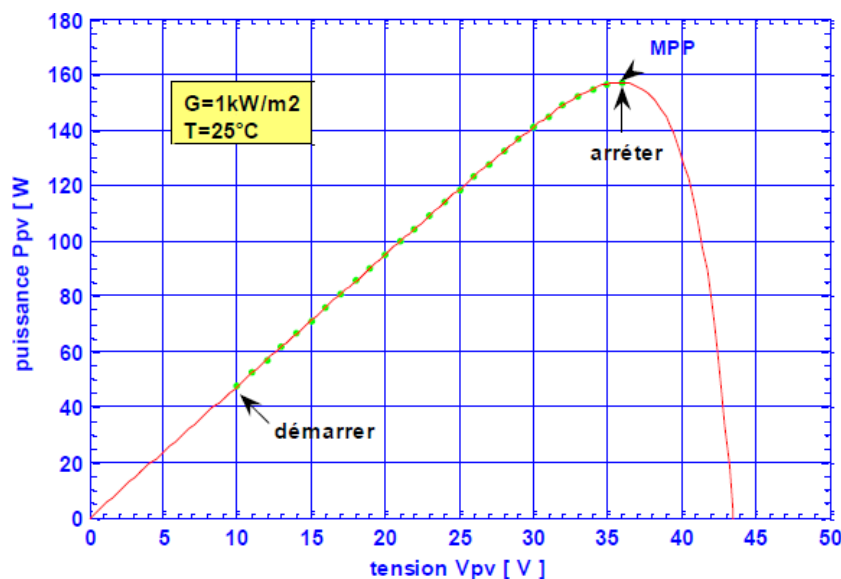


Figure III-8 Recherche du MPP

La charge va imposer son point de fonctionnement (P_1) par exemple. Le programme développé choisit un sens d'ajustement de D par pas $+$ ($d = cte$) ou $-$ ($d = cte$). Il compare si la valeur du point suivant en puissance est supérieure ou non à celui qui précède.

Si oui, on se déplace au point suivant (P_2) avec le même sens de variation de α , jusqu'au moment où le terme suivant (P_n) devienne inférieur au précédent (P_{n-1}). A ce moment, on prend le sens opposé d'ajustement de α et l'on recommence la même procédure, jusqu'à obtenir un système qui va basculer entre trois points qui englobent le MPP (P_{opt}).

Pour réaliser cette opération, plusieurs techniques existe on littérature on situe les techniques suivantes :

III.7.2.1. Technique “ Perturbe and Observe” (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d’une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d’analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte ainsi, comme l’illustre la figure (III.9), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Unraisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. a partir de ces diverses analyses sur les conséquences d’une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile destituer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure (III-10) représente l’algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l’évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

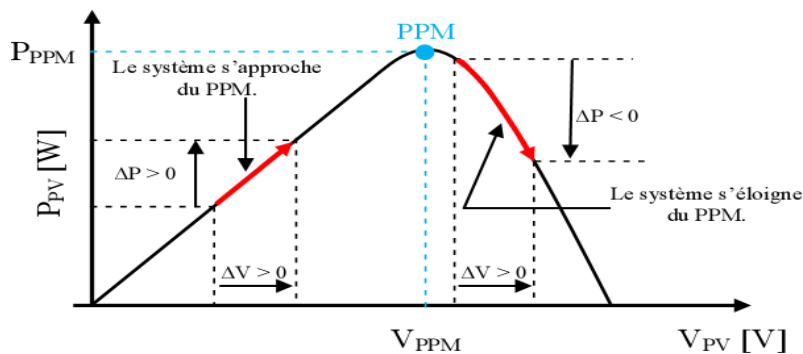


Figure III-9 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant

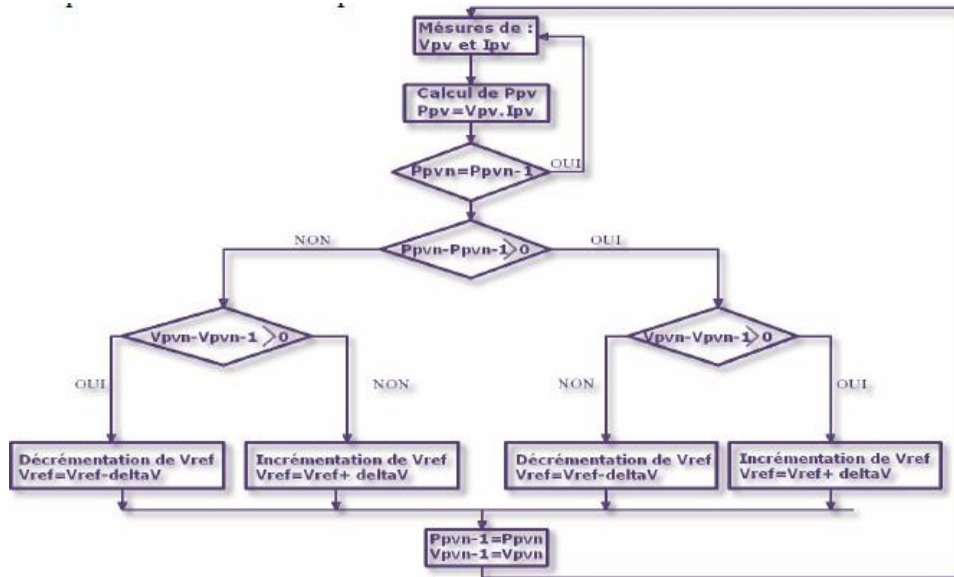


Figure III-10 Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O).

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité. Quand l'intensité de lumière solaire diminue, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du PPM. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" quand il atteint le point MPP, le point de fonctionnement oscille autour de ce dernier. En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement.

III.7.2.2. Technique MPPT à pas auto adaptatif :

Le principe fondamental de cet algorithme est la variation du pas d'incrément, ceci permettant de converger plus rapidement vers le MPP mais aussi de réduire les oscillations autour de ce point.

En effet, afin de converger rapidement vers le MPP, nous définissons, suivant un critère de variation de puissance, une région (r) de recherche à pas variable. En dehors de la région (r), l'algorithme se comporte comme un P&O normal avec un pas fixe note C, mais lorsque l'on entre dans la région (r), le pas s'auto-adapte et se réduit au fur et à mesure que l'on approche du MPP. Les équations (III-1) à (III-7) détaillent le calcul du pas auto adaptatif, nous supposons qu' autour du MPP, la tension reste constante et donc seul le courant varie.

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \quad (III 1)$$

Pour calcul du pas auto-adaptatif, nous supposons qu'autour de MPPT

$$dV_{PV} \rightarrow 0 \quad (III 2)$$

$$dI_{PV} \rightarrow 0 \quad (III 3)$$

$$V_{PV} dI_{PV} \rightarrow dP_{PV} \quad (III 4)$$

$$dI_{PV} \frac{dV_{PV}}{V_{PV}} \quad (III 5)$$

Finalement, nous obtenons le pas auto-adaptatif

$$C_{auto} = X \cdot dP_{PV} \quad (III 6)$$

Avec

$$X \approx \frac{K}{V_{PV}} \quad (III 7)$$

P_{pv} étant la puissance aux bornes des panneaux photovoltaïques V_{pv} et I_{pv} , respectivement leurs tension et courant

Le coefficient K est un coefficient correcteur ($K \in [0.1, 1]$) qui permet de converger dans de bonnes conditions et résulte d'un réglage par itération basé sur le compromis (temps de Convergence / stabilité).

L'algorithme MPPT est représenté à la figure (III-11) .

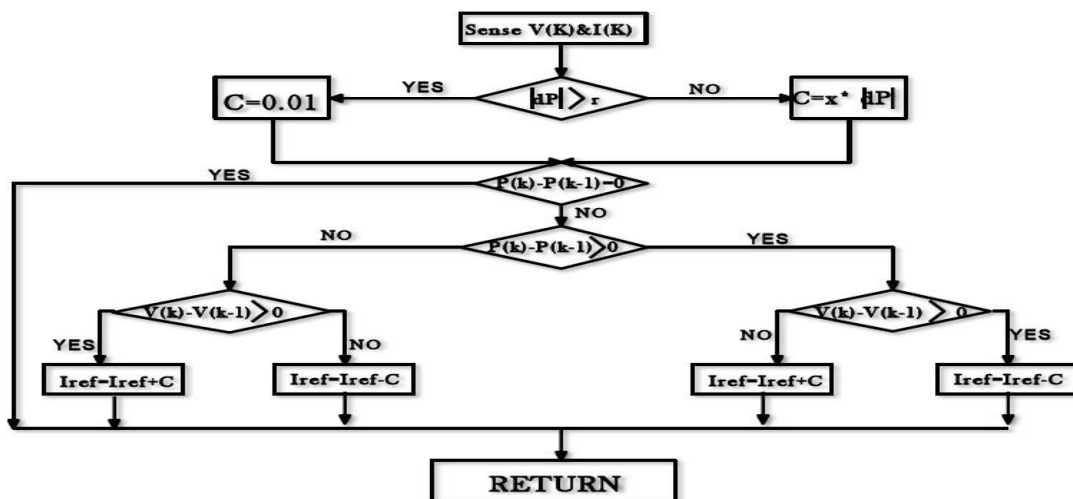


Figure III-11. Algorithme MPPT à pas auto-adaptatif

III.7.2.3. Technique de la conductance Incrémentale (Incremental Conductance)

Pour rechercher les PPM, On peut utiliser une autre technique qui se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (III-8)$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (III-9)$$

D autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{PV}) par rapport à la tension (V_{pv}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite.

La Figure (III.12) permet d'écrire les conditions suivantes :

- ✚ Si $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- ✚ Si $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ Le point de fonctionnement est sur le PPM,
- ✚ Si $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM,

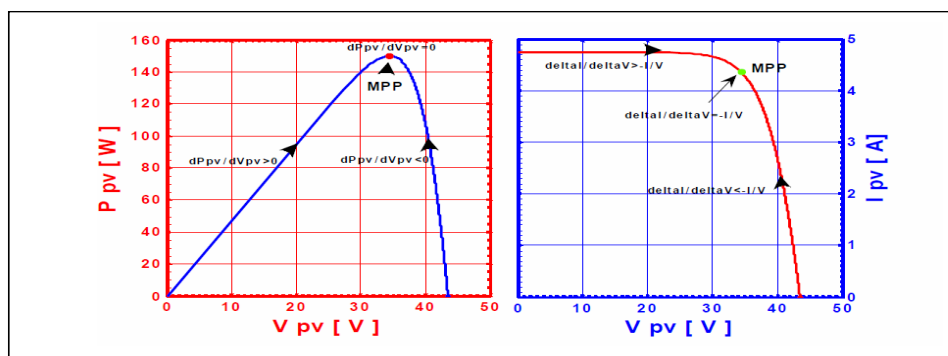


Figure III-12 Positionnement du point de fonctionnement ($G=1kW/m^2$, $T=25C^\circ$).

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (III-8) et la dérivée de la puissance $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d[I_{PV} \cdot V_{PV}]}{dV_{PV}} = V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} + I_{PV} \cdot \frac{dV_{PV}}{dV_{PV}} = V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} + I_{PV} \quad (III 10)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de la conductance comme celles données par l'équation (III-10) sur la dérivée de puissance :

- ✚ Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- ✚ Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ Le point de fonctionnement est sur le PPM,
- ✚ Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM,

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance $\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ avec celle de l'incrément de conductance

$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}}$ comme l'illustre l'algorithme de la (figure III.13). V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur.

Si on est au PPM, alors la tension correspond bien à la tension optimale V_{opt} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔV_{PV} .

Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM . Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure (III-13) [42]

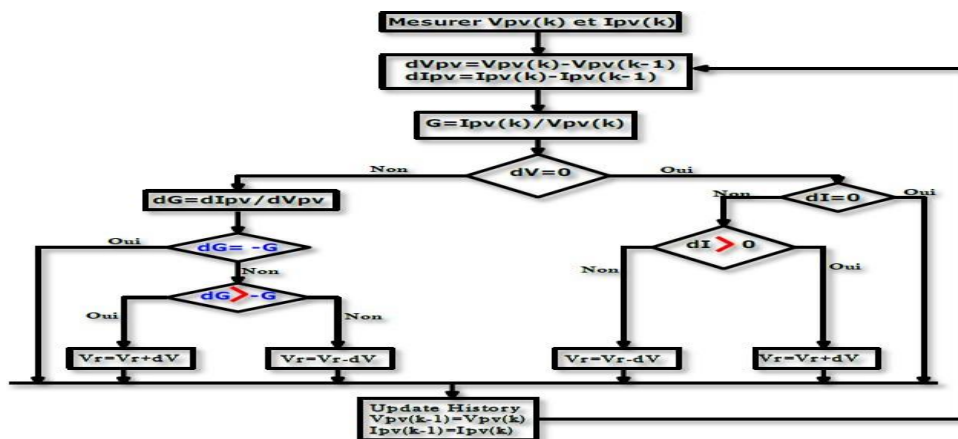


Figure III-13 Algorithme MPPT conductance Incrémentale (Inc .Con).

Les conditions $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ **et** $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le PPM. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'égalité $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ soit satisfaite. Une fois le MPP est atteint, le MPPT continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté ; ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'éclairement. Quand l'éclairement augmente, le PPM se déplace vers la droite de la tension de fonctionnement. Pour compenser ce mouvement du MPP, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement. La même chose pour le cas contraire, quand l'éclairement diminue, le MPPT doit diminuer cette dernière.

Les valeurs actuelles et précédentes de la tension et du courant sont utilisées pour calculer (ΔV) et (ΔI). Si $\Delta V=0$ et $\Delta I=0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au PPM. Si $\Delta V=0$ et $\Delta I>0$, alors l'éclairement a augmenté.

Ceci exige d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver de nouveau le MPP. Contrairement si $\Delta I<0$, l'éclairement a diminué tout en exigeant une diminution de la tension de fonctionnement. Si le changement de la tension n'est pas nul, les rapports dans les inégalités $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ **et** $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le MPP. Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $(\Delta P/\Delta V)>0$), donc le point de fonctionnement est à gauche du MPP. Ainsi, la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP. De même, si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $(\Delta P/\Delta V)<0$), le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le MPP [42]. Le schéma de la figure III.8 montre l'organigramme de l'algorithme « Conductance Incrémentale ».

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme "P&O" puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le MPP, et il peut aussi déterminer l'atteinte du PPM. De plus, dans les conditions de changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction comme c'est le cas avec l'algorithme "P&O", et d'ailleurs, il n'oscille pas

autour du PPM une fois qu'il l'atteint. [43]

III-7-3- Les techniques MPPT basées sur des relations de proportionnalité :

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{co} et I_{cc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

III.7.3.1. Technique de la fraction de la tension de circuit ouvert du générateur :

Elle est facile à mettre en œuvre, moins coûteuse pour les systèmes photovoltaïques. Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale (pour laquelle la puissance débitée est maximale) et celle en circuit ouvert est approximativement constant, pour un même module, sous des niveaux d'éclairement et températures différents. Ceci est la base du fonctionnement à fraction de tension constante qui peut être interprété par l'expression suivante: [42]

$$\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \approx K \quad (\text{III-11})$$

La tension de circuit ouvert est mesurée en isolant temporairement le générateur PV du système et alors le point maximum de fonctionnement de puissance est calculé en utilisant l'équation (III-11). La littérature [43] donne un intervalle de 73% et 80% comme bande de valeurs de la constante K. En réalité K n'est pas constant et est affecté par des niveaux de l'éclairement, la température et de type de module. De même pour la technique de fraction de courant de court-circuit :

$$\frac{V_{mpp}}{V_{cc}} \approx K \quad (\text{III-12})$$

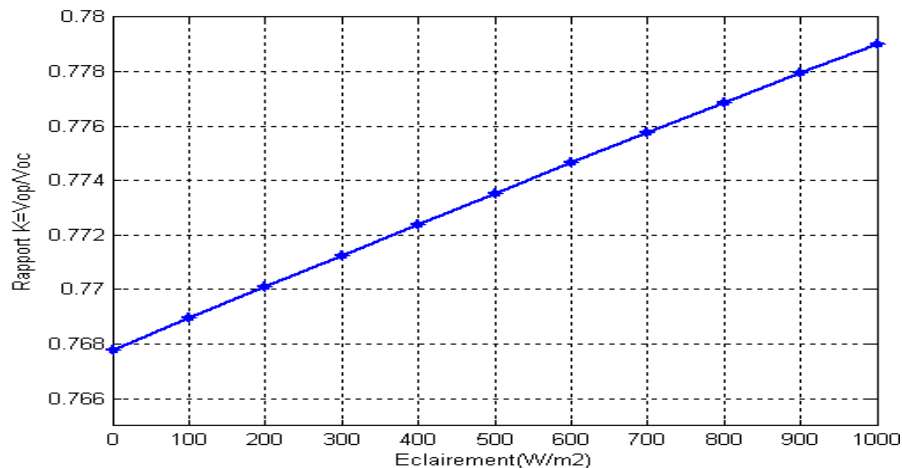


Figure III-14 Rapport entre la tension optimale et la tension de circuit ouvert en fonction de l'éclairement

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{co} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure.

Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de K_v dans un GPV suivant les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des GPV en silicium (SI) qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions inhérentes à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents [42].

III.7.3.2. Technique de court-circuit :

Cette nouvelle méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{opt} et I_{cc} comme le montre l'équation :

$$I_{opt} = K * I_{cc} \tag{III-13}$$

Avec K_i correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du GPV utilisé et il est généralement compris entre 0.78 et 0.92.

À L'équation (III-13) montre que le courant I_{opt} peut être déterminé par une mesure de I_{cc} et que le PPM peut être atteinte en appliquant un courant de référence égal à I_{opt} à la régulation

en courant du convertisseur. La mesure de I_{cc} implique une perte de transfert de puissance du à la mise en court- circuit du GPV.

Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années 80. Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteux que les commandes extrémales citées au début de ce document. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module I_{cc} et V_{co} qui ne peuvent pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée.

III.7.4. Les techniques de différenciation :

Cette méthode est basée sur la propriété de la dérivée d'une fonction qui s'annule en un de ses extrema. La résolution de l'équation (III-14) permet d'obtenir le point de puissance maximale :

$$\frac{d_{PV}}{dT} = V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \quad \text{(III-14)}$$

Cependant, afin d'atteindre réellement le point de puissance maximale, cette équation doit être résolue rapidement. Cette opération est longue et complexe car elle exige des calculs et mesures : mesures de la tension V_{PV} des panneaux, du courant I_{PV} , de la variation de la tension PV_{dV} , de la variation du courant PV_{dI} , permettant le calcul de la variation de la puissance PV_{dP} puis sa comparaison à (0). Si la variation de la puissance n'est pas nulle, son signe permet de déterminer la direction de la recherche du PPM. Cette méthode nécessite donc des moyens de calcul qui soient très efficaces [43]

III.7.5. Les techniques MPPT basées sur le principe de logique floue :

Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs.

L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De Plus, elles peuvent traiter des équations non linéarités.

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une Plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistiques : "faible", "moyen", "élevé"... et des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variables observées : "Si l'erreur est positivement grande et La variation de l'erreur est positivement grande Alors la variation de la sortie est très négative". L'objectif de la commande est d'extraire et de poursuivre la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque et ou éolien pour différentes insolation, différentes valeurs de température et une vitesse de vent variable. Pour réaliser cet objectif un contrôleur flou doit être réalisé. Et il doit comporter les trois blocs suivants :

Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite l'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis Pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification centroïde. La structure de base de Notre contrôleur flou est donnée par la figure (III-15)

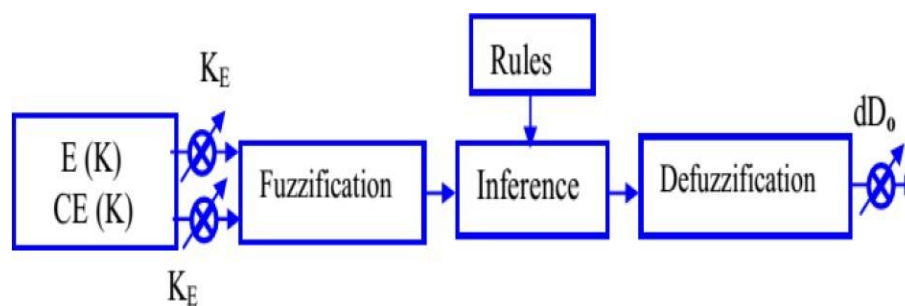


Figure III-15 Schéma bloc d'une logique floue.

La figure III-15 montre la configuration du contrôleur flou qui se compose des : Entrées Sortie d'échelle, fuzzification, décision floue, et la défuzzification. Les facteurs d'échelle : K_E et dD_0 font changer les valeurs des entrées et de sorties du contrôleur proportionnellement. La sortie dD est déduite par les deux variables $E(K)$ et $CE(K)$, où cette dernière est dérivée du signal actuel par la division avec le facteur d'échelle correspondant [44]. Pour les facteurs d'échelles, ils doivent être choisis sur la base de l'étude du système de telle sorte que, lors des petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour l'erreur et sa variation ne soient pas dépassés.

Dans le cas du réglage par la logique floue, on utilise, des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenance. Bien qu'ils n'existent pas de règles précises

Pour la définition des fonctions d'appartenance, quelques directives générales sont données, Afin de conduire à un choix convenable [45]

En ce qui concerne les variables d'entrée, il faut éviter des lacunes ou un chevauchement insuffisant entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles voisins. En effet, cela provoque des zones de non-intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité du régulateur. De même, on évite un chevauchement trop important Surtout, avec $\mu=1$, entre deux ensembles voisins.

Pour la variable de sortie, la présence des lacunes entre les fonctions d'appartenance admissibles, même souhaitées, cela aboutit à une simplification notable de la détermination de l'abscisse du centre de gravité.

III.7.5.1. Loi de commande :

Cette loi est fonction de l'erreur et sa variation ($D=f(E, CE)$). Par conséquent, l'activation de l'ensemble des règles de décisions associées donne la variation de la commande D nécessaire, permettant ainsi l'ajustement d'une telle commande D . Dans les cas simples, cette variation de la commande est obtenue par une simple lecture d'une table de décision définie hors ligne.

La forme de cette loi de commande est donnée par [46]

$$D_{k+1} = D_k + K_{dD} \cdot dD_{k+1} \quad (\text{III-15})$$

Où

K_{dD} est le gain associé à la commande.

D_{k+1} est la variation de la commande.

L'erreur E et la variation de l'erreur CE sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} X_E = K_E \cdot E \\ X_{CE} = K_{CE} \cdot CE \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

Où

K_E et K_{CE} sont les facteurs d'échelles (normalisation).

Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce que nous ayons un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

III.7.5.2. Optimisation à cinq classes :

Dans ce régulateur, l'intervalle d'intérêt de chaque variable d'entrée et de la variable de sortie est divisé en cinq classes, comme le montre la figure III-16

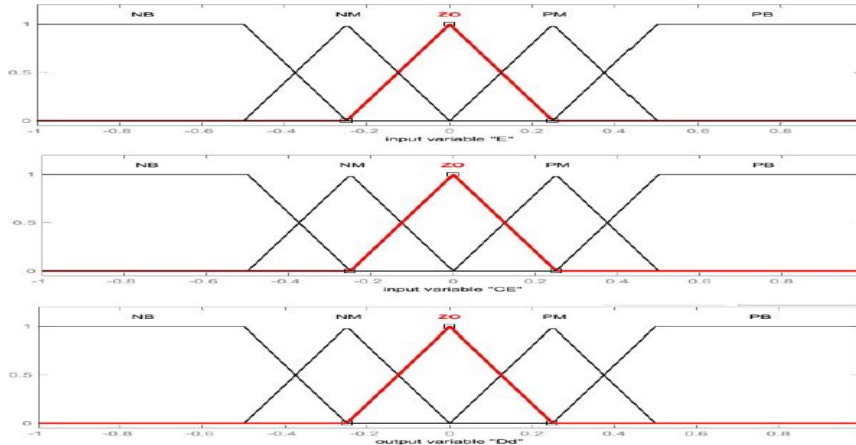


Figure III-16 Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques
De l'erreur normalisée et de la variation de l'erreur normalisée

Les classes sont notées comme suit :

NB pour négatif grand, NS pour négatif petit, ZE pour environ zéro, PS pour positif petit, et PB pour positif grand.

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens. Par exemple, il est tout à fait clair que, si l'erreur est fortement négative et sa variation l'est aussi, le signal de commande doit l'être également. Au contraire, si l'erreur est environ nulle et sa variation aussi, il en sera de même de la commande. Maintenant, si l'erreur est environ nulle mais sa variation est fortement négative, ou si l'erreur est fortement négative mais sa variation est environ nulle, le signal de commande devra être fortement négatif [46] Ces considérations conduisent à adopter une table de décision anti-diagonale, résumant les règles choisies ; cette table qui figure dans le tableau (III-1) est appelée matrice de MACVICAR – WHELAN [47]

E(k)	CE(k)	NB	NS	ZE	PS	PB
NB		ZE	ZE	PB	PB	PB
NS		ZE	ZE	PB	PB	PB
ZE		PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS		NS	NS	NS	ZE	ZE
PB		NB	NB	NB	ZE	ZE

Tableau III-1 : Table de règles à cinq classes

L'optimisation de la puissance du panneau solaire est faite à l'aide d'un circuit de commande basé sur les données des deux convertisseurs d'énergie et la technique de la logique floue à cinq classes selon les règles du tableau (III-1). Le régulateur de type MAMDANI à cinq classes possède des fonctions d'appartenance qui sont représenté dans la figure III-16, les étapes de calcul des différentes commandes sont les suivantes: [47]

- 1). Echantillonnage de la sortie
- 2). Calcul de l'erreur notée E (K):

$$E(K) = \frac{P_{PV(K+1)} - P_{PV(K)}}{I_{PV(K+1)} - I_{PV(K)}} \quad (\text{II -17})$$

$$X = P_{PV}; Y = I_{PV}$$

- 3). Calcul de la variation de l'erreur notée CE (K):

$$CE(k) = E(k + 1) - E(k) \quad (\text{III-18})$$

- 4). Calcul des valeurs normalisées E(k) et CE (k) par l'équation III-18:
- 5). Calculer les degrés d'appartenance de E(k) et CE(k) pour les cinq classes à l'aide de leurs Fonctions d'appartenance.

a. Fuzzification

Calculer les degrés d'appartenance de E (k) et CE (k) pour les 5 classes à l'aide de leurs fonctions d'appartenance.

b. Inférence floue

Calculer, en utilisant la table des règles de la commande (Tableau III-1), les fonctions d'appartenance résultantes de la variable linguistique dD_i à chacune de ses classes.

c. Défuzzification

Une réduction notable de l'envergure de calcul s'obtient par l'emploi de la méthode de centre de gravité, où nous définissons des fonctions d'appartenance de forme triangulaire sans chevauchement (figure. III-16). Ainsi, selon l'équation III-15, l'abscisse du centre de gravité devient :

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (III - 19)$$

Avec $\mu(D_j)$, est le degré d'activation de la $J^{ième}$ règle et D_j est l'abscisse du centre de gravité de la $J^{ième}$ classe.

Calcul de la valeur physique de la commande par : l'équation (III-15)

Laisser la sortie évoluer jusqu'à la prochaine période d'échantillonnage et puis ré-exécuter toutes les règles.

III.7.5.3: Structure de base d'un contrôleur flou dédié au GPV :

Le contrôleur prend sa place dans la chaîne de régulation de la même manière qu'un régulateur classique. Il possède deux entrées (E et CE) et une sortie (dD) ou chacune des entrées est calibrée par un gain assurant que les grandeurs mesurées restent dans leurs univers de discours. Cela permet aussi de donner plus d'importance à une entrée qu'à une autre. Le calibrage est fait par une saturation pour éviter tout dépassement. La sortie est aussi calibrée pour lui permettre de varier dans le domaine accepté par le système. [48] La structure de base d'un contrôleur PI flou est inspirée de celle du régulateur proportionnel intégral (PI) classique.

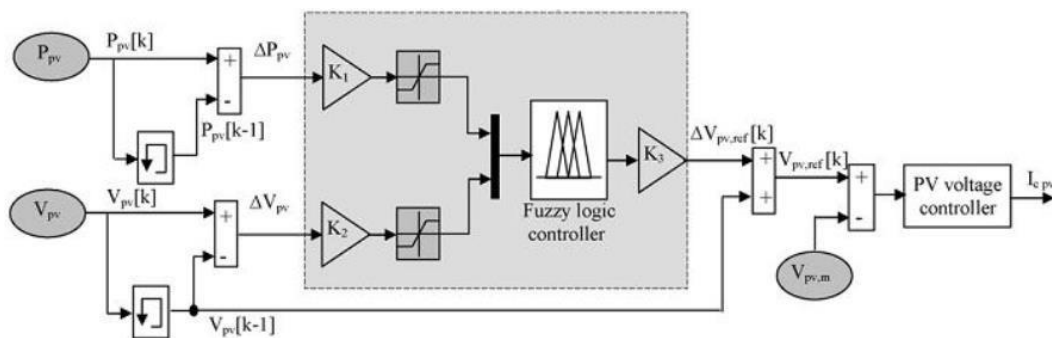


Figure III-17: Structure du contrôleur flou pour MPPT photovoltaïque

III.7.6. Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificielle appliquée au GPV :

La technique MPPT de réseaux de neurones artificielle est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées :

Couche d'entrée (Input layer),

Couche cachée (Hidden layer),

Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la figure (III-18).

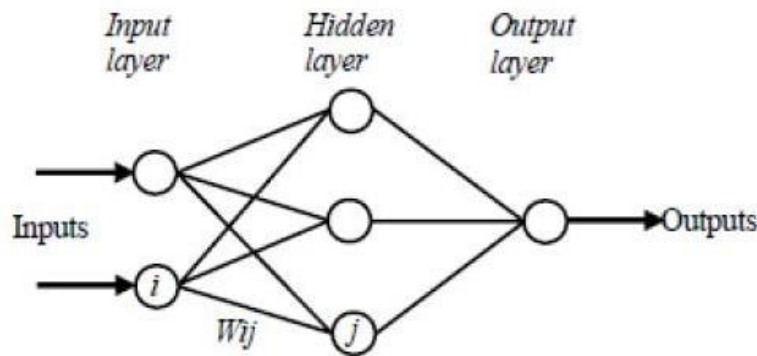


Figure III-18 exemple d'un réseau de neurones

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV V_{oc} et I_{cc} associées ou non à des données atmosphériques comme la température. Ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et

de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, L'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM.

Éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

III.8. Optimisation du rendement énergétique du système éolien [49]:

La chaîne de conversion éolienne figure (III-19), est composée d'une turbine éolienne entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent, associée à un redresseur débitant sur une charge par l'intermédiaire d'un bus continu. La turbine éolienne a une caractéristique qui lui est propre et qui dépend des paramètres de construction. La courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique. Alors, on parle ainsi de maximisation de la puissance de l'aérogénérateur. C'est la même procédure que nous avons étudiée pour le générateur photovoltaïque.

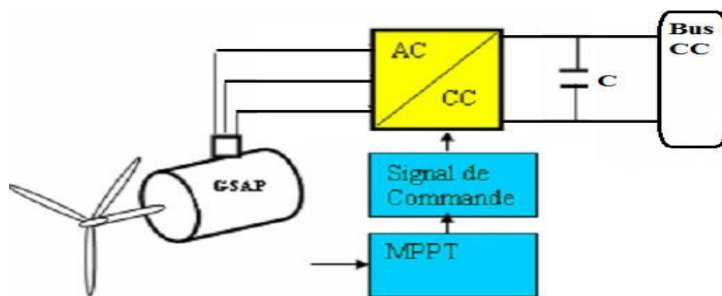


Figure III-19 Schéma global de système de conversion d'énergie éolienne

III.8.1. Stratégie de la recherche de la puissance maximale pour une turbine éolienne :

Selon la littérature spécialisée, la commande des turbines éoliennes se fait de préférence par les moyens mécaniques aérodynamiques. Cependant, en suivant les principes de conversion de l'énergie du vent il apparaît qu'une autre forme de faire la régulation de la puissance produite par l'éolienne est d'agir sur sa vitesse de rotation. Plusieurs configurations sont réalisables, avec des machines synchrones ou asynchrones et c'est ici que le domaine des asservissements des machines électriques prend place. Pour chaque vitesse du vent, la recherche d'une vitesse de rotation optimale de la turbine, conduit à la production d'une

puissance électrique maximale. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice . D'autant plus, que pour extraire de manière efficace la puissance du vent, tout en maintenant en sécurité le régime, l'éolienne doit être exploitée selon les 3 zones, qui relient la vitesse du vent, la vitesse maximale du rotor admissible, et la puissance désirée (Chapitre 1, Figure 1.39). Dans la zone I, l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis-à-vis de l'énergie de fonctionnement. Dans la zone II de fonctionnement, l'aérogénérateur fonctionne en charge partielle. Ici l'objectif est d'optimiser le rendement énergétique. Ainsi, la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir dans le point de fonctionnement de rendement aérodynamique maximal. Le but étant que le coefficient de puissance soit toujours optimum. Finalement pour la zone III, vent fort, correspond au fonctionnement à pleine charge. Il faut limiter la puissance afin de ne pas abîmer le système . [40] Donc c'est dans la zone II que la commande MPPT doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Pour ce fait, deux approches sont possibles[50]: Une première stratégie qui considère que cette caractéristique est bien connue, la puissance produite sera maximisée en suivant la courbe de puissance maximale ; La deuxième stratégie dont la caractéristique du coefficient $CP(\lambda)$ est considérée n'est pas connue.

III.8.1.1. Recherche de la puissance maximale en connaissant la courbe caractéristique $CP(\lambda)$:

Malgré que cette phase de caractérisation suscitée puisse s'avérer coûteuse et fastidieuse à cause de la nature fluctuante du vent qui engendre des perturbations sur sa vitesse et sa direction, elle permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de la puissance maximale par l'utilisation de la relation optimale entre la vitesse de rotation du système et la puissance à produire . Cette deuxième approche de procéder à la recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voile éolienne est largement utilisée pour éviter la mesure de la vitesse du vent pour se dispenser des anémomètres coûteux.

Pour les systèmes de faible et moyenne puissance, les alternateurs multipolaires à aimants permanents sont les plus recommandés, leur commande est basée sur la régulation

de l'excitation du rotor. L'objectif de cette commande est d'imposer un couple de référence de manière à permettre à l'éolienne de tourner à une vitesse réglable, pour les vents faibles et modérés, afin d'assurer un point de fonctionnement optimal en terme d'extraction de puissance, puis de garder cette puissance constante à PN pour les vents les plus forts. Généralement les microcontrôleurs (μC) et les processeurs de signaux numériques (DSP) sont les systèmes programmables les plus appropriés pour accomplir cette tâche.

III.8.1.1.1. Commande en vitesse :

Chaque courbe de la caractéristique $P(\Omega)$ montrée sur la Figure I-38 présente un point de puissance optimale correspondant à une certaine vitesse de rotation. La commande MPPT a pour rôle d'imposer une vitesse de rotation optimale au moteur quelle que soit la vitesse du vent. Dans ce contexte, le ratio de la vitesse de l'éolienne λ doit être maintenu à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$) sur une certaine plage de vitesse de vent. Ainsi, le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximale ($C_p = C_{pMax}$) Pour cela et en insérant l'équation (I.30) dans (l'expression I.28), nous pouvons écrire :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A \frac{R^3}{\lambda^3} C_p \Omega_t^3 \tag{III-20}$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique directement liée à la vitesse de rotation imposée par la charge. La structure de la Figure III-20 sera toujours retenue avec une régulation en vitesse du système afin de contrôler la puissance éolienne selon une fonction MPPT, il nous reste que définir la consigne de commande (vitesse) pour compléter l'algorithme de recherche.

Le calcul de la vitesse rotorique optimale en fonction de la puissance optimale sera donc possible a partir de la formule (III.20) :

$$\Omega_{opt} = \sqrt{P_{opt} \cdot K_{opt}} \tag{III-21}$$

Avec

$$K_{opt} = \frac{2\lambda^3}{\rho AR^3 C_{pmax}} \tag{III-22}$$

Donc, à partir de ces deux équations et à l'aide d'une simple mesure de la puissance, il est possible de poursuivre le point de fonctionnement optimal en calculant la vitesse de référence maximisant la puissance selon le schéma suivant [51]:

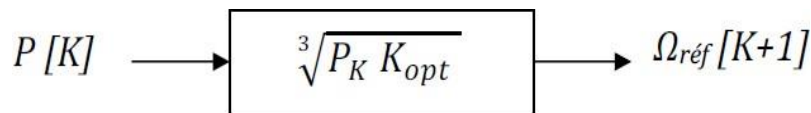


Figure III-20:: Calcul de la vitesse de référence

La Figure III-21 explique le fonctionnement de la MPPT. Initialement, pour une vitesse du vent supposée égale a 12m/s, le système est au point (Ω_{t1}, P_{t1}) , la vitesse de référence est calculée selon les équations (III-21) et (III-22), le but est de trouver une vitesse $\Omega_{réf} = \Omega_{t2}$ à imposer à la génératrice correspondant à P_{t1} . Le système sera placé alors au point $\Omega_{t2} = \Omega_{t1}$. De la même manière, après un cycle de calcul, le système continu à évoluer vers le point de puissance $\Omega_{t2} = \Omega_{t2}$, quand le système se place sur ce point, une nouvelle vitesse de référence Ω_{t3} sera calculée correspondant à P_{t2} et le système se place à nouveau au point $\Omega_{t3} = P_{t2}$. De cette façon, le système évolue toujours vers le point de puissance optimale $\Omega_{opt} = P_{opt}$. quelle que soit la vitesse du vent.

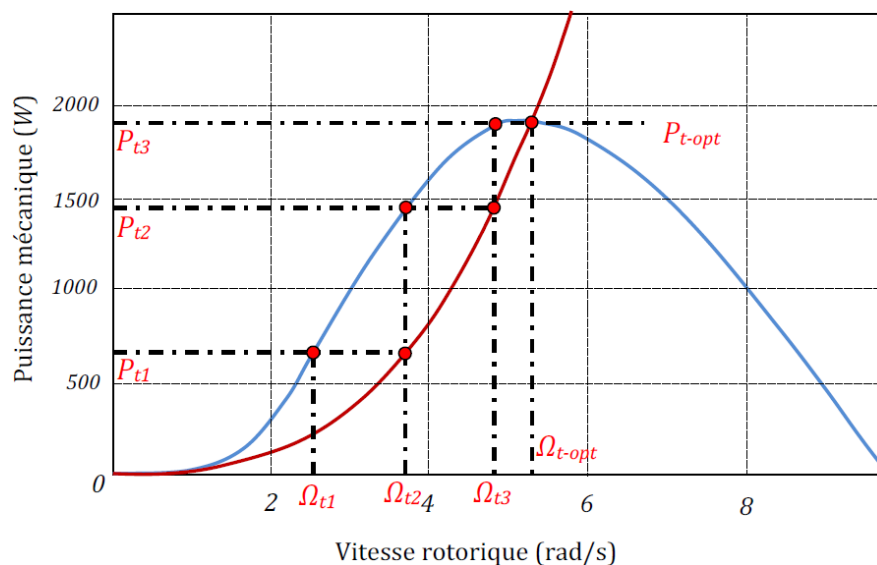


Figure III-21: Poursuivre du point de puissance maximale [51]

III.8.1.1.2. Commande en couple :

Compte tenu de la relative difficulté à régler la vitesse d'une turbine fortement inertielle, une commande en couple de la génératrice peut être envisagée. Cette façon de procéder donne une association plus « saine » de point de vue physique : une source de vitesse

(ensemble éolienne) est connectée à une source de couple (génératrice pilotée en couple). Cette nouvelle façon de contrôler le système demande une adaptation du dispositif de recherche du point de puissance maximal MPPT.

En utilisant la formule du calcul de la puissance retrouvé précédemment, il est facile de déterminer le couple éolien correspondant :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A \frac{R^3}{\lambda^3} C_p \Omega_t^3 = C_t \Omega_t^3 \quad (\text{III-23})$$

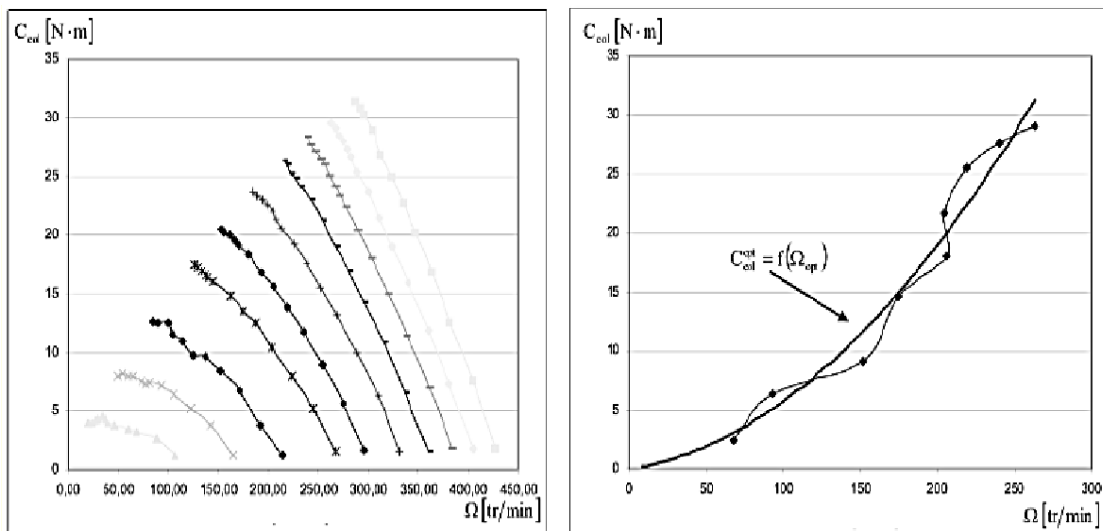
Alors le couple éolien est proportionnel au carré de la vitesse angulaire du rotor

$$C_t = \frac{1}{2} \rho A \frac{R^3}{\lambda^3} C_p \Omega_t^3 \quad (\text{III-24})$$

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire à $\lambda = \lambda_{opt}$, le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

$$C_{t_{opt}} = \frac{\Omega_{t_{opt}}^2}{K_{opt}} \quad (\text{III-25})$$

Selon une expérimentation [52] la famille de courbe du couple par rapport à la vitesse de vent pour différentes vitesses de vent est donnée par la courbe gauche de la Figure III-22. La courbe de droite par contre donne l'allure du couple à puissance maximale.



*Figure III-22: Gauche: Famille De Courbe Du Couple Pour Différents Vitesses De Vent
Droite: Courbe Du Couple Maximal.*

Contrairement à l'algorithme MPPT de la commande de vitesse, qui se sert de la mesure du courant et de la tension pour déterminer la puissance actuelle, et l'utilise pour déterminer la nouvelle consigne de vitesse, l'algorithme de commande en couple nécessite comme entrée une mesure de la vitesse angulaire du rotor pour déduire via le rapport K_{opt} la nouvelle consigne de couple (Figure III-23). Toutefois pour les applications de petites puissances ayant une contrainte d'économie, il est préférable de faire une déduction de la vitesse du rotor à partir de la mesure de tension aux bornes de l'alternateur. Selon le modèle de Behn-Eschenburg de la machine synchrone, la tension statorique de sortie d'une phase est donnée par l'expression :

$$V_{as} = E_{as} - (R_s + jL_s \omega_s) i_{as} \quad (\text{III } 26)$$

Avec $E_{as} = \omega_s$ linéairement proportionnelle à la fréquence de rotation du rotor.

En négligeant, $(R_s + jL_s \omega_s) i_{as}$ nous pouvons considérer que la fréquence de rotation du rotor de la machine synchrone est proportionnelle à la valeur efficace de la tension statorique.

Ainsi par une mesure de la tension nous pouvons avoir une image de la vitesse angulaire de la Turbine

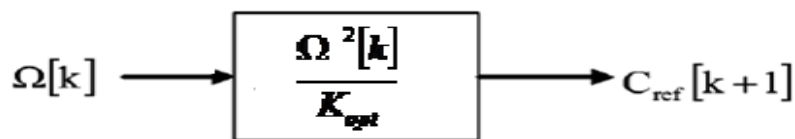


Figure III-23: Couple De Référence En Fonction De La Vitesse De Rotation.

Ce mode de recherche permet à chaque pas de calcul de converger vers le point optimal tel que illustrer graphiquement dans la Figure III-24

La mesure de la vitesse de rotation Ω_1 engendre le calcul du couple C_{ref1} . Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromécanique de la génératrice. Par l'action de ce couple la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique ci-dessous. Et ce, pour atteindre au pas de calcul suivant la vitesse Ω_1 où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée ;

$$C_{eol} - C_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{III } 27)$$

Après quelques itérations, la paire de coordonnées optimum à $(\Omega_{opt} ; C_{opt})$ est atteinte et l'extraction de la puissance maximale P_{max} est réalisée à ce point

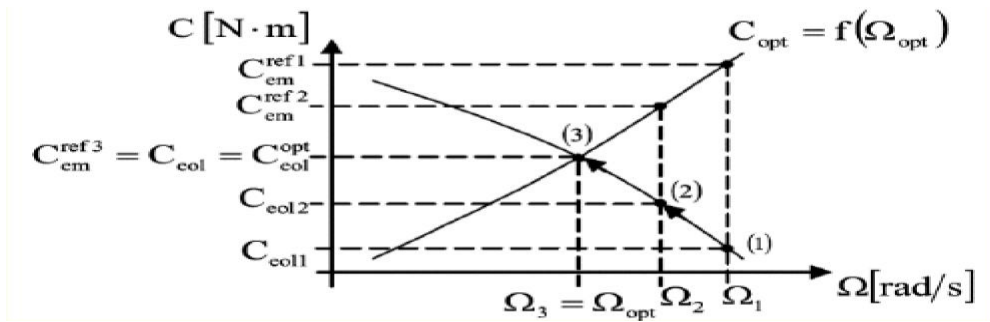


Figure III-24: Convergence Vers Le Point Optimal – Contrôle En Couple

En comparaison avec la commande en vitesse, la commande en couple présente selon les études effectuées par A.Mirecki [53] quelques avantages :

De point de vue de l'efficacité énergétique les deux stratégies sont presque équivalentes avec un léger avantage de la commande en couple.

Le schéma de contrôle en couple est simplifié par l'enlèvement d'une boucle par rapport au pilotage en vitesse.

La commande en couple est parfaitement stable et sans à-coups quand la commande en vitesse peut poser des problèmes d'instabilités pour de fortes inerties de voilure et des transitoires parfois souvent plus brusques.

Les voilures de type Savonius ont la propriété de provoquer une ondulation d'ordre deux dans le couple mécanique à cause de leur construction particulière.

En utilisant le contrôle en couple et sous condition d'être capable d'identifier cette harmonique 2, il est envisageable de filtrer la perturbation par action sur le couple alors qu'une action indirecte sur la vitesse est à priori fastidieuse.

III.8.1.1.3. Commande indirecte par le pilotage du courant :

Un des principaux buts de cette partie de l'étude est de simplifier la structure de la chaîne de conversion de l'énergie dédiée à l'éolienne de faible puissance. Ceci est nécessaire pour réduire le coût sans pour autant trop diminuer l'efficacité énergétique de ce système. Les Configurations basées sur un pont redresseur à six interrupteurs commandés sont onéreuses, comportent des dispositifs de mesures mécaniques et requièrent un circuit de commande assez complexe. Ce redresseur commandé est donc remplacé par un redresseur triphasé à diodes. Du fait, que le pont de diodes est un élément non commandé, l'autopilote direct de la génératrice en couple ou en vitesse n'est plus possible. Une autre façon (indirecte) d'agir est donc nécessaire. Pour cela, on intercale un convertisseur DC-DC, capable de régler le courant de charge. On contrôle ainsi le courant de charge « côté DC » qui débite dans une batterie selon le point de fonctionnement de l'éolienne. Contrairement aux cas précédents, le

contrôle de la charge mécanique de la voileure s'effectue de façon indirecte à travers un hacheur.

La structure considérée dans ce paragraphe est donnée par la Figure III-25. La régulation du courant de la batterie I_{bat} est équivalente à la régulation de la puissance batterie qui possède une tension fixe (on néglige ici la résistance interne de la batterie).

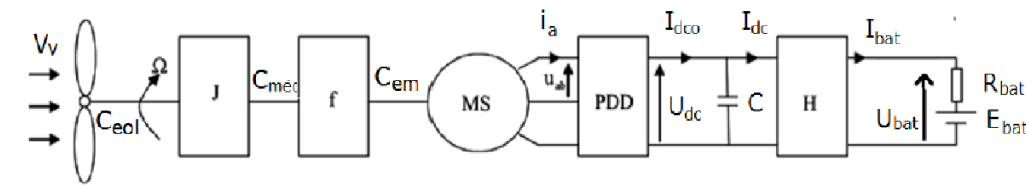


Figure III-25: schéma d'une chaîne de conversion d'éolienne, avec redresseur à diodes et hacheur

$$P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} = \eta \cdot C_{eol} \cdot \Omega = \eta \cdot P_{eol} \quad (III\ 28)$$

Le rendement total η est calculé selon l'expression suivante : $\eta = \frac{P_{bat}^{max}}{P_{eol}^{opt}}$

avec

$$P_{opt} = \frac{\Omega_{opt}^3}{K_{opt}} \quad (III\ 29)$$

Alors nous déduisons que la puissance maximale injectée dans la batterie est :

$$P_{bat}^{max} = \eta \frac{\Omega_{opt}^3}{K_{opt}} \quad (III\ 30)$$

Ainsi nous pouvons déduire l'expression du courant optimal dans la batterie. Si on considère que les pertes évoluent aussi dans le cube de la vitesse, nous pouvons peut définir une constante modifiée K_{opt} :

$$P_{bat}^{max} = \eta \frac{\Omega_{opt}^3}{K_{opt}} = K'_{opt} \Omega_{opt}^3 \quad (III\ 31)$$

Le dispositif de recherche de la puissance maximale peut être construit en utilisant la mesure de la vitesse de rotation du rotor, tel que :

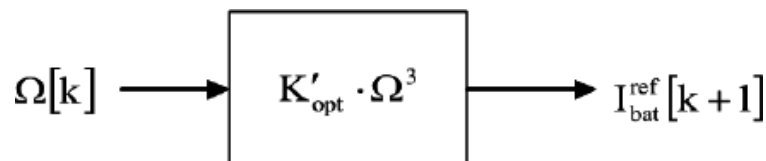


Figure III-26: Courant De Référence En Fonction De La Vitesse De Rotation.

La chaîne de conversion peut encore être simplifiée si l'on considère que l'image de la vitesse de rotation est donnée par les forces électromotrices de la génératrice. Ces dernières étant liées à la valeur de la tension de sortie du pont à diodes. Le capteur mécanique de vitesse peut être supprimé et remplacé par la mesure de la tension du bus continu U_{dc} . Celle-ci peut être assimilée à l'image de la vitesse de rotation comme le démontre l'équation ci-dessous.

$$U_{dc}(\Omega) = \frac{3}{\pi} \cdot E_{ab}^{max} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \psi_{eff} \cdot k \cdot \Omega \quad (III-32)$$

D'où

$$\Omega = \frac{U_{dc}}{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \psi_{eff} \cdot k} \quad (III-33)$$

Avec :

K : coefficient propre au générateur synchrone.

L'algorithme de commande MPPT peut se traduire par le schéma suivant :

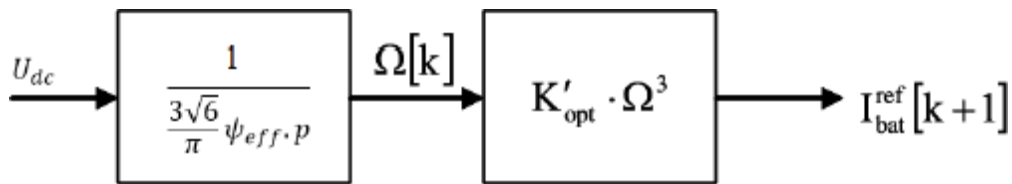


Figure III-27: Courant De Référence En Fonction De La Tension Bus

III.8.1.2. Recherche de la puissance maximale sans la connaissance de la courbe caractéristique CP(λ):

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique CP(λ), l'utilisation d'un dispositif MPPT basé sur le principe des ensembles flous peut être réalisable . [54] Il existe aussi d'autres structures, comme celle basée sur la machine asynchrone à cage, pilotée par le stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques [55], et celle basée sur la machine asynchrone a rotor bobine ou la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissances situés au circuit rotorique .La machine synchrone peut être aussi associée à un redresseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (Figure III-28). Cette structure assure un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi d'effectuer par ce biais une recherche de la

puissance maximale souhaitée [55]. Nous allons consacrer cette partie à l'étude de cette structure avec plus d'attention car elle est la plus courante dans les applications éoliennes et donne une indication sur l'efficacité énergétique relative aux autres montages.

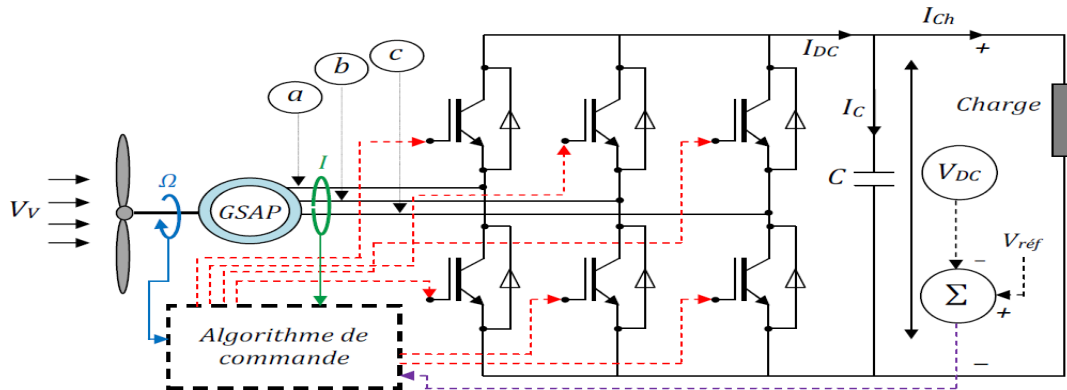


Figure III-28: Structure à redresseur MLI.

Cette structure est la solution de référence parmi tous les convertisseurs AC/DC. Un autopilotage de la machine synchrone, permet de contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple C_{em} ou la vitesse de rotation de la génératrice Ω , ce qui donne l'avantage d'un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée. Les inconvénients de cette structure reposent sur la complexité du montage qui comporte trois bras complets donc six interrupteurs et la commande nécessitant généralement un capteur mécanique de position. De plus, ce montage est survolteur et la tension du bus continu doit être supérieure à la tension composée de la génératrice obtenue à vitesse de rotation (vent) maximale.

Les règles pour converger vers le point de fonctionnement optimal sont relativement simples à établir est ceci dans le cas où les caractéristiques de voilure ne sont pas connues. Le principe est basé sur la lecture instantanée des variations de la puissance ΔP et de la vitesse de rotation $\Delta \Omega$, si une augmentation de la vitesse de rotation ($\Delta \Omega > 0$) implique une augmentation de la puissance électrique fournie ($\Delta P > 0$), on doit continuer à accélérer la voilure à travers un Changement $\Delta \Omega_{réf}$ de la consigne de vitesse de rotation de l'éolienne $\Omega_{réf}$ selon les équations [54]

$$\begin{cases} \Delta P = P[k] - P[k - 1] \\ \Delta \Omega = \Omega[k] - \Omega[k - 1] \\ \Omega_{réf}[k] = \Omega[k - 1] + \Delta \Omega_{réf}[k] \end{cases} \quad (\text{III-34})$$

Ainsi, le changement de ΔP résultant de la variation de la vitesse de rotation est soit dans le sens positif, on se situe alors sur la phase montante de la courbe de la puissance

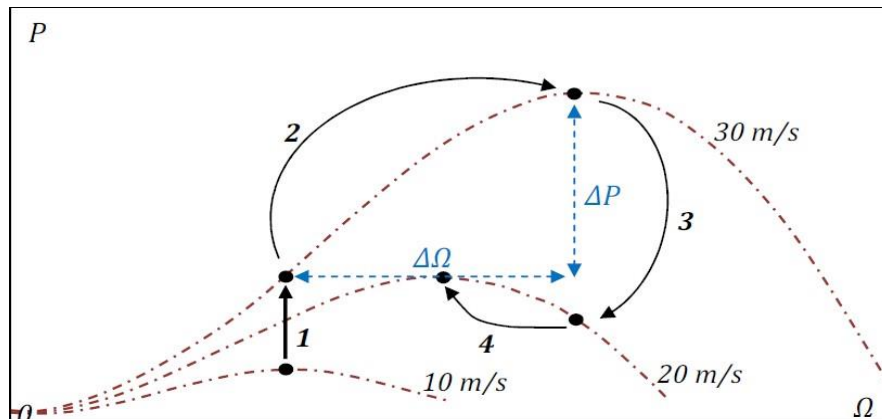


Figure III-29: Principe de fonctionnement d'un MPPT à vitesse du vent variable

III.8.1.2.1. La Stratégie P&O (Perturb and Observe) basique :

L'algorithme P&O est l'un des plus simples algorithmes. Il consiste à l'introduction d'une petite perturbation du rapport cyclique. Son effet est par la suite remarqué au niveau de la puissance de sortie de la GSAP. Si une augmentation de la puissance électrique est enregistrée par l'augmentation du rapport cyclique, Alors le rapport cyclique va être augmenté encore une fois avec le même pas que le précédent. Si par contre une diminution de la puissance est enregistrée suite à l'augmentation du rapport cyclique, la consigne suivante du rapport cyclique est alors inversée [56].

Il est clair que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système éolien. La Figure III-30 représente l'algorithme décrit :

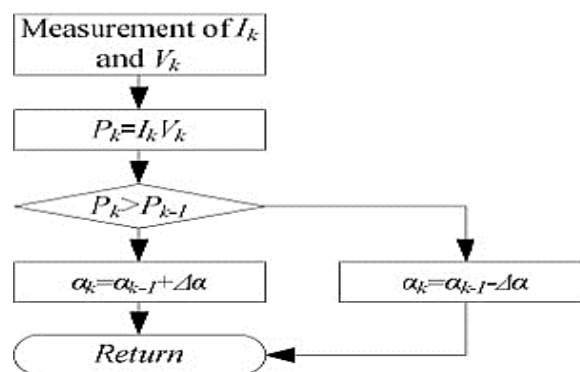


Figure III-30: Algorithme P&O.

Le contrôle P&O basique présente toutefois quelques inconvénients liés à : L'Oscillation de la puissance de sortie est permanente même pendant les vitesses de vents fixes [56], la Lenteur de retrouver le point d'extraction de la puissance maximale par rapport

aux stratégies avec connaissance de la caractéristique de l'éolienne, car le pas de variation du rapport cyclique est fixe.

D'autant plus cette stratégie de recherche de puissance maximale ne permet pas la détection, des petites variations passagères du vent. Chose qui peut engendrer des variations de puissance non souhaitées et erronées.

III.8.1.2.2. P&O évoluée combinée à l'ORB :

Vu les inconvénients du contrôle P&O basique. La stratégie P&O évoluée est proposée car elle permet de réduire les deux derniers inconvénients liés à la P&O basique. En effet, en réduisant les variations dues aux changements passagers de la vitesse du vent, et en adoptant un pas de variation du rapport cyclique variable afin d'agir à des vitesses de régulation différentes, et avec des précisions accrues. Toutefois, le seul inconvénient que peut garder la P&O évoluée est l'oscillation même légère par rapport à la P&O basique autour de la puissance maximale et même pour des vitesses de vents stables. Ces oscillations de la puissance autour de la puissance maximale, caractérisent la P&O en générale par rapport aux différents contrôles ORB (Optimum Relationship-Based control)

Pour pallier à tous les inconvénients la P&O basique, nous présenterons dans ce qui suit une technique qui réunit entre les avantages de la P&O évoluée, et la rapidité du contrôle ORB sans la nécessité de connaître au préalable les caractéristiques du système [57]

Comme nous l'avons cité au chapitre 4.1.3, la puissance maximale à la sortie du redresseur à diodes est donnée par :

En intégrant l'équation III-33 dans III -30 , nous obtiendrons :

$$P_{dc-max} = K_{opt} \cdot U_{dc-opt}^3 = U_{dc-opt} \cdot I_{dc-opt} \quad (III-35)$$

D'où

$$I_{dc-opt} = K_{opt} \cdot U_{dc-opt}^2 \quad (III-36)$$

La Stratégie MPPT proposée se base sur deux modes de contrôle, à savoir un mode de dressage qui consiste à trouver la relation K''_{opt} via l'algorithme P&O avancée, et un mode routine basé sur le contrôle par la relation optimal (ORB control) qui consiste à utiliser la relation K''_{opt} dans la suite de la stratégie MPPT en utilisant un contrôle ORB

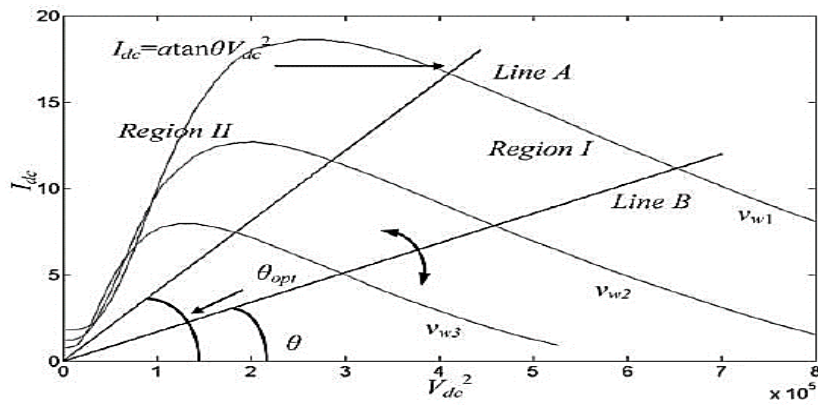


Figure III-31: Courbe Du Courant Optimal Et La Tension Optimale.

A cause du vieillissement de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, la relation optimale peut changer engendrant ainsi une réduction de l'efficacité du contrôle ORB. Pour pallier à ceci le mode dressage peut être ré-exécuter afin de mettre à jour le rapport K''_{opt}

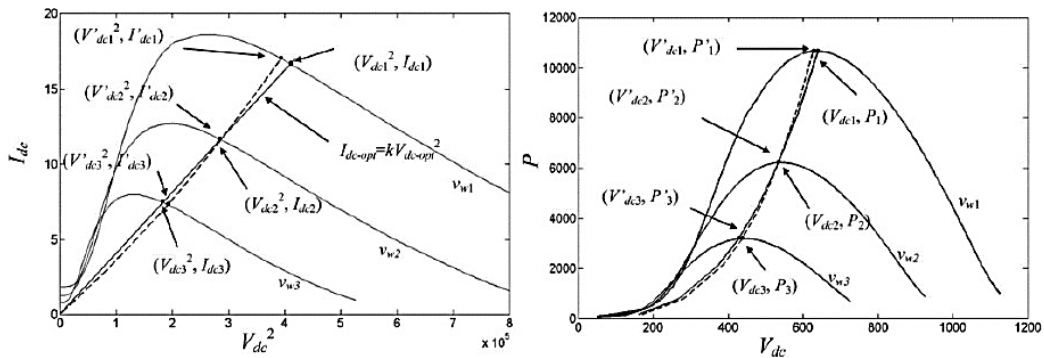


Figure III-32: Courbe Caractéristique Du Courant En Fonction du Carre de La Tension, et de La Puissance En Fonction de La Tension.

La Figure III-32 donne la courbe $I_{dc} = (U_{dc2})$ pour différent vitesse de vent. La ligne sur la courbe à gauche représente la droite des paires), (2 $optdcoptdc$ UI pour lesquelles la puissance soutirée de l'éolienne est maximale. A partir de cette courbe on peut aussi exprimer la relation optimale en Vdc et Idc de la manière suivante :

$$I_{dc-opt} = a. \tan(\theta_{opt}). U_{dc-opt}^2 \quad (III-37)$$

Le coefficient a tiens compte de la différence d'ordre de grandeur du courant et de la tension, il peut être choisi de façon empirique, mais en pratique il faut le choisir selon les grandeurs nominales de la GSAP. L'angle θ est l'angle qui sera contrôlé par l'algorithme MPPT afin de trouver θ_{opt} .

Selon les deux courbes de la Figure III-32, nous pouvons voir que plus l'angle θ se rapproche de θ_{opt} , le plus la puissance est maximale, ça veut dire que la courbe de puissance en fonction de θ admet un seul extremum maximal.

III.8.2. Autres méthodes MPPT appliquées à un système éolien :

III.8.2.1: Méthode de gradient :

Cette méthode nécessite la mesure de la puissance fournie et faire accès de contrôle sur la vitesse de rotation de la turbine ($\Omega_{turbine}$) et le rapport cyclique (D) qui est en relation directe avec le convertisseur DC/DC pour avoir un Voltage de sortie bien adapté à la charge.

En pratique, à une vitesse du vent bien précise, le rotor tourne à une vitesse angulaire très proche de celle optimale, donc il suffit de (Figure III-33) :

– Si, $\Omega > \Omega_{opt} \Rightarrow$ Diminuer Ω , Augmenter le rapport D

– Si, $\Omega < \Omega_{opt} \Rightarrow$ Augmenter Ω , Diminuer le rapport D

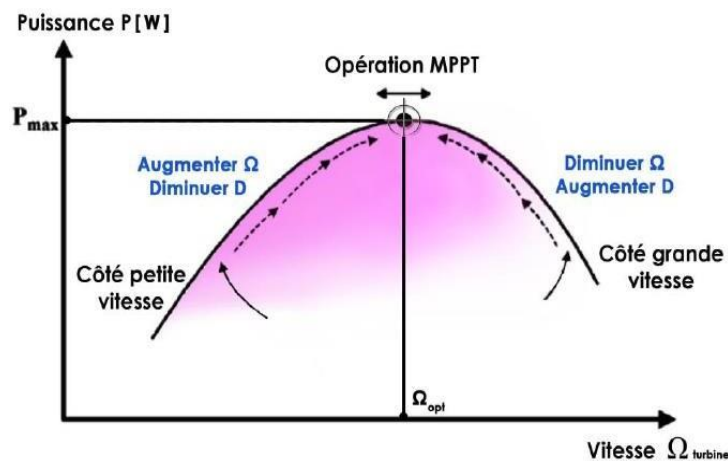


Figure III-33 : MPPT éolienne selon la puissance fournie.

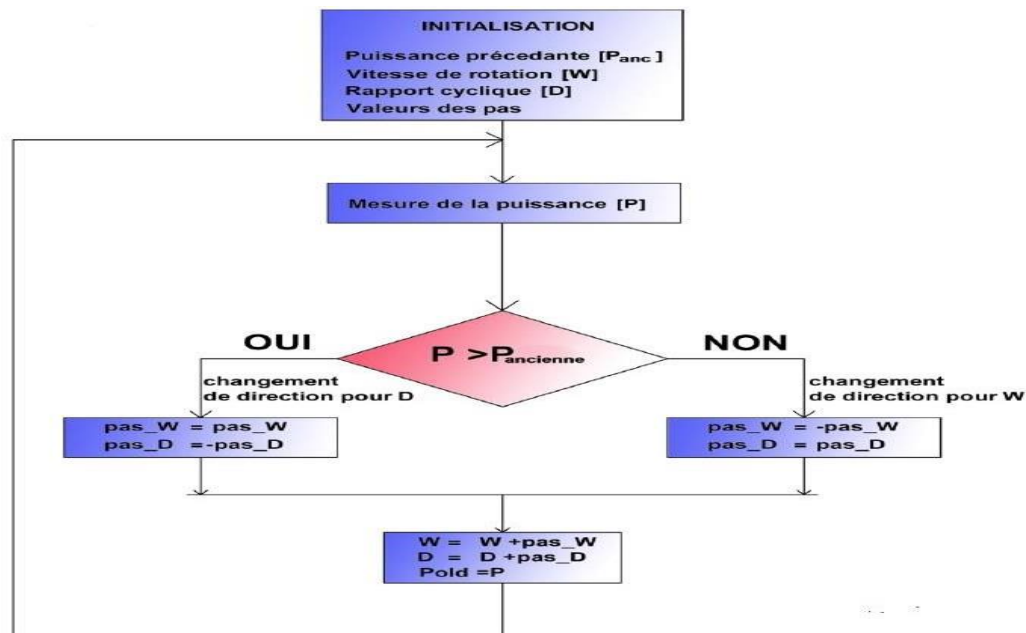


Figure III-34 Algorithme : MPPT gradient.

Le Control se fait en comparant la puissance optimale mesurée à celle du fonctionnement du générateur et de contrôler le rapport cyclique du convertisseur qui acte comme une loupe fermée variant la vitesse de rotation pour arriver au fonctionnement optimale.

III.8.2.2. Structure de base d'un contrôleur flou dédié à l'aérogénérateur :

Comme décrit auparavant, la conception d'un régulateur flou pour la commande des entraînements électriques exige les choix des paramètres suivants :

- Choix des variables linguistiques ;
- Choix des fonctions d'appartenance ;
- Choix de la méthode d'inférence ;
- Choix de la stratégie de défuzzification.

La Figure III-35 illustre la Structure du contrôleur flou pour MPPT éolienne

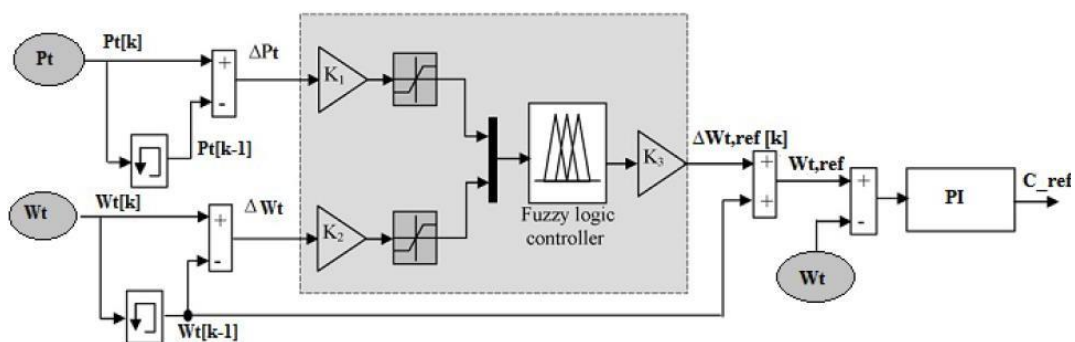


Figure III-35 : Structure du contrôleur flou pour MPPT éolienne.

III-9- Conclusion :

Dans le présent chapitre nous avons abordé les bases de poursuite de la puissance maximale. Après avoir donné un aperçu sur les différents modes de connexion du Générateur photovoltaïque (PV-Charge) et des systèmes éoliens, les types de commandes MPPT et la classification des différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) appliquées aux systèmes hybrides.

Des différentes méthodes MPPT appliquées aux systèmes hybrides Eolien-Photovoltaïque ont été détaillés dans ce chapitre.

Le prochain chapitre sera consacré à la présentation des résultats des simulations et leurs interprétations pour différentes configurations des systèmes hybrides.

Chapitre IV :

Simulation et optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque

IV.1. Introduction :

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien, le photovoltaïque et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté [58]. Cependant le dimensionnement et l'architecture de système de génération d'énergie est une étape primordiale dans la conception et la réalisation de même système, ce qui n'est pas bien traduisé dans la littérature. Plusieurs études prennent le paramètre variable de la plupart des énergies renouvelables pour la réalisation d'un système de contrôle complexe [59]. La modélisation étant aussi un facteur majeur pour des études élaborées afin de simuler un bon fonctionnement de système. Plusieurs sont les logiciels qui nous permettent de la faire, à savoir le logiciel HOMER et l'environnement Matlab\Simulink.

Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposée dans ce chapitre. Ensuite il est simulé sur le logiciel Matlab\Simulink en exploitant les différents outils existants, notamment la SimPowerSystems toolbox. Les résultats de simulations seront présentés pour confirmer le bon fonctionnement de système.

VI.2. Systèmes Hybrides (SEH) :

Un système hybride est réalisé à partir de multi-sources de production d'électricité. Il est capable d'un fonctionnement autonome qui est parfois associé à un système de stockage. La fonction d'un SEH de production d'électricité est de fournir de l'énergie à différentes charges, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. Le SEH souvent associé à la production d'électricité dans les régions isolées et se présente sous forme: [60]

✚ D'une seule source d'énergie renouvelable avec ou sans groupe électrogène. Dans ce cas, la présence d'un dispositif de stockage est indispensable afin de pouvoir satisfaire, à tout instant, la demande du consommateur ;

✚ De deux ou plus de deux sources à énergie renouvelables avec ou sans groupe fonctionnant avec un système de stockage ;

Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans le SEH. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, marémotrice, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène

(pile à combustible). Les convertisseurs, les charges, peuvent également faire partir d'un SEH. Généralement, ces variantes peuvent être connectées ou indépendantes aux réseaux de distribution.

Les SEH de production d'énergie connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. Au fil du temps, ces systèmes réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs.

VI.3. Architecture Des Systèmes Hybrides :

Les différents générateurs d'énergies qui construisent le système hybride peuvent se connecter en plusieurs configurations ce qui rend la topologie du système plus variée selon notre besoin. Trois types d'architectures peuvent exister le plus souvent, une à un bus CC et une à un bus mixte CA/CC et une autre à un bus CA.

VI.3.1. Architecture à bus CC:

La majorité de ces systèmes de petite puissance présente une structure où le bus CC de la batterie est le point central de connexion. En général, les petites éoliennes produisent de l'électricité en courant alternatif à fréquence variable puis injectée dans le bus CC (au travers d'un convertisseur si nécessaire). Cette énergie est ensuite stockée ou reconvertie en courant alternatif (à amplitude et fréquence fixes) à travers un onduleur pour alimenter la charge. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge. La puissance délivrée peut être contrôlée en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable (Figure VI.1). Les avantages et les inconvénients d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantages :

- La connexion de toutes les sources sur un bus CC simplifie le système de commande.
- Les générateurs peuvent être dimensionnés 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 à 85%.

+ 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 ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

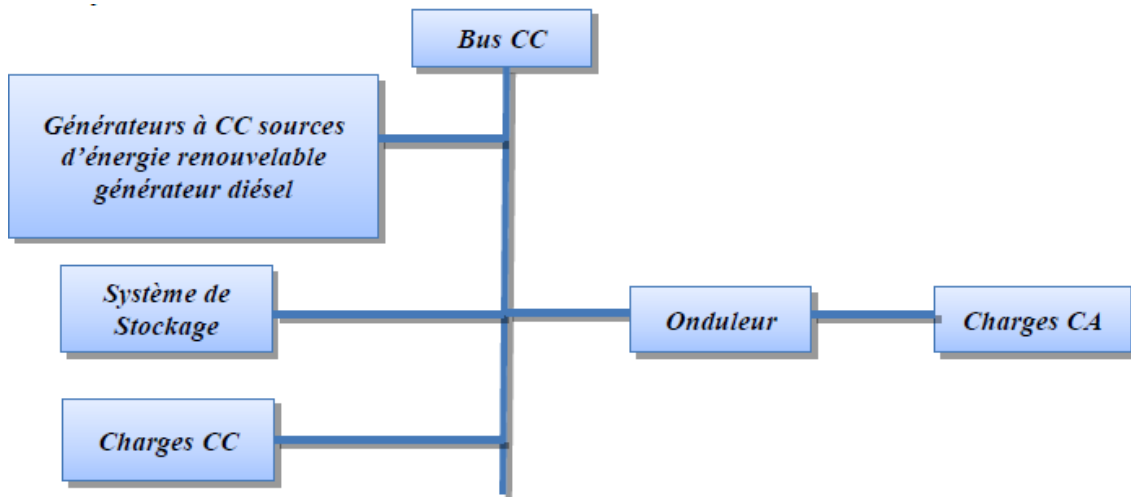


Figure VI-1 : Configuration d'un SH à bus à Courant Continu (CC) [60]

La commande de ces petits systèmes dépend de l'état de charge de la batterie.

Le générateur éolien doit limiter sa tension de sortie et délivrer la puissance produite lorsque la batterie est complètement chargée et ne peut donc plus stocker d'énergie. À l'opposé, l'onduleur et la charge doivent se déconnecter pour arrêter la décharge de la batterie quand la tension atteint un niveau limite inférieur prédéfini. Ces deux propriétés impliquent une conception adaptée du système, optimisant ainsi les ressources énergétiques et conduisant à une quantité minimale d'énergie non fournie.

IV.3. 2. Architecture mixte à bus CC / CA :

La configuration à deux bus est présentée dans la Figure VI.2. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration avec un bus CC. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge à courant alternatif directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de l'onduleur. 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 courant continu/courant alternatif

Chapitre VI: Simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque

(fonctionnement onduleur). Quand il y a un surplus d'énergie, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). On peut aussi utiliser un convertisseur bidirectionnel mais la commande est alors différente et moins souple.

La faisabilité technique et économique de cette structure est liée aux progrès des convertisseurs statiques et de leur commande. L'avantage principal est la modularité qui permet la connexion et/ou le remplacement de modules de production en cas de besoin de plus d'énergie. L'installation des éléments sur tout le mini-réseau est possible, ce qu'on ne peut pas faire dans le cas d'un bus CC.

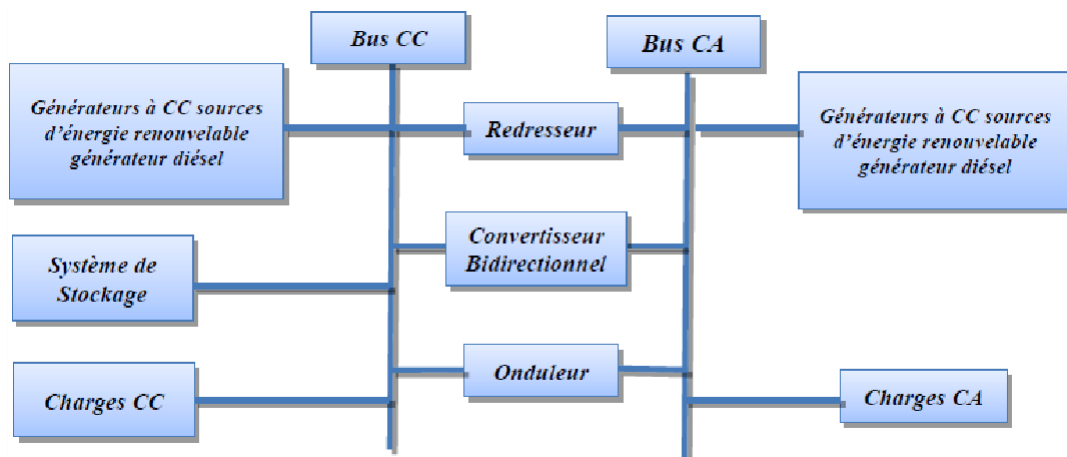


Figure VI-2 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA

➤ Avantages :

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

➤ Inconvénients :

- Besoin de technologies évoluées, donc chères et des applications difficiles dans des lieux isolés,
 - dans les systèmes fonctionnant avec une forte capacité de stockage, cette topologie présente des niveaux de pertes supérieurs parce que l'énergie de stockage doit passer du point de génération vers le bus à courant alternatif et traverser le convertisseur bidirectionnel qui relie la batterie au système.

Dans le contexte d'un système autonome de petite puissance, on utilise l'architecture à bus à

courant continu pour sa simplification et son faible coût.

IV.3.3. Architecture à bus CA :

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA). Toutes les sources de productions sont reliées au bus CA via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus. Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (Figure. VI.3) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires.

En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

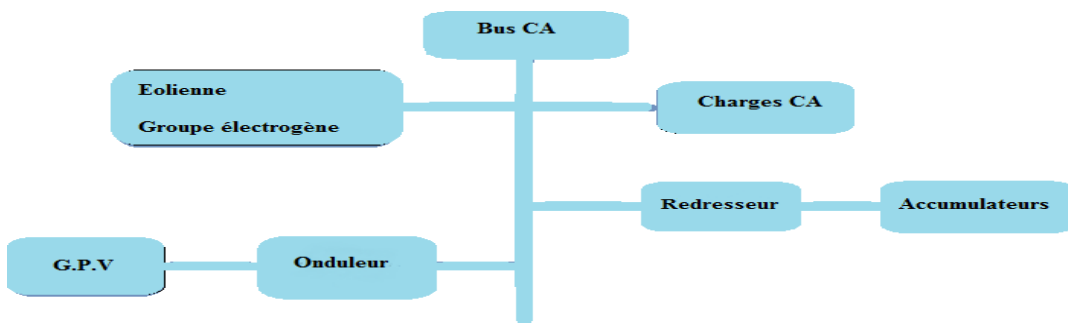


Figure VI-3 : Configuration du SH à bus CA.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

➤ Avantages :

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

+ Inconvénients :

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

IV.4. Systèmes de stockage :

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en quantité modérée pour un cout raisonnable. Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance. Le stockage d'énergie le plus utilisé est la batterie. Toute batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (Figure. VI.4). La capacité énergétique de la batterie (exprimée en wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

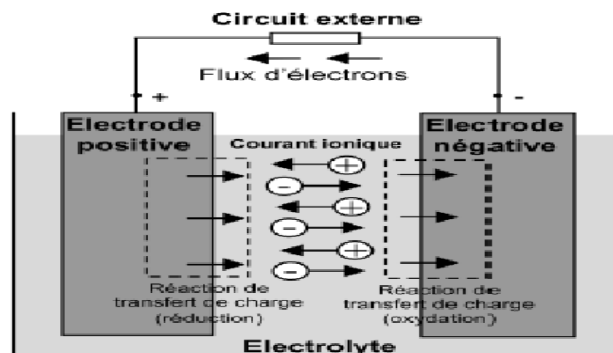


Figure VI-4 : Cellule électrochimique de base

L'anode est l'électrode à laquelle l'oxydation (perte d'un ou plusieurs électrons) se produit et à partir de laquelle les électrons vont alimenter le circuit extérieur (la charge). La cathode est l'électrode à laquelle se produit la réduction (gain d'un ou plusieurs électrons) ; les électrons revenant de la charge arrivent sur cette électrode. En décharge, l'anode est la

borne négative de la batterie et la cathode la borne positive. Par contre, en charge, l'électrode négative est la cathode et l'électrode positive est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens. [11] Les paramètres électriques suivants sont généralement employés pour caractériser une batterie :

- ✚ La capacité nominale q_{nom} est le nombre d'ampères-heures (Ah) qui peut être extrait de la batterie, dans des conditions de décharge prédéterminées.
- ✚ L'état de charge SOC (State-of-charge) est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominale : $SOC = q/q_{nom}$ ($0 < SOC < 1$). Si $SOC = 1$, la batterie est totalement chargée si $SOC = 0$, la batterie est totalement déchargée.
- ✚ Le régime de charge (ou décharge) est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée). Il est exprimé en heures. Par exemple, pour une batterie de 150Ah déchargée à 5A, le régime de décharge est 30h.
- ✚ La durée de vie est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale.

Malgré le problème de capacité et de durée de vie, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée pour le système de stockage des sites isolés pour son prix très concurrentiel et sa robustesse. C'est pour ces raisons que nous avons choisi dans cette thèse d'utiliser des batteries plomb-acide pour le système de stockage, comme le prouve la figure VI-5.

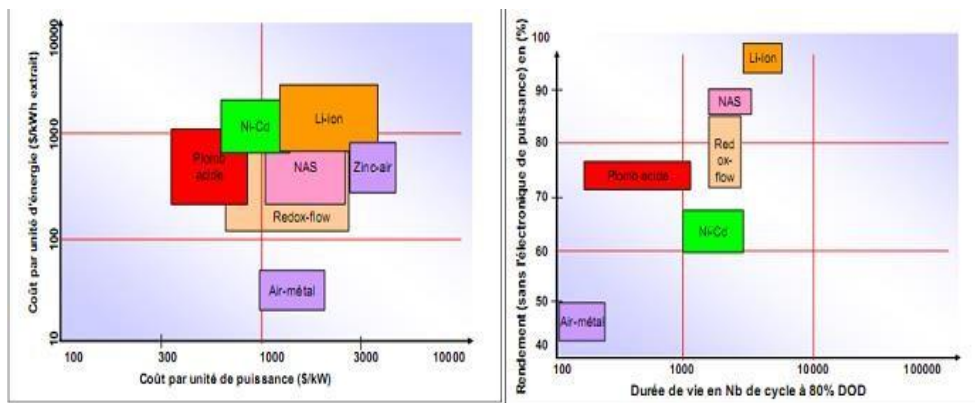


Figure VI-5 : Coûts ; durée de vie et rendement des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques [11]

VI.5. L'environnement MATLAB/Simulink:

MATLAB/Simulink sont des produits de Math Works Inc., et sont utilisés pour le développement des techniques de calcul et de la conception basée sur les modèles.

MATLAB est destiné essentiellement à réaliser des calculs mathématiques, la visualisation, l'analyse des résultats et l'édition de nouveaux programmes utilisateurs. Simulink est l'extension graphique de MATLAB et sert à la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques. Cet environnement graphique est une plate forme de simulation multi domaines basée sur les flots de signaux d'entrée de sortie. Il contient un ensemble de libraires qui peuvent être adaptées et/ou enrichies aux besoins du concepteur.

Les modèles basés sur des diagrammes blocs se composent de blocs et de connexions (signaux). La relation entre les éléments du diagramme bloc et les signaux qui les connectent décrit le système dynamique. Cependant, dans la bibliothèque de Simulink on retrouve deux classes de blocs. La première classe représente les éléments constituant le système (blocs non virtuels) et la deuxième classe concerne les blocs qui n'ont pas de rôle dans le système (blocs virtuels : gain, multiplicateurs..etc.). Les blocs de Simulink sont constitués de : des générateurs de signaux, des observations des signaux, des systèmes continus et des éléments de gestion des signaux.

La Figure IV.6 présente la fenêtre de navigateurs des bibliothèques Simulink.

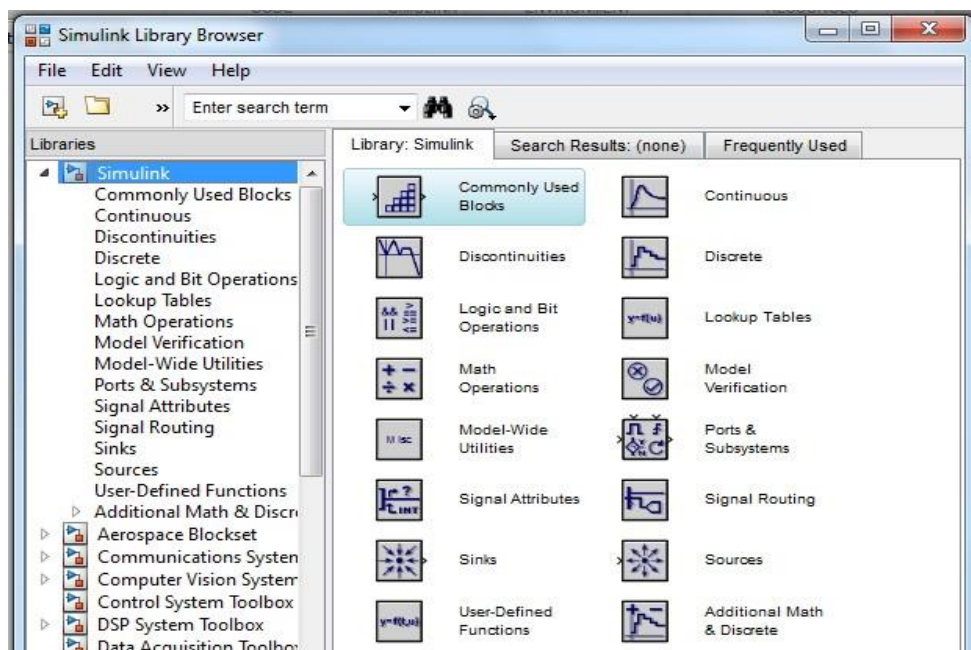


Figure IV-6- Navigateurs des bibliothèques Simulink.

VI.6. Processus de simulation sous MATLAB/Simulink :

La simulation des systèmes dynamiques sous Simulink (R2013a) consiste à calculer les états du système et les sorties pour une plage de temps. Simulink fait appel au compilateur qui convertit le modèle dans une fenêtre exécutable et procède comme suit :

- ✚ Evaluation des expressions des modèles des blocs pour déterminer leurs valeurs,
- ✚ Détermination des attributs des signaux (nom, type de données et dimension) qui ne sont pas explicitement spécifiés dans le modèle, et test si chaque bloc peut accepter les signaux qui lui sont connectés,
- ✚ Réalisation des optimisations spécifiées dans le panneau pour la configuration des paramètres,
- ✚ Mettre à plat le modèle hiérarchique en remplaçant les sous-systèmes virtuels qui les composent,
- ✚ Détermination de l'ordre d'exécution des méthodes des modèles des blocs (Outputs, Update, Dérivative),
- ✚ Détermination des temps d'échantillonnage qui ne sont spécifiés explicitement de tous les blocs dans le modèle,
- ✚ Après cette phase, Simulink alloue la mémoire nécessaire à l'exécution du modèle (signaux, les états et les paramètres d'exécution).

VI.7. Boîte à outils SimPower Systems :

SimPowerSystems toolbox est un ensemble des composants électriques et mécaniques qui vient s'ajouter à la bibliothèque de Simulink. Les composants ajoutés sont à la base des éléments destinés à des simulations de l'électronique de puissance. Il repose sur l'utilisation des ports électriques au lieu des signaux. Ces ports traitent des courants et des tensions, et le schéma obtenu est celui d'un circuit électrique. Le compilateur de SimPowerSystems génère le modèle de l'espace d'état du circuit pendant la phase d'initialisation. [61]

VI.8. Optimisation de l'électrification d'un site isolé :

Dans les réseaux de petites puissances en site isolé, trois critères peuvent être pris en compte pour leur classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique ou conventionnelle qui peut être un

générateur diesel, une micro-turbine à gaz... Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage permettant d'assurer une meilleure satisfaction des besoins du consommateur pendant les périodes de chute et d'arrêt de production. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries, des réservoirs d'hydrogène ou des volants d'inertie...

Le dernier critère de classification possible est celui relatif aux types de sources d'énergie renouvelable utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, une petite centrale hydroélectrique ou une combinaison de ces sources. Les systèmes sans source conventionnelle fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire impossible. Notre système étudié en est un exemple, il n'est constitué que de deux sources d'énergie renouvelable : photovoltaïque et éolienne (Figure IV.7). La puissance délivrée peut être contrôlée en incorporant un régulateur de poursuite du point de puissance maximale pour ces deux sources d'énergie renouvelable [57]

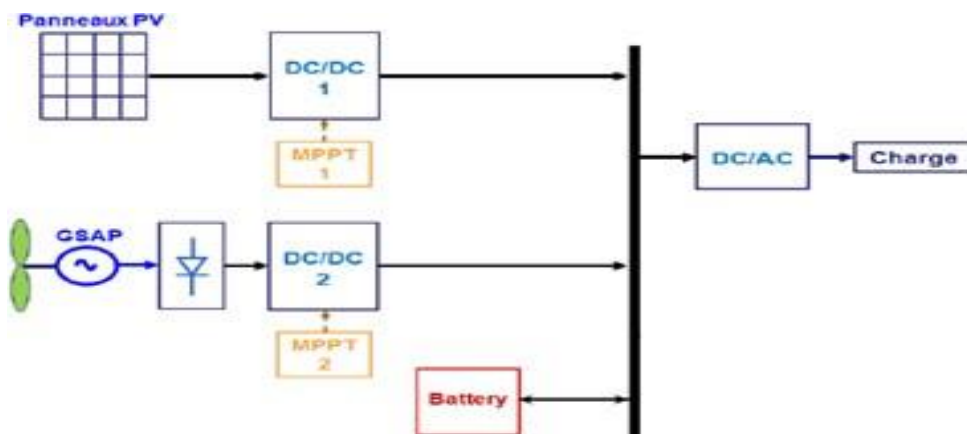


Figure IV-7- Structure d'un système isolé.

Cette configuration est simulée sous MATLAB/Simulink en utilisant le SimPowerSystems toolbox et le schéma bloqué est la suivante :

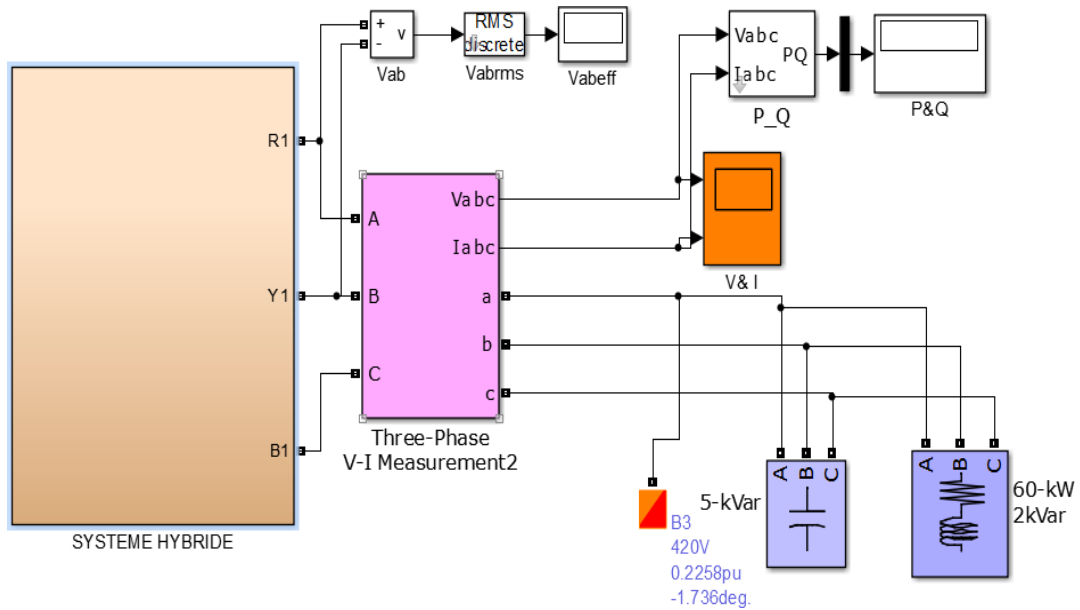
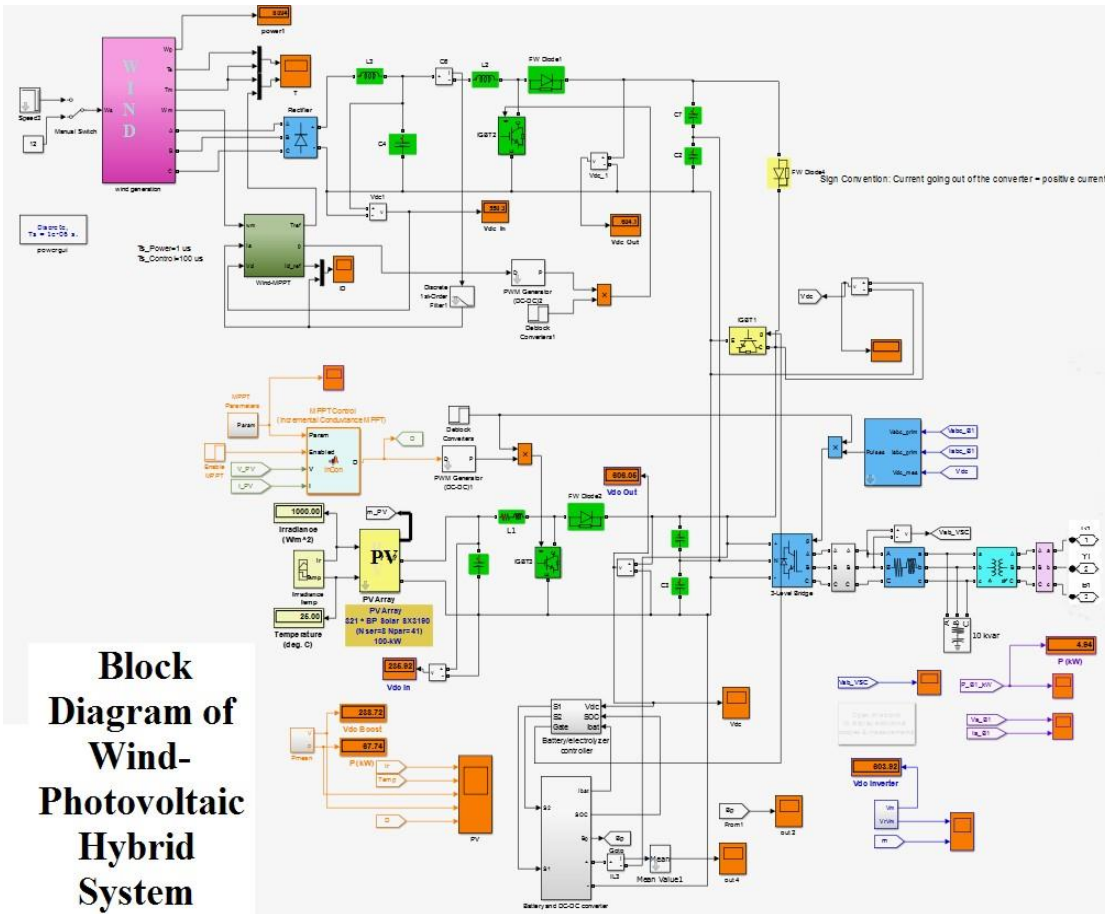


Figure IV-8- Schéma bloqué d'un système hybride alimentant un site isolé.

La puissance délivrée par les deux sources peut être contrôlée en incorporant un régulateur de poursuite du point de puissance maximale. Un dispositif de stockage (batteries) est ajouté au système permettant d'assurer une meilleure satisfaction des besoins du consommateur pendant les périodes de chute et d'arrêt de production.

Le couplage entre les deux sources est assuré par des bus continus, la tension obtenue est convertie en triphasés alternatifs par le biais d'un onduleur triphasé commandé par MLI. La tension alternative obtenue alimente une charge inductive isolé. Le bloque Système hybride est constitué de deux sources d'énergie renouvelable : photovoltaïque et éolienne , il est détaillé à la (Figure IV.9).



Block Diagram of Wind-Photovoltaic Hybrid System

Figure IV-9- Schéma bloque détaillé du Système hybride

IV.8.1 Caractéristique du système hybride simulé :

La configuration choisi pour notre simulation est celle à deux bus à CC et à CA. Ou le système de génération photovoltaïque est raccordé avec le système éolien et le système de stockage par le biais d'un bus à courant continu. Ensuite la charge est raccordé par le biais d'un bus à courant alternatif en introduisant un convertisseur (CC/CA).

IV.8.1.1 Système Photovoltaïque :

On a utilisé un générateur PV de type BP Solar SX3190 constitué de 328 modules 8 en série et 41 en parallèle ayant une puissance globale de 65 kW , voir (Tableau IV-1).

Chaque module contient 50 cellules raccordé avec un hacheur boost caractérisé par : $C1=100\mu F$, $r=0.005\Omega$, $L= 3mH$, $C2= C3=24000\mu F$, avec une commande MPPT de type perturbation et observation et un onduleur triphasé commandé par la commande MLI.

Caractéristiques électriques	E=1000W/m ² ; T=25 C°
Puissance maximale de module (P _{max})	190 W
Courant de court-circuit (I _{cc})	8.5 A
Tension de circuit ouvert (V _{oc})	30.6 V
Courant au point de MPPT (I _m)	7.82 A
Tension au point de MPPT (V _m)	24.3 V
Nombre de modules en série(N _s)	8
Nombre de modules en parallèle (N _p)	41
Nombre des cellules par module	50

Tableau IV-1- Caractéristiques électriques de Module PV BP SX 3190.

On gère cette configuration avec la variation de l'éclairement et la température (Figure VI.10)

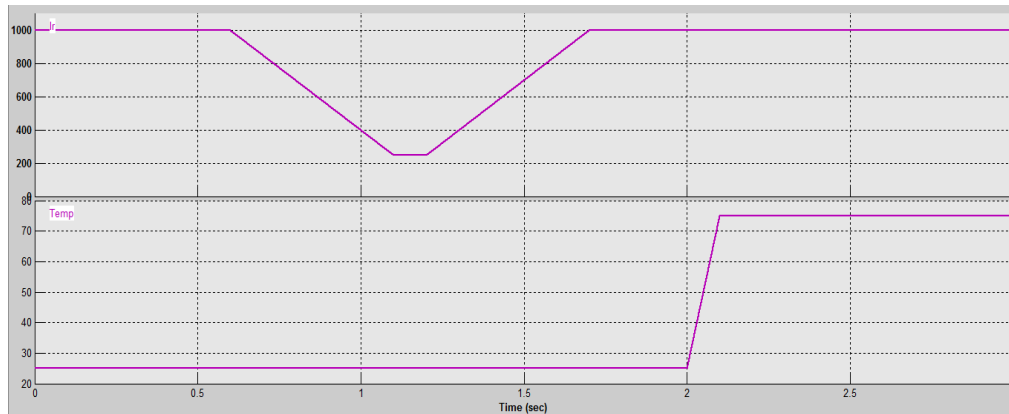


Figure IV-10- Variation de l'éclairement et la température du Panneau Photovoltaïque en fonction du temps

IV.8.1.2 Système Eolien :

L'éolienne est constitué d'une génératrice synchrone à aimant permanent ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques de la turbine	
Puissance mécanique nominale	8500 W
Puissance électrique de base	9444.44 VA
Vitesse de base du vent	12 (m/s)
Caractéristiques du PMSG	
Tension composée	420 V
Resistance statorique par phase	0.425 Ω
Inductance de l'armature	0.000835 H

Tableau IV-2- Caractéristiques Techniques de l'éolienne

Les tensions à la sortie de la génératrice sont alternatives de forme sinusoïdales, ils sont redressés par un redresseur triphasé. La tension continue obtenue alimente un hacheur boost caractérisé par : $C4=1200\mu\text{F}$, $L3= L2= 2\text{mH}$, $C2= C7=2400\mu\text{F}$, avec obtention de la puissance maximale par la commande indirecte par le pilotage du courant. La tension continue obtenue est celle à la sortie du système PV , elle sont tous couplés avec une batterie. Puis cette tension est convertie en alternative via un onduleur triphasé commandé par la commande MLI.

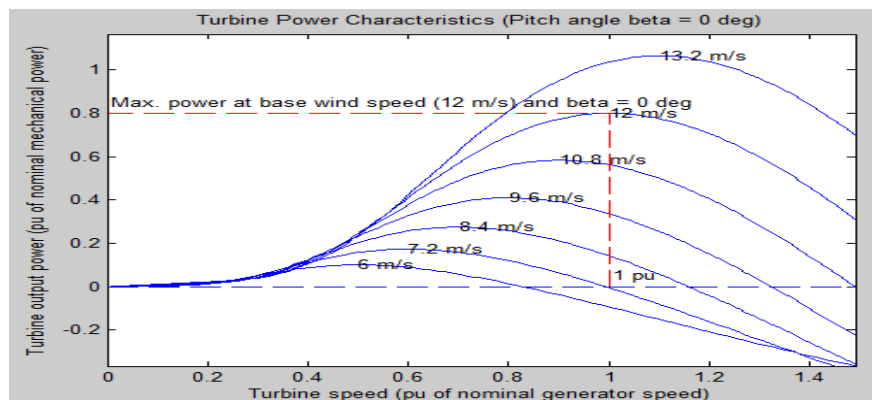


Figure IV-11- Caractéristique de la puissance générée par la turbine pour un angle d'attaque $\beta=0^\circ$.

IV.8.1.3 Système de stockage :

Le stockage d'énergie contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale, tout en réduisant les émissions polluantes. Dans notre étude les accumulateurs électrochimiques (batterie) utilisée est de type plomb-acide ayant les caractéristiques schématisées sur la figure suivante:

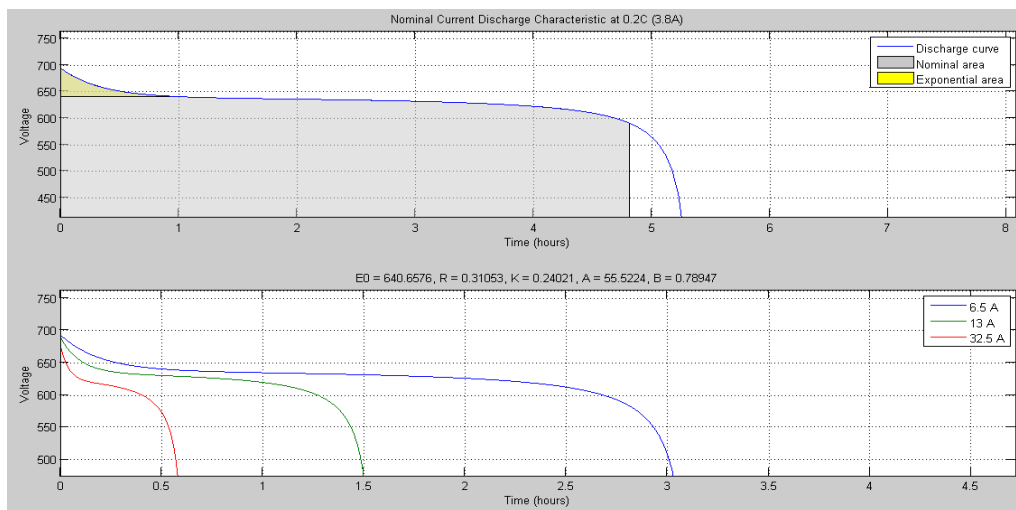


Figure IV-12- Caractéristique de décharge de la batterie pour différents valeurs du courant

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :
Rapports de chargement et déchargement: Si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

Température: Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.
Profondeur de décharge: La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.
La tension d'utilisation: C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

Le rendement: C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

Le taux d'autodécharge: C'est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre une brève description des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique est réalisée, les principales notions liées au type d'architecture des ces systèmes ont été aussi présentés. Par la suite une simulation des systèmes hybrides éolien - photovoltaïque alimentant un site isolé , raccordé au réseau de distribution basse tension et raccordé au réseau du transport HTB ont été élaborée, sous l'interface Simulink du Matlab.

D'après les résultats obtenus , on remarque que la combinaison des sources d'énergie renouvelables dans la présence d'un système d'accumulateurs électrochimiques à un avantage remarquable vu la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride ainsi que l'assurance de la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique.

Nous avons utilisé un bus continu qui reçoit l'énergie produite par les sources photovoltaïque et éolienne puis livrée au consommateur à l'aide d'un onduleur. Un des avantages de cette structure est l'utilisation des batteries nécessaires en cas de besoin pour compenser un éventuel manque de puissance. Pour avoir un comportement optimale de l'installation d'un point de vue de puissance, nous avons développé des superviseur (MPPT) ce qui permet une gestion efficace et rationnelle de l'énergie pour satisfaire les besoins du consommateur.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'étude, à la modélisation et à la simulation de systèmes hybrides pour la production d'électricité autonome à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne), ainsi qu'à la connexion de ce système hybride au réseau de transport haute tension et au réseau de distribution basse tension. Pour ce faire, un système d'analyse de ces deux sources d'énergie a été développé qui prend en compte les fluctuations climatiques.

Au début de cette mémoire, nous avons passé en revue les nombreuses formes de sources d'énergie renouvelables, suivies de l'état de l'art sur les systèmes de production d'énergie hybrides et les différents composants qui entrent dans leur construction.

Dans le deuxième chapitre, la modélisation de la chaîne de conversion hybride (éolienne - photovoltaïque) est décrite en détail. Dans ce contexte, chaque bloc de la chaîne de conversion d'énergie du système, ainsi que la commande de chaque convertisseur, ont été modélisés. Le problème est généralement un système qui n'est pas utilisé à son plein potentiel. Par conséquent, afin de maximiser les performances du système, une certaine personnalisation est nécessaire (MPPT). Pour parvenir à cet objectif, on a détaillé différentes techniques d'optimisation appliquées au système hybride dans le chapitre qui suit. On a étudié l'optimisation conventionnelle de la puissance de chaque générateur qu'on a considéré comme référence. Une variation très sensible du rapport cyclique du hacheur coté générateur photovoltaïque (GPV) lorsque l'éclairement et la température varient est constatée. Cette sensibilité est dépendante du type de source et de la nature de la charge. De même pour le système éolien. Afin de résoudre ce problème, on a présenté quelques algorithmes basés sur les techniques numériques et l'intelligence artificielle (floue et neuronale). Pour l'optimisation par l'algorithme « Perturber et Observer) (P&O) et par celle de l'incrément de conductance, les résultats de simulation ont montré que cette méthode est particulièrement appropriée pour le cas des variations de l'éclairement se produisant en raison des conditions climatiques, ainsi que pour le problème d'oscillations, surtout pour les faibles éclaircissements. Mais il existe un inconvénient de cette technique qui correspond au cas de changement rapide des conditions atmosphériques (nuage mobile). Dans ce cas, cette méthode entraîne une divergence et une grande oscillation autour de point optimal à cause du pas d'incrément de conductance pour les faibles éclaircissements. [62]

Le contrôleur proposé pour la poursuite du point de puissance maximale du système éolien est indépendant de la courbe de puissance et des conditions météorologiques. Le

Conclusion générale

capteur de vitesse, est remplacé par un capteur de tension qui est moins cher et plus stable. Avec cette nouvelle structure de commande, l'éolienne produit la puissance maximale dans toutes les conditions climatiques et/ou d'exploitation avec précision et robustesse. Les résultats de simulation sont présentés pour illustrer l'efficacité de cette approche.

Dans un site isolée, le besoin de continuité du service en présence de la disponibilité intermittente des sources renouvelables entraîne l'utilisation indispensable d'un système de stockage. Dans ce contexte, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée grâce au bon rapport prix/qualité. Pourtant, la mauvaise utilisation de la batterie peut entraîner sa défaillance, cela implique le besoin d'entretenir et remplacer souvent celle-ci. Le coût d'installation et de fonctionnement du système est donc augmentée. Alors, il faut non seulement avoir un schéma d'exploitation exigible des sources, mais aussi prendre en compte la durée de vie des composants, surtout de la batterie. Le dernier chapitre récapitule la simulation des différentes configurations des systèmes hybride (éolien-photovoltaïque) raccordés au réseau basse tension de distribution et au réseau haute tension du transport (HTB) ainsi qu'un réseau isolé. De cette étude ressort l'importance de la modélisation du raccordement du système hybride au réseau électrique. La commande de l'onduleur et les systèmes de productions déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension.

D'une manière générale le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans notre pays l'Algérie. Néanmoins, tous ces résultats n'excluent pas des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur. Il s'agit en fait des points suivants :

L'étude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes hybrides afin d'améliorer la qualité d'énergie.

Une intégration d'un système hybride éolien- photovoltaïque avec stockage dans notre ville d'El oued avec le suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour faire face à la pointe estivale. L'introduction des onduleurs multi niveau et d'autres méthodes de commande comme la commande SVM pour assurer le raccordement au réseau.

Références

- [1] S. BELAKEHAL « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE 2010
- [2] H. KANCHEV: «Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain » Thèse de Doctorat, PRES Université Lille Nord-de-France2014
- [3] C. DARRAS, “ Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE’’, Thèse deDoctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011
- [4] A. MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005
- [5] « La cellule photovoltaïque ». Document technique, Centre de recherche de Développement DE l'ECAM
- [6] R. MAOUEDJ, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzaréah ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd. Département de physique, 2005
- [7] C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003
- [8] T. FOGELMAN, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME) – septembre 1982
- [9] A.LABOURET, M. VILLOZ, « Energie solaire Photovoltaïque ». Livre, 3ème édition, Paris France, 2003
- [10] L. ABDELHAMID, « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ». Thèse Doctorat, Université de Batna, 2012
- [11] L. ABBASSEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque ».Mémoire Magister, université de Tizi-Ouzou, 2011
- [12] L.PROTIN and S.ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique d'ingénieur, D 3360,1996

Références

- [13] M.Huart, « Guide des énergies renouvelables », Association pour la promotion des énergies renouvelables, Ministère de la Région wallonne éditeur, 1994
- [14] L. Chang, 'Systèmes de Conversion de l'Energie Eolienne', IEEE Canadian Review, pp. 1 – 5,2002
- [15].BOUKHEZZAR, « Stratégies de Commande pour L'optimisation et la Régulation de Puissance des Éoliennes à Vitesse Variable ». Thèse de Doctorat de l'université de Paris XI France, 2006
- [16] N. MEKKAOUI, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée ». Mémoire Magister, Université Batna, 2004
- [17] L.KHATTACHE, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentée ». Mémoire Magister, Batna, 2007
- [18] A. RAMLI, « Contribution à l'amélioration des performances d'un aérogénérateur basé sur MSAP ». Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2010
- [19] N. La verdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens –Intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [20] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [21] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL)
- [22] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [23] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [24] N. ZIDANE, «Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Énergies Renouvelables ». Mémoire Magister, université farhat abbas setif ,2014
- [25] K. AMOKRANE, « Etude et Performances des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire Magister, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2008.

Références

- [26] K. Mammam and A. Chaker, 'Fuzzy Logic-Based Control of Power of PEM Fuel Cell System for Residential Application', Leonardo Journal of Sciences, N°14, pp. 147 – 166, 2009.
- [27] B. Brousse, « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique », Thèse Doctorat, Université De Limoges, 2004
- [28] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien - diesel », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4, 2008
- [29] W. M. ANTHONY, « modeling and analysis of a photovoltaic system with a distributed energy storage system », Thèse de doctorat, San Luis Obispo Faculty of California Polytechnic State University, 2012
- [30] R. KHEZZAR, M. ZEREG et A. KHEZZAR, « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, 2010
- [31] A. CHOUDER et al, « Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters », Simulation Modelling Practice and Theory ELSEVIER 20, 46–58, 2012..
- [32] H. YINGLEI et al, « Research on Testing Technology of High-power Photovoltaic Arrays », Revue des Energies Renouvelables Vol.14 N°2 (2011) 219 – 228, 2011.
- [33] N. ABU-TABAK, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [34] M. Belatel et al, « Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte », Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1, 2011.
- [35] B. FELLAH, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2012.
- [36] A. OULD MAHMOUD, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixte » thèse de doctorat de Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2008.
- [37] M. BELHADJ, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007
- [38] L. ZAROOUR, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.

Références

- [39] O. Gergoud " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ",Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan 2001
- [40] Martin AIME : ' Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques Application aux nouvelles structures multicellulaires', Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Novembre 2003
- [41] Michel Capderou " Atlas Solaire de l'Algérie ", Tome 1, volume 1,2, OPU, 1987
- [42] F. Chekired « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [43] F. Valenciaga Et P. F. Puleston, « Supervisor Control For A Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind And Photovoltaic Energy ». Ieee Transactions On Energy Conversion, Vol. 20, N°. 2, 2005.
- [44] K. Kassmi, M. Hamlaoui et F. Olivier " Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462
- [45] Zarour, « Etude Technique D'un Système D'énergie Hybride Photovoltaïque Eolien Hors Réseau». Thèse Doctorat, Université De Batna, 2010.
- [46] S. Lalouni, « Optimisation De La Qualité D'énergie Electrique Dans Le Cas D'un Chargeur De Batterie». Mémoire Magister, Université De Bejaia, 2005.
- [47] S. Thangavel, M. Y. Sanavullah « Maximum Energy Extraction in Wind Solar Hybrid Energy Conversion System P. Aravindan» European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.63 No.1 (2011), pp. 90-98
- [48] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006
- [49] N. Hamrouni, M. Jraidi, « Measurements And Simulation Of Pv Pumping Systems Parameters Using Mppt And Pwm Control Strategies » IEEE Melecon, Benalmádena (Málaga), 2006
- [50] Abdelmalek Boulahia : ' Etude des Convertisseurs Statiques destines a la Qualité de l'Energie Electrique ', Thèse Magister, Université de Constantine, Avril 2009
- [51] K. H. A. a. B. W. W. Yuanye Xia, «A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System,» IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 26, No. 12, , P. 3609, December 2011.

Références

- [52] S.S.Murthy, S. Mishra and G. Mallesham, “ Voltage and Frequency Control of Wind Diesel Hybrid System With Variable Speed Wind Turbine ”, Power Electronics, Drives and Energy Systems Conference, pp.1-6, India December 2010.
- [53] Vaughn Nelson, “Wind Energy, Renewable Energy And The Environment”, Crc Press 2009, Pp 45
- [54] Adam MIRECKI : ‘ Etude comparative de chaines de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ’, Thèse doctorat, Laboratoire d’Electrotechnique et d’Electronique Industrielle de l’ENSEEIH, Unité Mixte de Recherche CNRS No 5828, avril 2005.
- [55] A. Davigny, “ Participation Aux Services Système de Fermes d’Eoliennes à Vitèsse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d’Energie ”, Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2008.
- [56] H. Ibrahim, “ Etude et Conception d'un Générateur Hybride d'Electricité de Type Eolien-Diesel avec Elément de Stockage d'Air Comprimé ”, Thèse de Doctorat, Université de Québec, Juin 2010.
- [57] Vechiu, I. (2005). Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. PhD thesis
- [58] SimPowerSystems 4.0 Reference, “ Improving simulation performance : How SimPowerSystems . works”.
- [59] Luque, A. and Hegedus, S. (2010). Handbook of photovol-taic science and engineering. Wiley.
- [60] Thi Minh Chau LE, " Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations", thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 25/01/2012.
- [61] H. Ibrahim, “ Etude et Conception d'un Générateur Hybride d'Electricité de Type Eolien-Diesel avec Elément de Stockage d'Air Comprimé ”, Thèse de Doctorat, Université de Québec, Juin 2010.
- [62] M. Attia, M. Bechouat, M. Sedraoui, Z. Aoulmi, “An Optimal Linear Quadratic Regulator in Closed Loop with Boost Converter for Current Photovoltaic Application”, European Journal of Electrical Engineering 2022, 24, 97–103.