

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira-Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies renouvelables

Thème

*Etude d'un système hybride avec
stockage*

Réalisé par :

Mr. ADRAR Abdellah
Mr. IDIR Fouad

Encadré par :

Mr. N. MEBARKI

Promotion 2023/2024

Remerciements

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à Dieu qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur M,
MEBARKI. N pour avoir dirigé ce travail pour son suivi, ses conseils et sa
disponibilité à chaque instant.*

*Notre gratitude et reconnaissance s'adressent à tous les enseignants qui ont contribué à
notre formation pendant notre cursus universitaire.*

*Nos remerciements vont s'adresser également au président et membres de jury qui
nous feront l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Sans oublier tous les amis (es) et camarades qui ont contribués de près ou de loin à la
réalisation de ce modeste projet.*

Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur amour, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants.

À ma famille, pour leur encouragement et leur inspiration.

À mon frère et mes sœurs, pour leur soutien et leur complicité qui m'ont aidé à surmonter chaque étape de ce parcours.

À mon binôme IDIR Fouad, ainsi qu'à toute sa famille.

À mes amis(es), pour leur soutien et leur inspiration tout au long de ce parcours.

ADRAR Abdellah

Dédicace

POUR CHAQUE DÉBUT IL Y A UNE FIN, ET CE QUI EST
BEAU DANS TOUTE FIN C'EST LA RÉUSSITE ET
L'ATTEINTE DES OBJECTIFS.

JE DÉDIE CE MÉMOIRE À MES CHERS PARENTS QUI
ÉTAIENT TOUJOURS À MES CÔTÉS ET M'ONT TOUJOURS
SOUTENU TOUT AU LONG DE CES LONGUES ANNÉES
D'ÉTUDES. EN SIGNE DE RECONNAISSANCE, QU'ILS
TROUVENT ICI, L'EXPRESSION DE MA PROFONDE
GRATITUDE POUR TOUT CE QU'ILS ONT CONSENTI
D'EFFORTS ET DE MOYENS POUR ME VOIR RÉUSSIR
DANS MES ÉTUDES.

À MON PETIT FRÈRE ET MES CHÈRES SŒURS QUI ONT
ÉTÉS LÀ POUR ME SOUTENIR DANS CHAQUE ÉTAPE.

À MES AMIS ET MA FAMILLE.

À MON BINÔME ADRAR ABDELLAH AINSI QU'À TOUTE
SA FAMILLE.

IDIR FOUAD

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie Solaire photovoltaïque.....	3
I.2.1. L’histoire du photovoltaïque	4
I.2.2 Panneau Photovoltaïque	5
I.2.2.1. Principe de fonctionnement	6
I.2.2.2. Différents types de cellules photovoltaïques	6
I.2.2.3. Comparatif des différentes technologies de la cellule photovoltaïque	9
I.3. Energie éolienne.....	11
I.3.1. Définition de l’énergie éolienne	11
I.3.2. Architecture d’une éolienne	12
I.3.3. Les différents types d’éoliennes	14
I.3.4. Régulation mécanique de la vitesse d’une éolienne.....	16
I.4 Les systèmes hybrides.....	17
I.4.1. Introduction	17
I.4.2. Définition d’un système hybride	17
I.4.3. Présentation d’un système hybride photovoltaïque – éolien.....	18
I.4.4. Système de conversion d’énergie hybride photovoltaïque – éolien.....	18
I.4.5. Principaux composants d’un Système d’énergie hybride photovoltaïque – éolien.....	20
I.5. Stockage d’un système hybride	21
I.6. Avantages et inconvénients d’un système hybride	23
I.7. Conclusion	24

Chapitre II : Modélisation du système hybride avec stockage

II.1. Introduction	25
II.2. Modélisation d’un générateur photovoltaïque	25
II.3. Les hacheurs.....	27
II.3.1. Définition.....	27
II.3.2. Fonction.....	28
II.3.3. Schéma électrique	28
II.4. Les MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	29
II.4.1. Hacheur avec MPPT	30

II.4.2. Fonctionnement d'un hacheur avec MPPT dans un système PV	30
II.5. La chaine de conversion éolienne.....	31
II.5.1. Introduction.....	31
II.5.2. Modélisation de la chaine conversion éolienne	31
II.5.3. Modélisation du vent.....	32
II.5.3.1. Correction de la vitesse de vent avec l'altitude	32
II.5.3.2. Distribution de Wei bull.....	33
II.5.4. Modélisation de la turbine	34
II.5.4.1. La loi de Betz	35
II.5.4.2. La vitesse spécifique ou normalisée.....	36
II.5.4.3. Coefficient de puissance.....	36
II.5.4.4. Coefficient de couple.....	37
II.5.5. Modèle du multiplicateur	38
II.5.6. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	38
II.5.7. Modélisation du redresseur PD3 à diodes.....	39
II.6. Modélisation de la batterie	40
II.7. Modélisation d'un bus continu	41
II.8. Conclusion	42

Chapitre III : Gestion de puissance et résultats de simulation

III.1. Introduction	43
III.2. Gestion de puissance du système hybride avec stockage.....	43
III.3. Simulation de la chaine de conversion éolienne	44
III.3.1. Résultats de simulation.....	44
III.4. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque.....	45
III.5. Batteries :.....	48
III.6. Système hybride étudié.....	52
III.6.1. Résultats de simulation	53
III.7 Conclusion.....	54

Conclusion générale	55
----------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 : Système photovoltaïque	3
Figure I.2 : Composants d'un champ de modules photovoltaïques	5
Figure I.3 : Illustration d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I.4 : Cellule photovoltaïque monocristalline	7
Figure I.5 : Cellule photovoltaïque poly cristalline	8
Figure I.6 : Cellules photovoltaïques amorphes	9
Figure I.7 : système éolien	11
Figure I.8 : Architecture d'une éolienne	14
Figure I.9 : Eolienne a axe horizontale	15
Figure I.10 : Eolienne a axe vertical	15
Figure I.11 : Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent	16
Figure I.12 : Schéma représentatif d'un système hybride photovoltaïque – éolien	18
Figure I.13 : Système de conversion hybride photovoltaïque – éolien	19
Figure I.14 : Schéma des principaux composants du système hybride	21
Figure I.15 : schéma de stockage dans un système hybride photovoltaïque – éolien	23

Chapitre II :

Figure II.1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	25
Figure II.2 : Panneaux photovoltaïques sous Matlab /Simulink	27
Figure II.3 : Caractéristique du panneau photovoltaïque sous Matlab /Simulink	27
Figure II.4 : Schéma de principe d'un hacheur boost	28
Figure II.5 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation	29
Figure II.6 : Structure de la chaine de conversion éolienne	32
Figure II.7 : Colonne d'air animée d'une vitesse V	34
Figure II.8 : Théorie de Betz : Schéma de principe	35
Figure II.9 : Puissance en fonction de la vitesse spécifique	36
Figure II.10 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs	37
Figure II.11 : Structure de la génératrice synchrone.	39

Figure II.12 : Redresseur PD3 à diodes	39
Figure II.13 : composants d'une batterie de voiture	40
Figure II.14 : Modèle électrique de la batterie	41
Figure II.15 : Schéma d'un bus continu	42

Chapitre III :

Figure III.1 : Organigramme des différents modes de gestion de puissances du système	43
Figure III.2 : Schéma Bloc du système éolien	44
Figure III.3 : Vitesse du vent. [m/s]	44
Figure III.4 : Puissance de l'éolienne. [W]	45
Figure III.5 : Schéma Bloc du système photovoltaïque	46
Figure III.6 : Hacheur avec MPPT (P&O) utilisé dans le système PV	46
Figure III.7 : L'allure de l'ensoleillement	47
Figure III.8 : Puissance photovoltaïque du système	47
Figure III.9 : Schéma Bloc de la batterie	48
Figure III.10 : Etat de charge de la batterie	49
Figure III.11 : L'allure de la tension dans la batterie	50
Figure III.12 : L'allure du courant de la batterie	51
Figure III.13 : Puissance de la batterie branchée au système	52
Figure III.14 : Schéma Bloc du système hybride	53
Figure III.15 : L'allure des puissances du système hybride	54

*Liste de symboles et
abréviations*

Liste de symboles et abréviations

Photovoltaïque :

- P_{opt} : La puissance optimale de la cellule [W].
- I : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [A].
- V : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [V].
- I_L : Le photo-courant [A].
- I_R : Le courant traversant la résistance parallèle [A].
- I_D : Le courant traversant la diode [A].
- I_0 : Le courant de saturation [A].
- R_s : La résistance série de la cellule [Ω].
- R_p : La résistance parallèle de la cellule [Ω].
- E_s : L'ensoleillement [W/m^2].
- E_{sref} : L'ensoleillement de référence [W/m^2].
- T_j : La température de jonction de la cellule [$^{\circ}C$].
- T_{jref} : La température de jonction de référence [$^{\circ}C$].
- T_a : La température ambiante [$^{\circ}C$].
- q : La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19} C$.
- K : La constante de Boltzmann ($1.3854 * 10^{-23} JK^{-1}$).
- E_g : Energie de gap.
- α_{sc} : Représente un coefficient d'incrémentatation du courant I_s .
- B_{oc} : Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension V_o .
- $P\&O$: Perturbation et d'observation.
- $MPPT$: Maximum Power Point Tracking.

Batterie :

- E_0 : Source idéale de tension
- V_{bat} : La tension aux bornes de la batterie [V].
- V_{Cbat} : La tension aux bornes du condensateur de la batterie [V].
- I_{bat} : Le courant traversant la batterie [A].
- R_s : La résistance série de la batterie [Ω].
- C_{bat} : La capacité nominale de la batterie [Ah].

Liste de symboles et abréviations

Q_{bat} : La quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} [C].

Eolienne :

V : La vitesse du vent [m/s].

PV : La puissance du vent [W].

P_t : La puissance de la turbine éolienne [W].

ρ : La densité d'air [Kg.m^{-3}].

$S=\pi R^2$: La surface balayée par la turbine [m^2].

C_P : Le coefficient de puissance de l'éolienne.

λ : La vitesse relative de la turbine éolienne [m/s].

T_t : Le couple aérodynamique [N/m].

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

G : Le gain du multiplicateur.

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

Ω_t : La vitesse de la turbine éolienne [rad/s].

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

Redresseur PD3 :

V_{dc} : La tension redressée [V].

V_m : La valeur maximale de la tension [V].

Bus continu :

i_{pv} : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A].

i_{eol} : Courant fourni par le système éolien [A].

i_c : Courant qui traverse la capacité [A].

i_{hyb} : Courant produit par le système hybride éolien-PV [A].

i_s : Courant de délestage [A].

i_{bat} : Courant de la batterie [A].

Introduction générale

Introduction générale

L'étude des systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens constitue un domaine de recherche scientifique fondamental et appliqué, essentiel pour répondre aux défis de la transition énergétique vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables. Ces systèmes combinent deux sources d'énergie renouvelable, le solaire et l'éolien, pour produire de l'électricité de manière plus efficace et durable. Cette introduction détaillée se concentrera sur les principaux aspects scientifiques de l'étude de ces systèmes hybrides, en mettant en lumière leurs caractéristiques, leurs avantages potentiels et les défis associés à leur conception, leur modélisation et leur optimisation.

Pour un développement écologique et économique, la combinaison de ces sources d'énergie renouvelable pour avoir un système d'énergie hybride dit multi-sources peut constituer une bonne alternative. Un système hybride (photovoltaïque – éolien) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement [01].

Les périodes de l'année ayant une faible insolation correspondent à celles ayant un meilleur potentiel éolien. Il est donc évident qu'une complémentarité entre l'énergie éolienne et solaire est souhaitable pour le couplage de ces deux sources d'énergies avec des batteries [02].

La recherche scientifique sur les systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens englobe plusieurs domaines, notamment la physique, l'ingénierie électrique, la météorologie, l'informatique et les sciences de l'environnement. Les scientifiques et les ingénieurs développent des modèles mathématiques et des simulations informatiques avancées pour analyser le comportement dynamique et les performances de ces systèmes dans diverses conditions environnementales. Ces études permettent de concevoir des stratégies de contrôle et de gestion optimales pour maximiser l'efficacité énergétique, minimiser les coûts opérationnels et réduire l'empreinte environnementale des systèmes hybrides.

En outre, l'étude des systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens comprend également des aspects économiques, sociaux et environnementaux. Les chercheurs évaluent les coûts initiaux et opérationnels, ainsi que les avantages socio-économiques, tels que la création

d'emplois et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils examinent également les implications environnementales, telles que l'utilisation des terres, l'impact sur la faune et la flore, et l'intégration harmonieuse des systèmes dans les écosystèmes locaux.

L'étude des systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens est un domaine scientifique multidisciplinaire et en évolution constante, crucial pour la transition vers un avenir énergétique plus durable et résilient. Les progrès réalisés dans ce domaine contribueront à accroître l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes énergétiques hybrides, tout en favorisant une utilisation plus large des énergies renouvelables pour répondre aux besoins croissants en électricité à l'échelle mondiale.

La situation géographique de l'Algérie, caractérisée par un ensoleillement important et un potentiel éolien intéressant, est propice au développement des énergies renouvelables. Dans ce contexte, le système hybride retenu pour cette étude est un système combinant l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque, avec un système de stockage associé, pour cela on va diviser notre travail en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités concernant nos deux systèmes étudiés (photovoltaïque et éolien), ensuite on passe au système hybride et son fonctionnement.
- Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation des éléments du système hybride éolien-photovoltaïque ainsi que les batteries de stockage, avec pour objectif d'étudier leur comportement en réponse aux fluctuations climatiques et aux variations de charge.
- Pour finir, dans ce troisième chapitre nous allons réaliser la gestion de puissance de notre système hybride et analyser les résultats de simulation obtenus sous Matlab-Simulink.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter les systèmes hybrides à énergies renouvelables en général, en détaillant les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiées dans ce travail (le solaire et l'éolien).

Nous aborderons également la combinaison de ces deux énergies pour former un système hybride avec stockage.

I.2. Energie Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est une énergie très abondante sur la surface de la terre. De ce fait, le photovoltaïque est considéré comme la plus importante source d'énergie renouvelable et la plus prometteuse avec un potentiel inépuisable. Un générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Ces cellules convertissent la lumière (les photons) qu'elles captent du rayonnement solaire en électricité. En effet, sous des conditions de tests standards (Eclairement = 1000W/m^2 , température = 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule est d'environ 2.3W sous une tension de 0.5V . Cette puissance reste, en effet, faible et insuffisante pour la plupart des applications. De ce fait, une association en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules permet d'obtenir un générateur photovoltaïque avec une puissance adaptée aux besoins de l'utilisation [3].

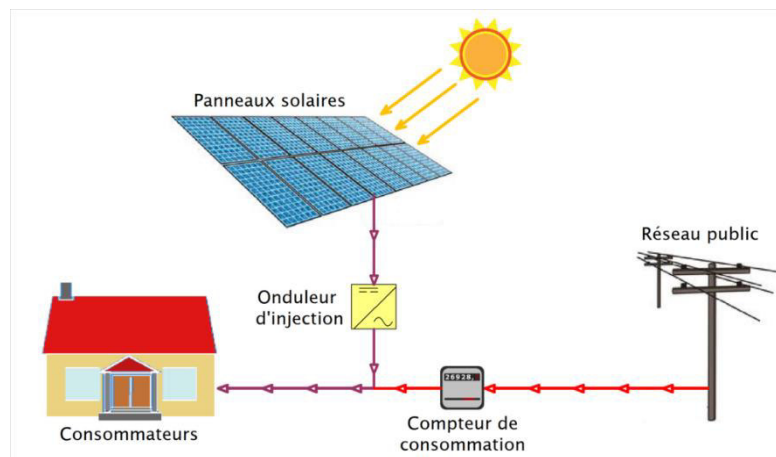


Figure I.1 : Système photovoltaïque

I.2.1. L'histoire du photovoltaïque

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1930 : Les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) ont été créées, suivies de cellules en sélénium (Se).
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [4]

I.2.2 Panneau Photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont des dispositifs qui convertissent l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ils sont composés d'un assemblage de cellules photovoltaïques, qui sont les éléments de base permettant cette conversion.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, principalement du silicium. Lorsque ces cellules sont exposées à la lumière du soleil, les photons contenus dans la lumière solaire excitent les électrons des matériaux semi-conducteurs, ce qui crée un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont ensuite assemblées en modules pour former un panneau photovoltaïque. Chaque panneau peut produire une puissance électrique allant de quelques watts à plusieurs centaines de watts, en fonction de sa taille et de son rendement. Le rendement d'un panneau photovoltaïque, qui représente le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance lumineuse reçue, est généralement compris entre 15% et 22% pour les technologies les plus avancées.

Les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment pour alimenter des habitations, des bâtiments, des réseaux électriques, ou encore des équipements autonomes comme des calculatrices ou des lampes de jardin. Ils constituent une source d'énergie renouvelable et durable, qui contribue à la transition énergétique vers des modes de production d'électricité plus respectueux de l'environnement [5].

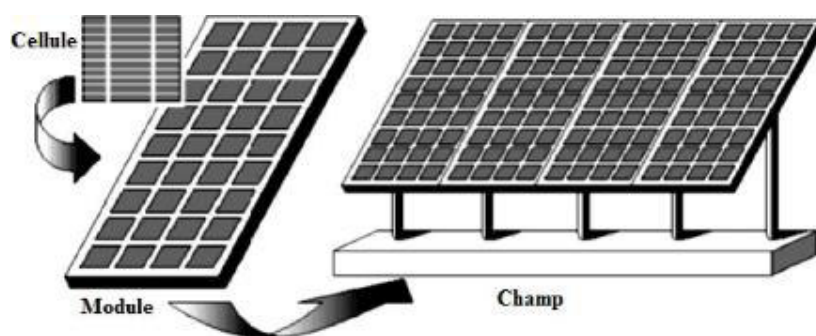


Figure I.2 : Composants d'un champ de modules photovoltaïques

I.2.2.1. Principe de fonctionnement

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière[6].

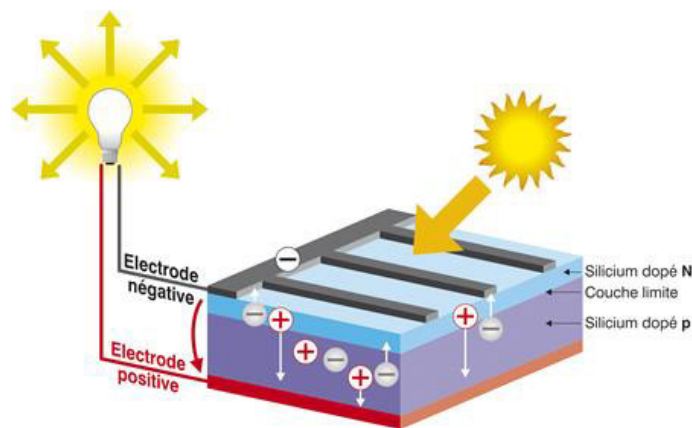


Figure I.3 : Illustration d'une cellule photovoltaïque

I.2.2.2. Différents types de cellules photovoltaïques

On distingue trois types de cellules photovoltaïques :

a. Cellules monocristallines :

Les panneaux solaires monocristallins sont constitués d'un seul cristal de silicium pur, ce qui leur donne une structure uniforme et une teinte foncée. Leur processus de fabrication spécifique leur confère un rendement élevé, ce qui signifie qu'ils peuvent convertir efficacement la lumière solaire en électricité. Bien que leur production soit généralement plus coûteuse en raison de la complexité du processus, ces panneaux sont appréciés pour leur efficacité énergétique et leur longévité.

Avantage :

- ✚ Efficacité élevée
- ✚ Bonne performance par faible luminosité
- ✚ Durabilité et longue durée de vie
- ✚ Aspect esthétique attrayant

Inconvénients :

- ✚ Coût initial élevé
- ✚ Sensibilité à la chaleur
- ✚ Fragilité comparée à d'autres types de panneaux



Figure I.4 : Cellule photovoltaïque monocristalline

b. Cellule photovoltaïque poly cristalline :

Les cellules photovoltaïques poly cristallines sont fabriquées à partir de lingots de silicium composés de multiples cristaux. Contrairement aux cellules monocristallines, elles ont une apparence moins uniforme, avec des cristaux de tailles différentes. Bien qu'elles aient un rendement légèrement inférieur, elles sont généralement moins chères à produire.

Avantage :

- ✚ Coût de production moins élevé que les cellules monocristallines.
- ✚ Processus de fabrication moins complexe, ce qui peut conduire à des économies de temps et de ressources.
- ✚ Tolérance aux températures élevées légèrement meilleure que les cellules monocristallines.

✚ Meilleure performance que d'autres technologies de cellules dans des environnements moins contrôlés ou à faible luminosité.

Inconvénients :

✚ Rendement énergétique légèrement inférieur par rapport aux cellules monocristallines.

✚ Moins esthétiques en raison de leur apparence moins uniforme.

✚ Moins durables et moins résistantes aux conditions environnementales extrêmes.

✚ Sensibilité aux variations de luminosité, avec une performance généralement inférieure par faible luminosité par rapport aux cellules monocristallines.



Figure I.5 : Cellule photovoltaïque poly cristalline

c. Cellules photovoltaïques amorphes :

Les cellules photovoltaïques amorphes, également appelées cellules solaires à film mince, sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs sans structure cristalline ordonnée. Elles ont une apparence uniforme et peuvent être appliquées sur une variété de surfaces, ce qui les rend flexibles et adaptées à des applications diverses. Bien que leur rendement soit généralement inférieur à celui des cellules cristallines, elles sont moins coûteuses à produire et peuvent mieux fonctionner dans des conditions de faible luminosité ou à des angles d'incidence variés.

Avantage :

- ✚ Flexibilité, pouvant être appliquées sur une variété de surfaces.
- ✚ Coût de production inférieur aux cellules cristallines.
- ✚ Meilleure performance dans des conditions de faible luminosité ou à des angles d'incidence variés.

Inconvénients :

- ✚ Rendement généralement inférieur à celui des cellules cristallines.
- ✚ Durabilité et longévité moindres.
- ✚ Sensibles à la dégradation due à l'exposition aux éléments environnementaux



Figure I.6 : Cellules photovoltaïques amorphes

I.2.2.3. Comparatif des différentes technologies de la cellule photovoltaïque

Nous présentons dans ce tableau (Tableau I.1) les caractéristiques des différentes cellules, classées selon leur rendement, leur longévité et leurs principales utilisations [7].

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	10 à 16% (24,7% au laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production *Méthode de production	Aérospatiale, modules pour toits, façades, ..

			couteuse et laborieuse.	
Silicium polycristallin	11 à 13% (19.8% au laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production *Méthode de production couteuse et laborieuse	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	6 à 10% (13% au laboratoire)	≤ 10 ans	*Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. *Fonctionnement faible si luminosité. *Fonctionnement par temps couvert *Fonctionnement si y'a ombrage partiel *La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareil électroniques (montres, calculatrice...), Intégration dans le bâtiment

Tableau I.1 : Etat comparatif des différentes technologies des cellules photovoltaïques.

I.3. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la force du vent pour produire de l'électricité. Ce processus repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique à travers l'utilisation de turbines éoliennes. Ces turbines sont équipées de pales qui captent le vent et le transforment en mouvement rotatif, entraînant ainsi un générateur qui convertit ce mouvement en électricité. L'énergie éolienne présente un potentiel considérable en raison de son caractère renouvelable et abondant, ainsi que de son faible impact environnemental par rapport aux énergies fossiles. Les recherches dans ce domaine portent sur l'optimisation des performances des éoliennes, la modélisation des flux éoliens, l'intégration à grande échelle dans les réseaux électriques et le développement de technologies de stockage pour atténuer la variabilité de la production éolienne.



Figure I.7 : système éolien

I.3.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est capturée par la turbine éolienne, qui agit comme un élément essentiel entre les domaines de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. Son rôle principal est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation. Cette énergie peut ensuite être utilisée de deux manières principales :

Premièrement, elle peut être conservée sous forme d'énergie mécanique, par exemple pour propulser des véhicules à voile ou pour actionner des moulins à eau dans le but de pomper de l'eau.

Deuxièmement, elle peut être transformée en énergie électrique. Dans ce cas, la turbine éolienne est couplée à un générateur électrique, qui convertit l'énergie mécanique en courant électrique, pouvant être soit continu soit alternatif. Ce générateur peut être connecté au réseau électrique pour alimenter des consommateurs en électricité, ou bien il peut fonctionner de manière autonome, en utilisant un système de stockage d'énergie tel qu'un parc de batteries ou un générateur d'appoint, comme un groupe électrogène.

Avantage :

- ✚ Énergie renouvelable.
- ✚ Faible impact environnemental.
- ✚ Coûts de fonctionnement réduits.
- ✚ Création d'emplois dans l'industrie éolienne.

Inconvénients :

- ✚ Variabilité de la production liée à la disponibilité du vent.
- ✚ Impact visuel et sonore potentiel sur le paysage et les riverains.
- ✚ Impact sur la faune et la flore locale.
- ✚ Coûts initiaux élevés pour l'installation et la mise en service.

I.3.2. Architecture d'une éolienne

Les composants d'une éolienne comprennent plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour capturer l'énergie du vent et la convertir en électricité. Voici une explication détaillée de ces composants :

1. Mât : Le mât est la structure verticale sur laquelle est montée la turbine éolienne. Il peut atteindre plusieurs dizaines de mètres de hauteur afin de placer les pales à une altitude où le vent est plus fort et plus régulier.

2. Rotor : Le rotor est l'ensemble des pales de l'éolienne. Ces pales sont généralement en forme d'aile d'avion et sont conçues pour capturer l'énergie cinétique du vent. Leur forme et leur angle sont soigneusement étudiés pour maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique.

3. Nacelle : La nacelle est la partie supérieure de l'éolienne, située au sommet du mât. Elle abrite les composants essentiels de l'éolienne, y compris le générateur, le système de contrôle et de régulation, ainsi que le mécanisme de rotation qui permet d'orienter les pales face au vent.

4. Générateur : Le générateur est le composant qui convertit l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique. Il utilise le principe de l'induction électromagnétique pour produire un courant électrique alternatif.

5. Système de contrôle et de régulation : Ce système surveille en temps réel la vitesse du vent, la rotation des pales et la production d'électricité. Il ajuste automatiquement l'angle des pales et la vitesse de rotation du rotor pour maximiser l'efficacité de l'éolienne et assurer son fonctionnement sécuritaire dans différentes conditions météorologiques.

6. Système de transmission : Le système de transmission comprend un ensemble de composants mécaniques, tels que des engrenages, des arbres et des roulements, qui transmettent la rotation du rotor au générateur. Il permet d'adapter la vitesse de rotation du rotor à celle requise par le générateur pour produire une tension électrique stable.

En combinant ces différents composants, une éolienne est capable de capturer l'énergie du vent et de la convertir en électricité de manière efficace et fiable.

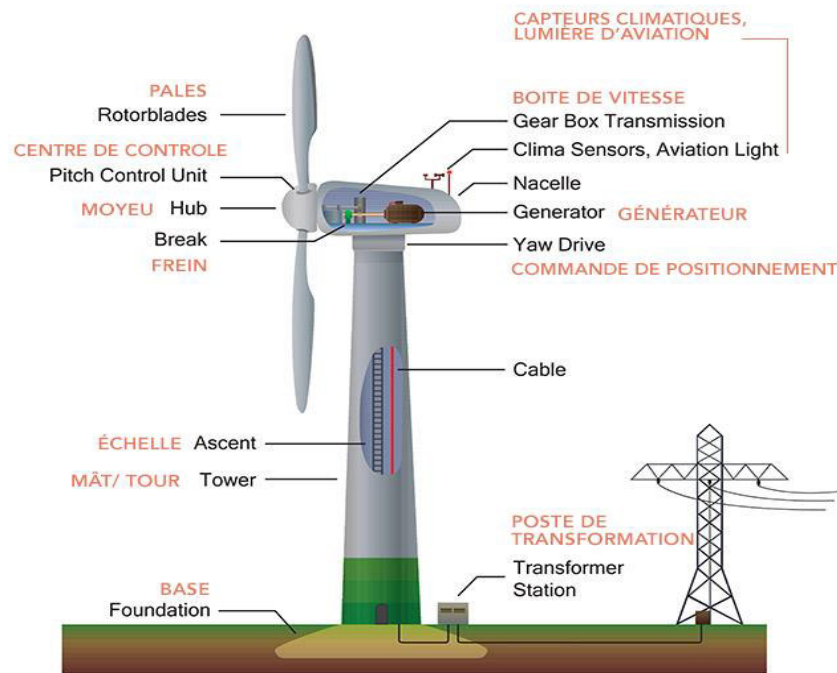


Figure I.8 : Architecture d'une éolienne

I.3.3. Les différents types d'éoliennes

Les turbines éoliennes sont classées en fonction de l'orientation géométrique de l'axe sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :

1. Éolienne à axe horizontal :

Dans ce type d'éolienne, l'axe de rotation de l'hélice est orienté horizontalement par rapport au sol. Les pales de l'éolienne sont montées sur un rotor situé à l'extrémité d'une grande structure verticale, le mât. L'hélice tourne autour de cet axe horizontal, et la direction du vent est généralement perpendiculaire à l'axe de rotation. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus couramment utilisées dans les parcs éoliens commerciaux en raison de leur efficacité et de leur fiabilité éprouvées. Elles sont particulièrement adaptées aux zones où le vent souffle de manière constante dans une direction prévisible.



Figure I.9 : Eolienne a axe horizontale

2. Éolienne à axe vertical :

À la différence des éoliennes à axe horizontal, les éoliennes à axe vertical ont leur axe de rotation orienté verticalement par rapport au sol. Les pales de l'hélice sont disposées autour de cet axe, formant une structure en forme de cylindre ou de darrieus. Ce type d'éolienne présente l'avantage de pouvoir capturer le vent provenant de toutes les directions, car l'orientation de l'axe de rotation reste constante. Cependant, les éoliennes à axe vertical sont moins répandues et leur efficacité peut varier en fonction des conditions de vent et de la conception spécifique de l'éolienne.



Figure I.10 : Eolienne a axe vertical

En résumé, les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical sont les deux principaux types de turbines éoliennes utilisées pour capturer l'énergie du vent et la convertir en électricité. Chaque type présente ses propres avantages et inconvénients en termes d'efficacité, de fiabilité et d'adaptabilité aux conditions locales.

I.3.4. Régulation mécanique de la vitesse d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale (P_n) à partir d'une vitesse du vent nominale (V_n). Pour des vitesses de vent supérieures à (V_n), la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue.

Il y'a d'autres grandeurs dimensionnées : (V_d) est la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et (V_m) est la vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [8].

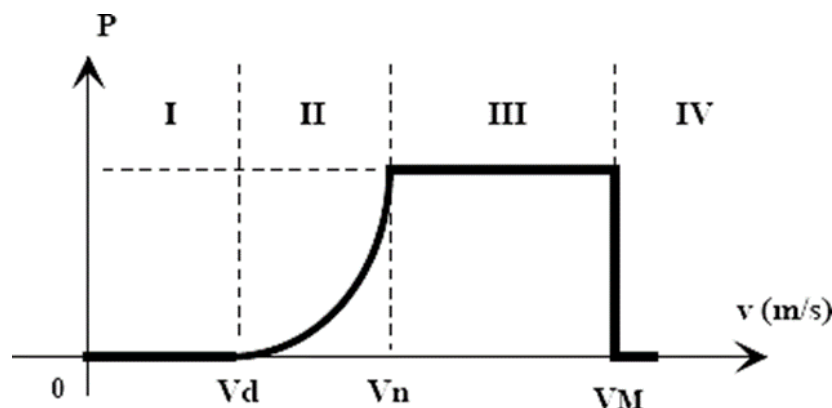


Figure I.11 : Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent

En fonction de la vitesse du vent, quatre zones peuvent être identifiées dans le fonctionnement d'une turbine éolienne tel que montré sur la figure (I.11) :

Zone I : Pour des vitesses plus petites que la vitesse de démarrage (V_d), l'énergie du vent n'est pas suffisante pour entraîner la turbine et la puissance captée est nulle ;

Zone II : Pour des vitesses supérieures à la vitesse de démarrage (V_d) est inférieure à celle nominale (V_n), la puissance extraite augmente proportionnellement avec la vitesse du vent cubée. Cette zone correspond au régime de « charge partielle » ;

Zone III : Pour des vitesses supérieures à la vitesse nominale (V_n), la puissance captée est limitée à celle nominale (P_n). Cette zone correspond au régime de « charge complète » ;

Zone IV : Pour des vitesses supérieures à la vitesse extrême d'opération (V_m), la turbine éolienne s'arrête, la puissance fournie s'annule.

I.4 Les systèmes hybrides

I.4.1. Introduction

Pour promouvoir le développement durable, l'adoption de systèmes énergétiques exploitant des sources d'énergie renouvelable est devenue impérative. Les technologies émergentes des générateurs hybrides, bien que plus complexes que les solutions traditionnelles, présentent des avantages considérables en termes de flexibilité opérationnelle, d'adaptabilité et de coût compétitif. Toutefois, la mise en œuvre de ces solutions requiert une phase préliminaire de dimensionnement méticuleux basée sur une analyse détaillée du potentiel en énergie renouvelable du site d'implantation. De plus, une gestion efficace de l'énergie électrique produite et une expertise approfondie en ingénierie des systèmes énergétiques sont essentielles pour garantir leur performance optimale.

La gestion efficace de l'énergie est facilitée par l'utilisation d'algorithmes avancés de régulation et de contrôle, rendus possibles par l'intégration de logiciels hautement performants. À moyen terme, ces installations hybrides sont susceptibles de susciter un intérêt croissant en raison de leur capacité à s'adapter à diverses sources d'énergie primaire.

I.4.2. Définition d'un système hybride

Un système hybride est une configuration énergétique complexe qui combine au moins deux technologies de production d'énergie, comprenant généralement une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelle ainsi qu'au moins une source d'énergie renouvelable. Ces systèmes sont conçus pour tirer parti des avantages de chaque technologie tout en atténuant les inconvénients. Par exemple, une installation hybride pourrait inclure à la fois des générateurs fonctionnant aux combustibles fossiles et des panneaux solaires photovoltaïques ou des éoliennes. L'intégration d'une source d'énergie renouvelable permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition vers une énergie plus propre et plus durable. De plus, un système hybride peut également comprendre un dispositif de stockage d'énergie, tel qu'une

batterie, pour optimiser l'utilisation des ressources et assurer une alimentation électrique stable et fiable, même en l'absence de production continue des sources d'énergie renouvelable.

I.4.4. Présentation d'un système hybride photovoltaïque – éolien

Le système hybride photovoltaïque-éolien est une configuration énergétique sophistiquée qui combine les avantages de deux sources d'énergie renouvelable principales : le solaire et l'éolien.

Cette combinaison permet de pallier les variations de disponibilité énergétique propres à chaque source, assurant ainsi une production d'électricité plus stable et fiable.

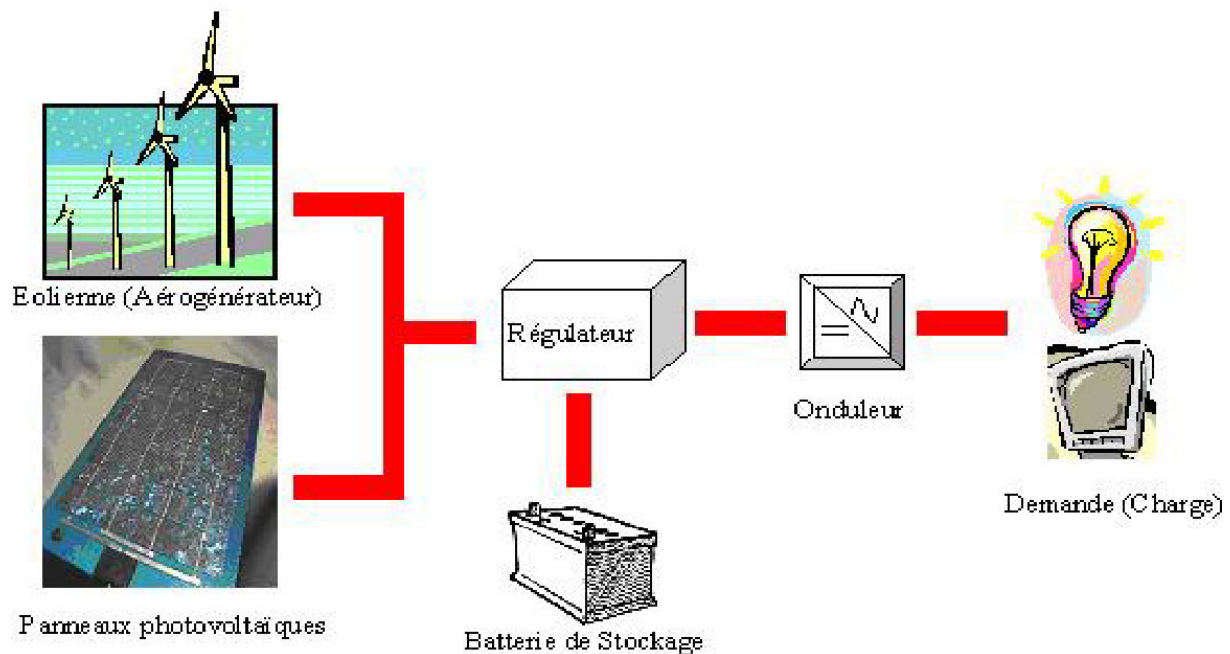


Figure I.12 : Schéma représentatif d'un système hybride photovoltaïque – éolien

I.4.5. Système de conversion d'énergie hybride photovoltaïque – éolien

Le système hybride photovoltaïque-éolien repose sur deux composants principaux : les panneaux solaires photovoltaïques et les turbines éoliennes. Les panneaux solaires convertissent la lumière solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, tandis que les turbines éoliennes captent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité.

La production d'électricité à partir de ces deux sources complémentaires offre plusieurs avantages. En premier lieu, elle permet une utilisation optimale des ressources naturelles disponibles, car le vent et le soleil sont souvent présents en complémentarité dans différentes zones géographiques et à différents moments de la journée. De plus, cette diversification réduit la dépendance à une seule source d'énergie, ce qui améliore la fiabilité du système et diminue les risques liés aux fluctuations de la production.

Pour maximiser l'efficacité et la performance du système hybride, des composants supplémentaires sont souvent intégrés, tels que des systèmes de stockage d'énergie (batteries), des systèmes de contrôle et de régulation avancés, ainsi que des dispositifs de surveillance météorologique. Ces éléments permettent d'optimiser la gestion de la production et de la consommation d'électricité, en ajustant la répartition de l'énergie entre les différentes sources en fonction des conditions météorologiques et des besoins énergétiques.

L'installation et la configuration d'un système hybride photovoltaïque-éolien nécessitent une analyse approfondie des données climatiques, des caractéristiques du site d'installation, ainsi que des besoins énergétiques spécifiques. Une modélisation précise et une planification minutieuse sont essentielles pour concevoir un système optimal, adapté aux conditions locales et capable de fournir une alimentation électrique fiable et durable.

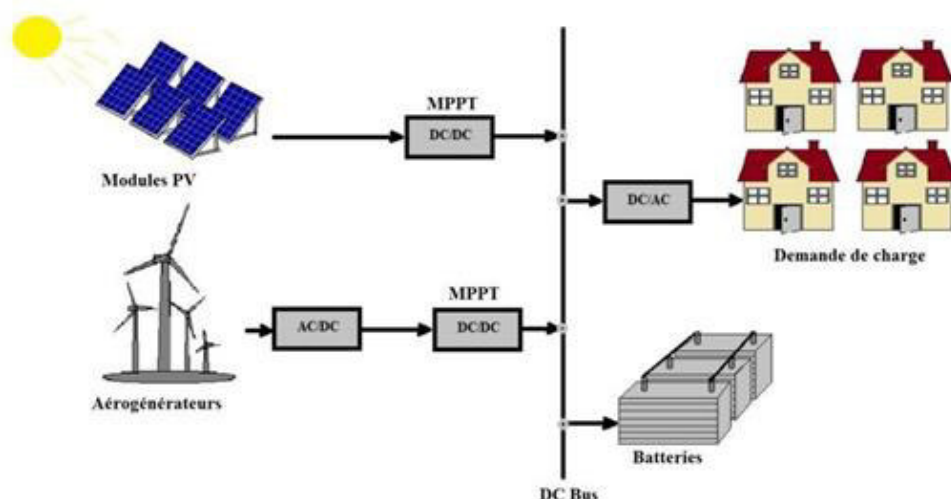


Figure I.13 : Système de conversion hybride photovoltaïque – éolien

I.4.6. Principaux composants d'un Système d'énergie hybride photovoltaïque – éolien

- 1. Éoliennes :** Les éoliennes captent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en électricité grâce à des turbines. Elles sont souvent installées en hauteur pour maximiser la capture du vent.
- 2. Panneaux solaires photovoltaïques :** Les panneaux solaires convertissent l'énergie lumineuse du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Ils sont généralement installés sur des surfaces planes et orientés vers le soleil pour une capture optimale de l'énergie solaire.
- 3. Générateurs :** Les générateurs convertissent l'énergie mécanique produite par les éoliennes et les panneaux solaires en électricité utilisable. Ils peuvent être conçus pour produire du courant continu (DC) ou du courant alternatif (AC) selon les besoins du système.
- 4. Onduleurs :** Les onduleurs sont des dispositifs électroniques qui convertissent le courant continu produit par les générateurs en courant alternatif, qui est utilisé dans la plupart des applications électriques. Ils permettent également de synchroniser et d'optimiser la production d'énergie des différentes sources du système.
- 5. Systèmes de stockage d'énergie :** Les systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries, sont utilisés pour stocker l'électricité produite par les éoliennes et les panneaux solaires lorsqu'elle n'est pas immédiatement consommée. Cela permet de fournir de l'électricité en continu, même lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas une production constante d'énergie renouvelable.
- 6. Systèmes de contrôle et de régulation :** Ces systèmes surveillent et contrôlent la production, la distribution et le stockage de l'énergie dans le système. Ils utilisent des capteurs et des algorithmes pour optimiser les performances du système en fonction des conditions météorologiques et de la demande en énergie.

7. **Réseau électrique** : Dans certains cas, les systèmes hybrides photovoltaïques-éoliens peuvent être connectés au réseau électrique existant. Cela permet de vendre l'excès d'électricité produite par le système et d'assurer un approvisionnement en électricité stable en cas de besoin.

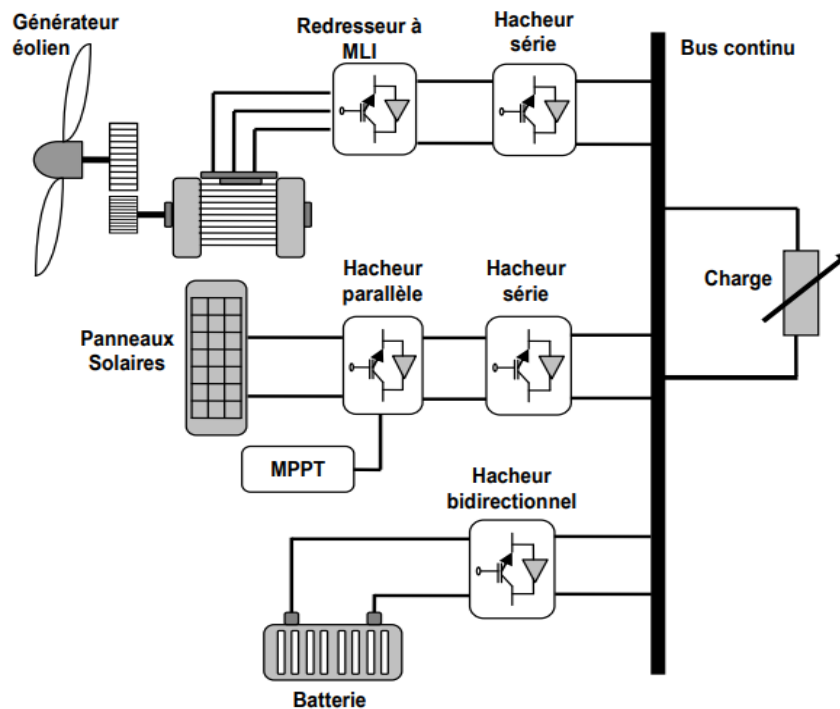


Figure I.14 : Schéma des principaux composants du système d'énergie hybride

I.5. Stockage d'un système hybride

I.5.1. Les batteries

Dans un système hybride photovoltaïque-éolien, les batteries jouent un rôle crucial en assurant le stockage de l'électricité produite par les panneaux solaires et les éoliennes lorsque la demande est faible ou lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas une production suffisante. Voici quelques détails scientifiques sur le fonctionnement des batteries dans ce contexte :

1. Technologie des batteries : Les batteries utilisées dans les systèmes hybrides peuvent être de différentes technologies, telles que les batteries au plomb-acide, les batteries lithium-ion, les batteries à flux redox, etc. Chaque technologie a ses propres caractéristiques en termes de capacité de stockage, d'efficacité, de durabilité et de coût.

2. Stockage de l'électricité : Lorsque les panneaux solaires et les éoliennes produisent de l'électricité en excès par rapport à la demande, cette électricité est dirigée vers les batteries pour être stockée. Les batteries convertissent alors l'électricité en énergie chimique, qui peut être stockée de manière stable jusqu'à ce qu'elle soit nécessaire.

3. Décharge de la batterie : Lorsque la demande en électricité dépasse la production des panneaux solaires et des éoliennes, ou lorsque ces derniers ne produisent pas suffisamment d'électricité en raison de conditions météorologiques défavorables, l'électricité stockée dans les batteries est déchargée pour fournir de l'énergie supplémentaire au système.

4. Système de gestion de batterie : Les systèmes hybrides sont souvent équipés de systèmes de gestion de batterie sophistiqués, qui surveillent en temps réel l'état de charge des batteries, leur température et leur santé globale. Ces systèmes de gestion optimisent la charge et la décharge des batteries pour prolonger leur durée de vie et maximiser leur efficacité.

5. Cycle de vie : Les batteries ont une durée de vie limitée, mesurée en cycles de charge et de décharge. Le nombre de cycles de vie dépend de plusieurs facteurs, tels que la technologie de la batterie, les conditions d'utilisation et d'exploitation, ainsi que les températures ambiantes.

En résumé, les batteries jouent un rôle essentiel dans les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien en permettant le stockage de l'électricité produite par les sources d'énergie renouvelable. Leur utilisation efficace et leur gestion appropriée sont cruciales pour garantir un approvisionnement en électricité fiable et durable, indépendamment des fluctuations de la production et de la demande.

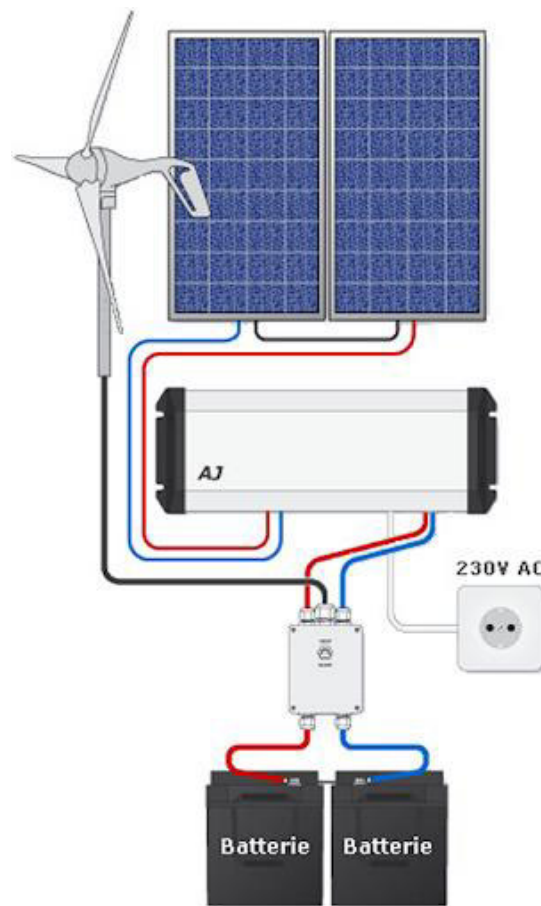


Figure I.15 : schéma de stockage dans un système hybride photovoltaïque – éolien

I.6. Avantages et inconvénients d'un système hybride

Avantage :

- ✚ Utilisation optimale des ressources énergétiques disponibles, combinant plusieurs sources d'énergie.
- ✚ Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et des émissions de gaz à effet de serre.
- ✚ Amélioration de la fiabilité et de la stabilité de l'alimentation électrique grâce à la diversification des sources.
- ✚ Flexibilité et adaptabilité aux conditions météorologiques et aux variations de la demande énergétique.
- ✚ Réduction des coûts à long terme grâce à une plus grande efficacité énergétique et à des économies sur les factures d'énergie.

Inconvénients :

- ✚ Coûts initiaux plus élevés en raison de la nécessité d'intégrer plusieurs technologies et composants.
- ✚ Complexité accrue de la conception, de l'installation et de la gestion du système, nécessitant une expertise spécialisée.
- ✚ Risques potentiels liés à l'interconnexion des différentes sources d'énergie et des composants du système.
- ✚ Besoin d'une planification et d'une intégration minutieuse pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité du système.
- ✚ Dépendance aux conditions environnementales pour la production d'énergie renouvelable, ce qui peut entraîner des fluctuations de la production.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, ainsi que leur intégration avec un système de stockage (batteries). Nous avons ensuite combiné ces deux sources d'énergie pour créer un système hybride.

Chapitre II

*Modélisation du système hybride avec
stockage*

II.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation des composants d'un système hybride éolien-photovoltaïque avec stockage. Ces systèmes, combinant l'énergie éolienne et solaire, offrent une solution polyvalente pour la production d'électricité. Nous explorerons la modélisation des éoliennes, des panneaux solaires, de système de stockage (les batteries), des onduleurs et des dispositifs de contrôle. Comprendre ces modèles est essentiel pour optimiser la conception et la gestion de ces systèmes.

II.2. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Un schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec une diode est généralement utilisé pour modéliser le comportement de la cellule dans différentes conditions d'éclairement et de température. Ce schéma comprend généralement une source de courant (représentant le courant photovoltaïque généré par la cellule en fonction de l'éclairement solaire), une diode (représentant les pertes de la cellule et empêchant le courant inverse), une résistance de dérivation (représentant les pertes internes de la cellule), et une résistance série (représentant les pertes de la cellule dues à la résistance interne) [9].

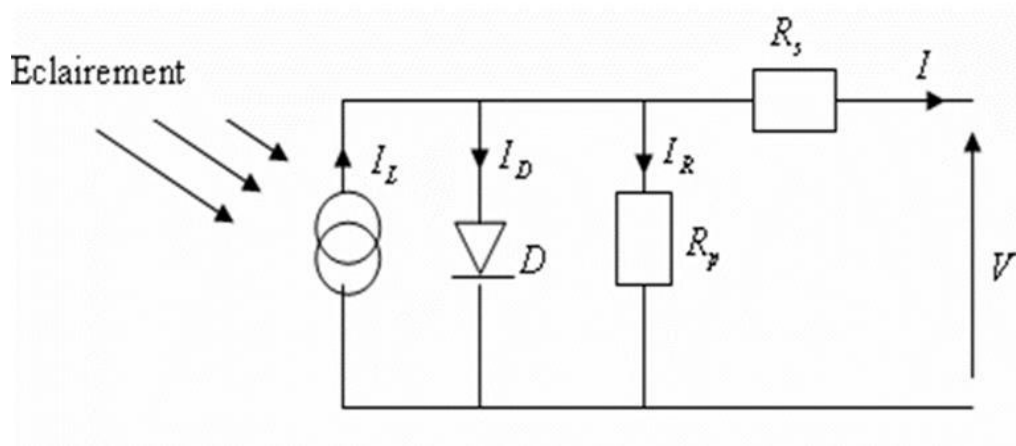


Figure II.1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

A partir de la figure (II.1) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I = I_L - I_D - I_R$$

Le photo-courant I_{ph} est donné par :

$$I_L = P_1 E_S (1 + P_2 (E_S - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf}))$$

La température de jonction est donné par :

$$T_j = T_a + E_s \left(\frac{N_{oct}-20}{800} \right)$$

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{K A n_s T_j} (V + R_s I) - 1 \right) \right]$$

Le courant de saturation la diode est donné par :

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{K T_j}\right)$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_R = \frac{V}{R_p}$$

On obtiendra alors :

$$I = P_1 E_s (1 + P_2 (E_s - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf}) - P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{K T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{K A n_s T_j} (V + R_s I) - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \right]$$

I : Le courant de cellule.

V : La tension de cellule.

R_s : La résistance série de la cellule [Ω].

E_s : L'ensoleillement [W/m^2].

$E_{sréf}$: L'ensoleillement de référence [W/m^2].

T_j : La température de jonction de la cellule [$^{\circ}C$].

$T_{jréf}$: La température de jonction de référence [$^{\circ}C$].

T_a : La température ambiante [$^{\circ}C$].

q : La charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$.

I_0 : Le courant de saturation [A]

K : La constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$).

n_s : Le facteur de qualité de la diode.

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

E_g : Energie de gap.

Ce modèle implique le modèle du panneau utilisé qu'on va représenter dans la figure (II.2)

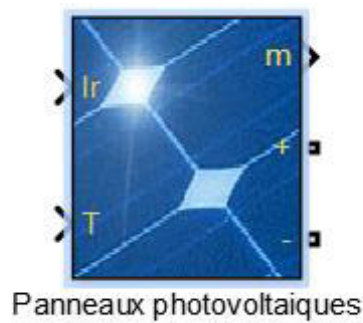


Figure II.2 : Panneaux photovoltaïques sous Matlab /Simulink

Nous allons représenter les caractéristiques du panneau utilisé dans la figure (II.3) :

Array data Parallel strings <input type="text" value="2"/> Series-connected modules per string <input type="text" value="6"/>		Display I-V and P-V characteristics of ... <input type="text" value="array @ 1000 W/m2 & specified temperatures"/> T_cell (deg. C) <input type="text" value="[45 25]"/> <input type="button" value="Plot"/>																	
Module data Module: <input type="text" value="1Soltech 1STH-215-P"/> <input type="checkbox"/> Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected <table border="0"> <tr> <td>Maximum Power (W)</td> <td>Cells per module (Ncell)</td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="213.15"/></td> <td><input type="text" value="60"/></td> </tr> <tr> <td>Open circuit voltage Voc (V)</td> <td>Short-circuit current Isc (A)</td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="36.3"/></td> <td><input type="text" value="7.84"/></td> </tr> <tr> <td>Voltage at maximum power point Vmp (V)</td> <td>Current at maximum power point Imp (A)</td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="29"/></td> <td><input type="text" value="7.35"/></td> </tr> <tr> <td>Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)</td> <td>Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)</td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="-0.36099"/></td> <td><input type="text" value="0.102"/></td> </tr> </table>		Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)	<input type="text" value="213.15"/>	<input type="text" value="60"/>	Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)	<input type="text" value="36.3"/>	<input type="text" value="7.84"/>	Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)	<input type="text" value="29"/>	<input type="text" value="7.35"/>	Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	<input type="text" value="-0.36099"/>	<input type="text" value="0.102"/>	Model parameters Light-generated current IL (A) <input type="text" value="7.8649"/> Diode saturation current I0 (A) <input type="text" value="2.9259e-10"/> Diode ideality factor <input type="text" value="0.98117"/> Shunt resistance Rsh (ohms) <input type="text" value="313.3991"/> Series resistance Rs (ohms) <input type="text" value="0.39383"/>	
Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)																		
<input type="text" value="213.15"/>	<input type="text" value="60"/>																		
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)																		
<input type="text" value="36.3"/>	<input type="text" value="7.84"/>																		
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)																		
<input type="text" value="29"/>	<input type="text" value="7.35"/>																		
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)																		
<input type="text" value="-0.36099"/>	<input type="text" value="0.102"/>																		

Figure II.3 : Caractéristique du panneau photovoltaïque sous Matlab /Simulink

II.3. Les hacheurs

II.3.1. Définition

Un hacheur, ou convertisseur continu-continu, est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un

rendement élevé. Il utilise des interrupteurs électroniques commandés pour adapter l'impédance du panneau photovoltaïque à la charge, ce qui maximise la puissance transférée.

II.3.2. Fonction

Le hacheur est utilisé pour adapter l'impédance du panneau photovoltaïque à la charge, ce qui permet de maximiser la puissance transférée. Il est essentiel dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser la puissance transférée en fonction des conditions de fonctionnement variables du panneau. Les hacheurs peuvent être divisés en deux types : le hacheur série (ou dévolteur) et le hacheur parallèle (ou survolteur). Le hacheur série abaisse la tension de sortie, tandis que le hacheur parallèle élève la tension de sortie

Le hacheur est crucial dans les systèmes photovoltaïques car il permet de maximiser la puissance transférée à la charge en fonction des conditions de fonctionnement variables du panneau, ce qui permet de maximiser la puissance transférée et d'améliorer l'efficacité globale du système.

Le rapport cyclique dans un hacheur est utilisé pour décrire la fréquence et la durée pendant lesquelles l'interrupteur est fermé ou ouvert. Il est défini comme le rapport entre le temps de l'état actif et la période du signal. Le rapport cyclique varie entre 0 et 1, où :

$\alpha = 0$ signifie que le signal est tout le temps à l'état bas.

$\alpha = 1$ signifie que le signal est tout le temps à l'état haut.

$\alpha = 0,5$ signifie que le signal est équitablement partagé entre les états haut et bas.

Le rapport cyclique est utilisé pour déterminer la valeur moyenne d'un signal, qui est égale à la valeur à l'état haut multipliée par le rapport cyclique. [10]

II.3.3. Schéma électrique

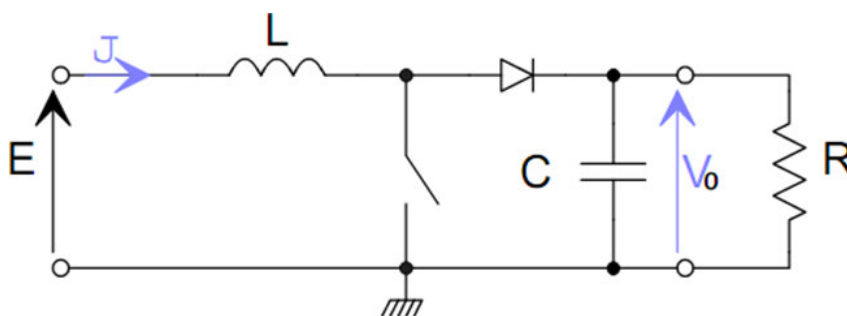


Figure II.4 : Schéma de principe d'un hacheur boost

II.4. Les MPPT (Maximum Power Point Tracking)

MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme utilisé pour maximiser la puissance générée par un système photovoltaïque (PV). Il permet de suivre le point de puissance maximale (MPP) du panneau photovoltaïque en fonction des conditions de fonctionnement variables, comme l'irradiation solaire et la température.

Dans notre modèle, nous avons utilisé l'algorithme MPPT P&O (Perturbation and Observation), qui est l'un des algorithmes les plus courants et les plus efficaces pour maximiser la puissance du système PV.

L'algorithme P&O fonctionne en perturbant la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque et en observant la réponse pour déterminer si la puissance maximale est atteinte. Si la puissance maximale n'est pas atteinte, l'algorithme perturbe à nouveau la tension et observe à nouveau la réponse, jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte.

L'algorithme P&O est particulièrement efficace car il est simple à implémenter et peut être utilisé avec des systèmes PV de petite à grande taille. Cependant, il a des limitations, comme la nécessité de perturber la tension pour atteindre le MPP, ce qui peut causer des perturbations dans le fonctionnement du système [11].

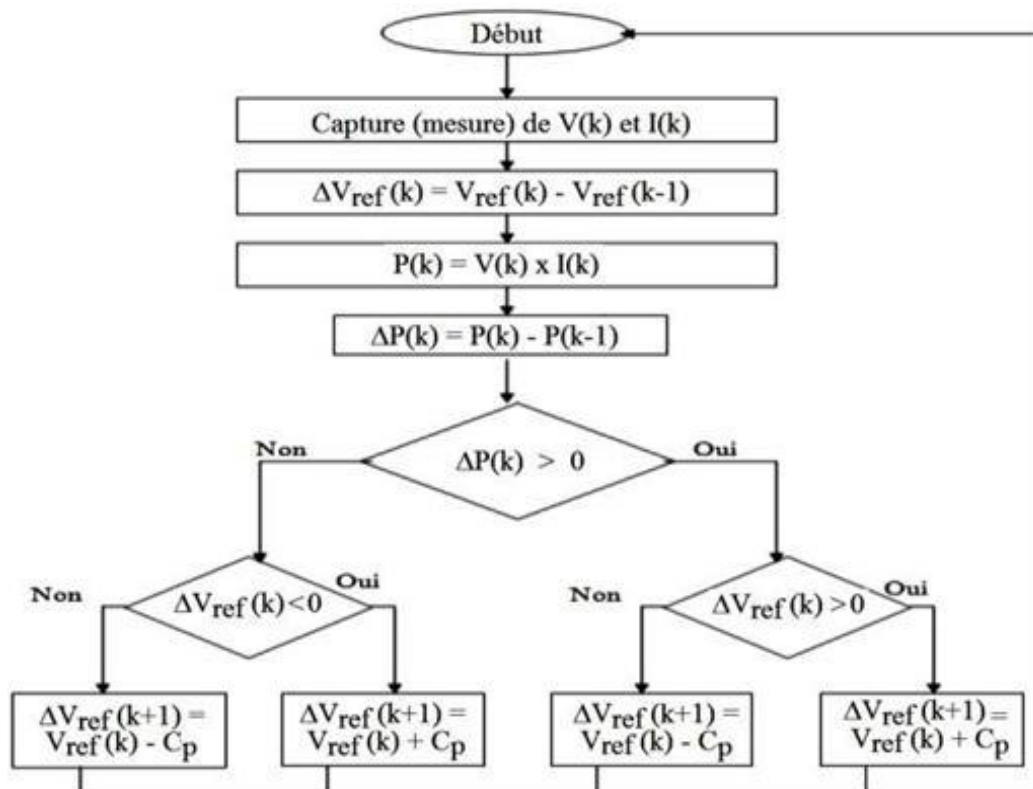


Figure II.5 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation

La figure (II.5) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure 5, la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle [12].

II.4.1. Hacheur avec MPPT

Un hacheur avec MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisé dans un système photovoltaïque pour plusieurs raisons.

D'abord, il permet d'optimiser la puissance générée par le panneau photovoltaïque en suivant la courbe de puissance maximale. Cela est particulièrement important pour les systèmes photovoltaïques car la puissance générée dépend fortement de la température et de l'irradiation solaire, qui peuvent varier significativement au fil du temps et de la saison.

Ensuite, le MPPT permet de s'adapter à la charge alimentée par le panneau photovoltaïque, garantissant que la puissance maximale disponible est transférée à la charge. Cela est essentiel pour les systèmes photovoltaïques car la charge peut varier en fonction de la consommation électrique locale.

Enfin, le MPPT permet de gérer les fluctuations de la puissance générée par le panneau photovoltaïque, ce qui est important pour les systèmes photovoltaïques car la puissance peut varier significativement en fonction de la température et de l'irradiation solaire.

En revanche, un système éolien est généralement plus robuste face aux fluctuations de la puissance générée, car la vitesse du vent est généralement plus stable que l'irradiation solaire. Par conséquent, un MPPT n'est pas aussi essentiel pour les systèmes éoliens, où la puissance générée est principalement influencée par la vitesse du vent et la géométrie du rotor.

II.4.2. Fonctionnement d'un hacheur avec MPPT dans un système PV

Un hacheur avec MPPT (Maximum Power Point Tracking) fonctionne dans un système photovoltaïque de la manière suivante :

Le hacheur est placé entre le panneau photovoltaïque et la charge (batterie ou réseau électrique) pour adapter l'impédance vue par le panneau et maximiser la puissance

transférée. Il peut fonctionner en mode élévateur ou abaisseur selon la tension du panneau et de la charge.

L'algorithme MPPT ajuste en permanence le rapport cyclique (α) du hacheur pour faire fonctionner le panneau à son point de puissance maximale (MPP), qui dépend de l'ensoleillement et de la température. Cela permet d'extraire le maximum de puissance disponible du panneau et de l'injecter dans la charge.

L'algorithme le plus utilisé est la perturbation et observation (P&O) : on perturbe périodiquement le rapport cyclique et on observe si la puissance augmente ou diminue, pour ajuster le sens de la perturbation. Le système oscille ainsi autour du MPP.

Le hacheur MPPT joue donc un rôle essentiel pour optimiser le rendement d'un système photovoltaïque en s'adaptant en permanence aux conditions de fonctionnement variable [13] [14].

II.6. La chaîne de conversion éolienne

II.6.1. Introduction

Une chaîne éolienne est un système complexe composé de plusieurs éléments interconnectés conçus pour capturer, convertir et distribuer l'énergie éolienne. Cette énergie est transformée en électricité utilisable pour alimenter des foyers, des industries et des infrastructures.

La structure d'une chaîne éolienne comprend généralement plusieurs composants principaux, notamment les éoliennes elles-mêmes, les fondations, les systèmes de transmission et de distribution, ainsi que les éléments de contrôle et de surveillance. Chaque composant joue un rôle crucial dans le fonctionnement global de la chaîne éolienne, assurant ainsi son efficacité et sa fiabilité.

II.6.2. Modélisation de la chaîne conversion éolienne

Notre chaîne de conversion éolienne se compose d'une voilure qui capte l'énergie cinétique du vent couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes et des batteries de stockage. C'est la structure que nous retenons pour ce travail de modélisation.

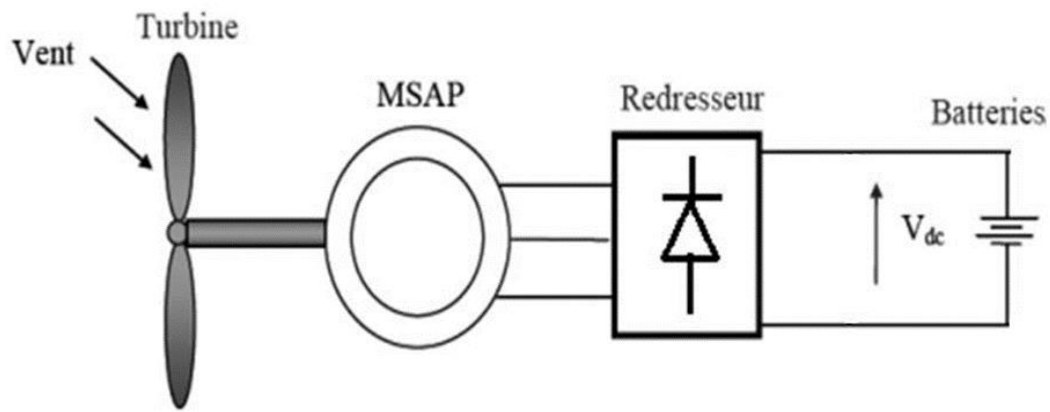


Figure II.6 : Structure de la chaîne de conversion éolienne

II.6.3. Modélisation du vent

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée d'un système de conversion éolienne. Elle est souvent représentée sous forme d'une fonction scalaire temporelle $VV = f(t)$.

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V v^3$$

Avec :

ρ : Est la densité d'air [$kg \cdot M^3$].

$S = \pi R^2$: Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale [m^2]

V_V : Est la vitesse du vent [m/s].

II.6.3.1. Correction de la vitesse de vent avec l'altitude

Une augmentation de la vitesse du vent est une relation directe avec l'altitude par rapport au sol (Hladik1994), car l'altitude était plus élevée, la vitesse du vent était grande.

Nous avons donc converti les vitesses de vent à h_0 en vitesses de vent à la hauteur de moyeu h par la relation de Justus (1978) :

$$h = h_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\beta$$

Où β est le coefficient de correction souvent considéré comme étant égal à 0,15.

Sa valeur dépend de la nature du terrain. Les valeurs habituelles sont montrées dans le

Tableau ci-dessous.

Nature du terrain	β
Surface en eau	0.1
Plaine herbeuse	0.15
Culture agricole	0.2
Végétation avec peu d'arbre	0.2
Bois	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25
Terrain accidenté, montagneux	0.25

Tableau (II.1) : Valeurs du coefficient de correction

II.6.3.2. Distribution de Wei bull

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'analyse géographique du vent parmi elles : La distribution de Wei bull permet souvent une bonne approximation de la distribution de la vitesse :

$$(V) = \frac{V}{A} \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^K\right)$$

Où :

A : est le paramètre d'échelle en m/s.

K : est un paramètre morphologique sans dimension.

V : la vitesse.

II.6.4. Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur d , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Fig II.7) s'écrit :

$$dEc = \frac{1}{2} \rho S \cdot dx \cdot v^2$$

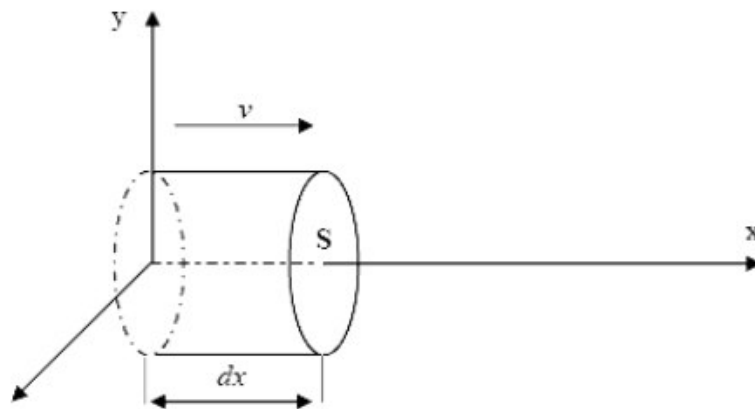


Figure II.7 : Colonne d'air animée d'une vitesse V .

La puissance Pm extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = vdt$, on déduit l'expression de Pm :

$$Pm = \frac{dEC}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3$$

ρ : Densité volumique de l'air (Kg/m^3)

V : vitesse du vent (m/s)

EC : Energie cinétique du vent (Joules).

II.6.4.1. La loi de Betz

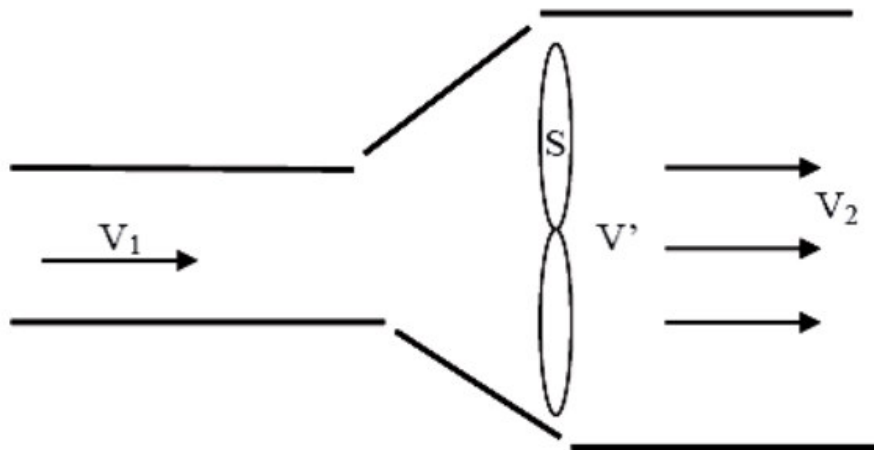


Figure II.8 : Théorie de Betz : Schéma de principe

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

Soit V' , la vitesse au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne, et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔE_c est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1)$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne P_{aer} s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par :

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2)$$

En identifiant les équations (1) et (2), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Et donc :

$$P_{\text{ear}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2) \cdot (V_1 + V_2)$$

II.6.4.2. La vitesse spécifique ou normalisée

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) en anglais Tip Speed Ratio (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

Si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente

Si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide

Par exemple, une éolienne bipale peut avoir un paramètre λ égal à 20.

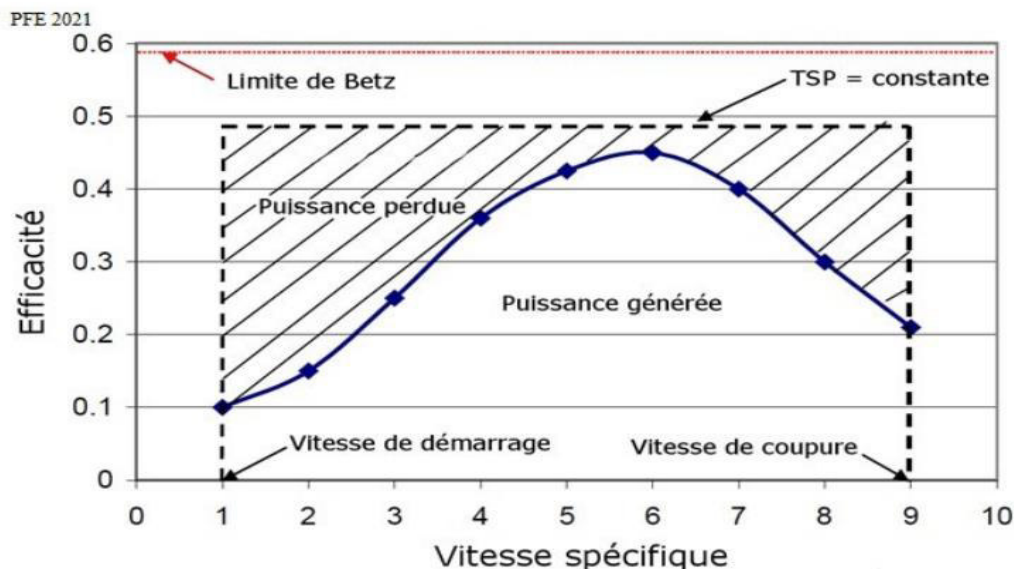


Figure II.8. : Puissance en fonction de la vitesse spécifique

II.6.4.3. Coefficient de puissance

Le coefficient de puissance ou coefficient de performance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines.

Le coefficient de puissance tient compte de la limite de Betz c'est pour cela qu'il sera toujours inférieur à cette limite, il est de l'ordre de 35 % pour une éolienne à axe horizontal il ne dépasse pas 10 % pour une éolienne axe vertical.

Le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{éol}}{P_v} = 0,59$$

C_p^{opt} Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

La figure donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

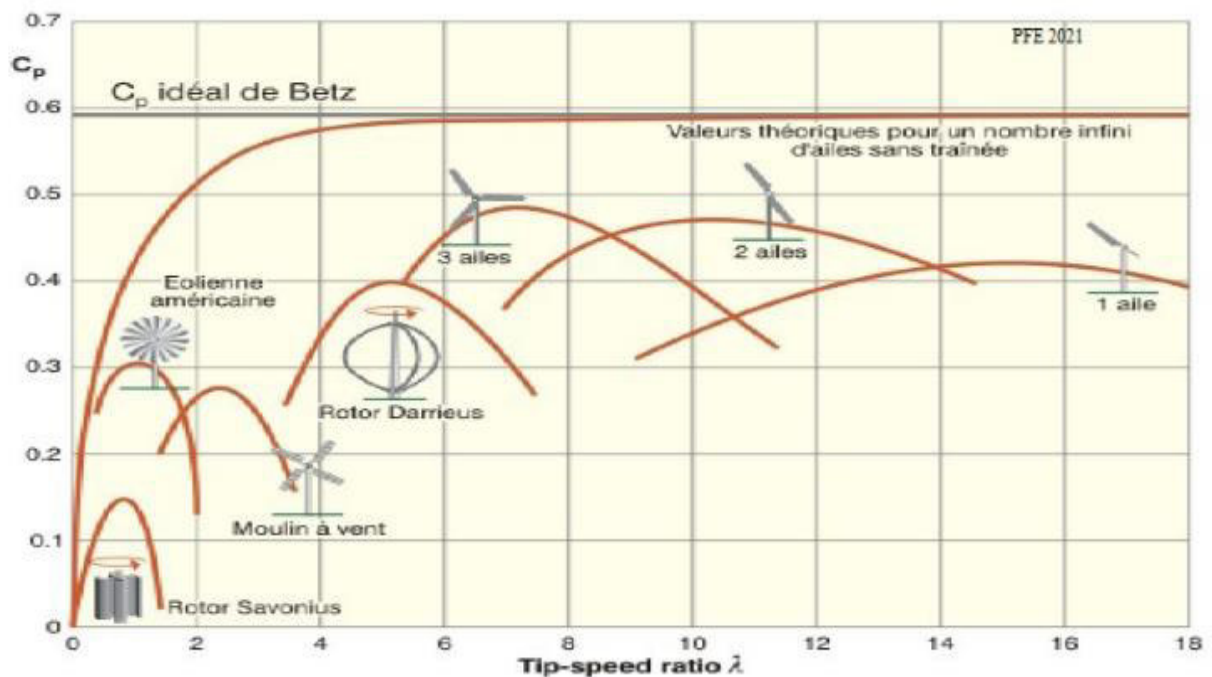


Figure II.9 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs

II.6.4.4. Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_T} = \frac{R_t \cdot P_m}{\lambda \cdot t} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V^2$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2.T_t}{\rho.S_t.R^t.V^2}$$

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).

II.6.5. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice.

$$T_t = \frac{T_{em}}{G}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G}$$

Avec :

- ✚ G est le gain du multiplicateur.
- ✚ T_{em} , le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone,
- ✚ T_t , le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
- ✚ Ω , est la vitesse mécanique de la génératrice.

II.6.6. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne en termes de robustesse, maintenance et prix par rapport à la machine asynchrone à double alimentation.

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices.

- ✚ L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- ✚ La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- ✚ L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- ✚ L'effet d'encoche est négligeable.
- ✚ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

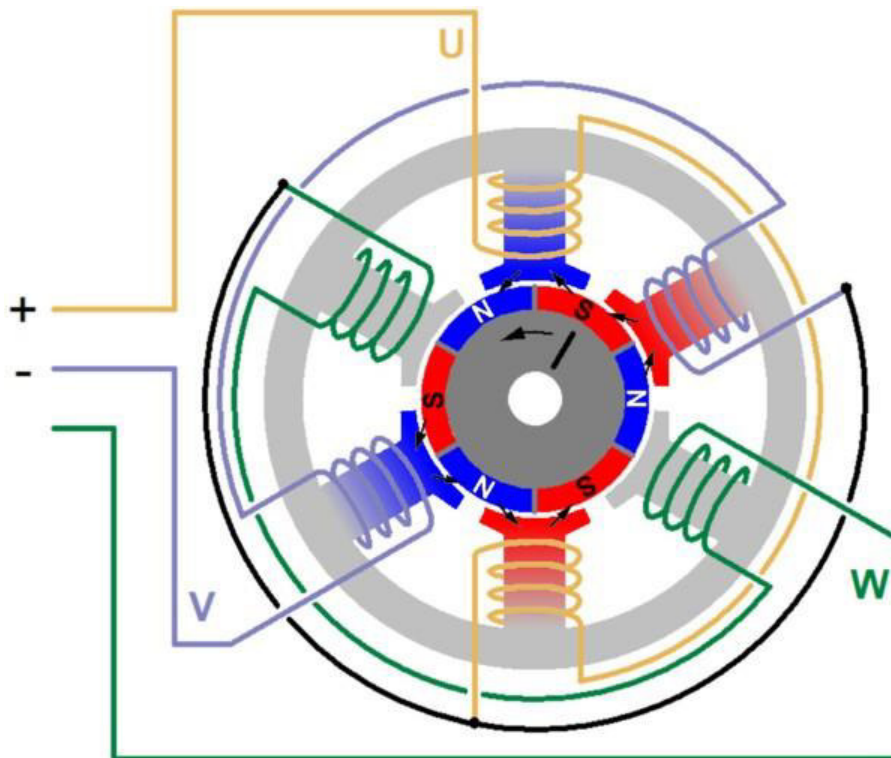


Figure II.10 : Structure de la génératrice synchrone.

II.6.7. Modélisation du redresseur PD3 à diodes

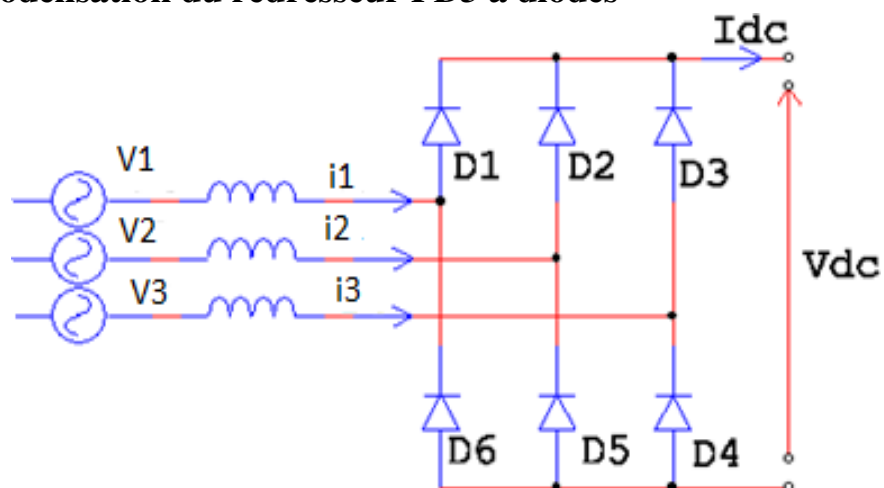


Figure II.11 : Redresseur PD3 à diodes.

D'après la figure (II.11), lorsque la diode $D1$ conduit, l'une des deux diodes $D5$ et $D4$ conduit également ; il en vient que $D1$ conduit lorsque $V1$ est supérieure à $V2$ et $V3$.

Pendant chaque séquence de conduction, la tension V_{dc} à la sortie du redresseur est :

$$V_{dc} = \max(V_j) - \min(V_j)$$

$$V_{redmoy} = 3 * \sqrt{3} * (V_m \div \pi)$$

Avec :

V_{dc} : La tension redressée.

V_m : La valeur maximale de la tension.

II.7. Modélisation de la batterie

La modélisation électrique d'une batterie (fig.II.12) vise à comprendre son fonctionnement électrique sans nécessairement recourir à des équations complexes. Elle consiste à décrire les caractéristiques électriques de la batterie, telles que sa capacité, sa résistance interne et sa réponse aux variations de courant et de tension. Cette approche permet de prédire le comportement de la batterie dans différentes situations d'utilisation, comme la charge, la décharge et les variations de température. En utilisant des techniques de modélisation électrique simplifiées, on peut évaluer les performances de la batterie et optimiser son utilisation dans diverses applications, sans entrer dans les détails mathématiques complexes des processus électrochimiques sous-jacents.

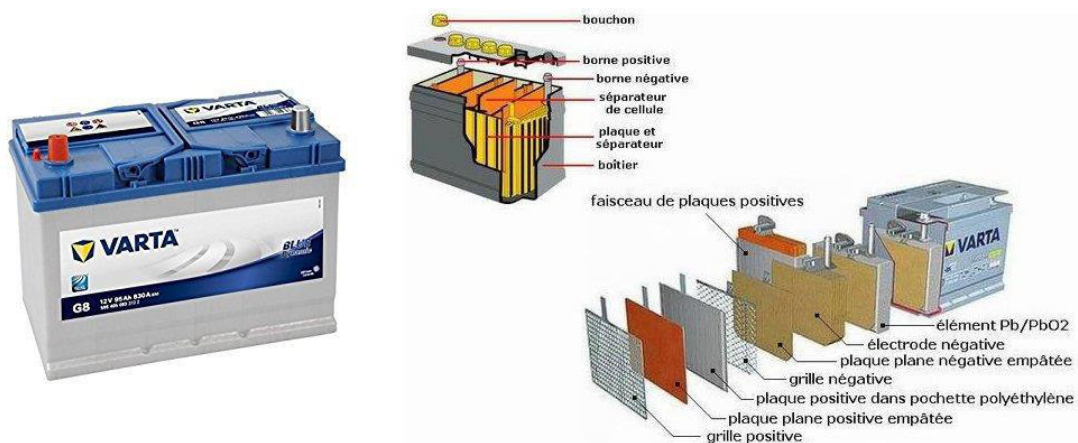


Figure II.12 : composants d'une batterie de voiture

Le système de stockage d'énergie considéré dans cette étude est représenté par un modèle électrique composé d'une source de tension idéale connectée en série avec une résistance et un condensateur comme le montre la figure (II.13)

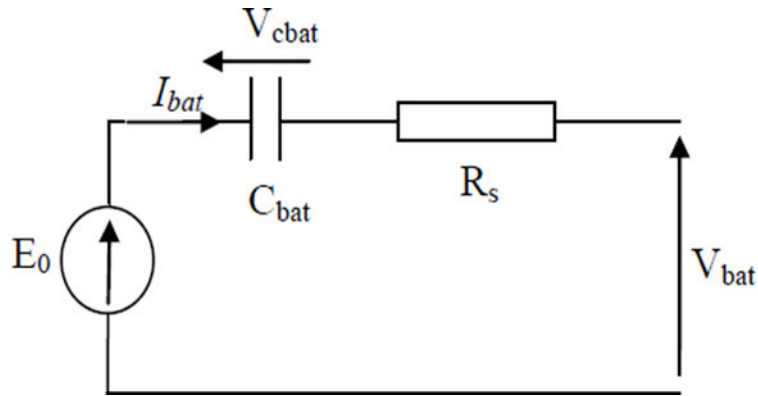


Figure II.13 : Modèle électrique de la batterie

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat}$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}}$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} t_{bat}$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}}$$

C_{bat} : La capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_{bat} : La quantité de charge (C) manquante par rapport à C_{bat} .

II.8. Modélisation d'un bus continu

Le bus continu de la figure (II.14) est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

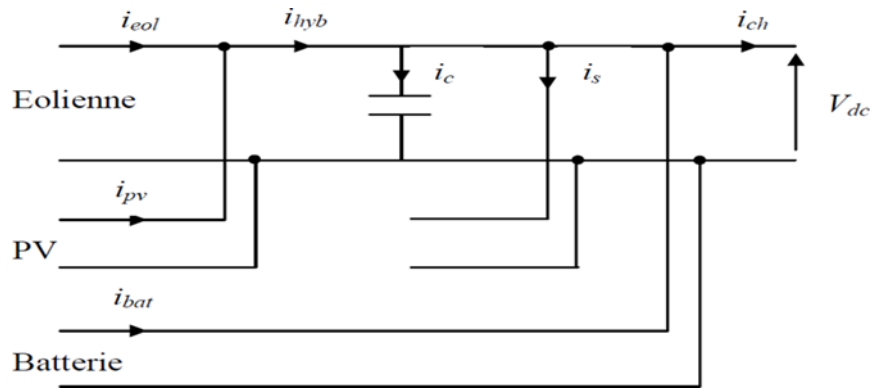


Figure II.14 : Schéma d'un bus continu.

D'après la figure (II.14) on a :

$$i_{hyb} = i_{eol} + i_{pv}$$

$$i_{ch} = i_{hyb} - i_c - i_s \pm i_{bat}$$

Donc la tension de bus continu est égale :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} * i_c dt$$

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système électrique hybride (éolien- photovoltaïque) avec batterie de stockage. Cette modélisation nous permettra de simuler les performances du système global étudié.

Chapitre III

*Gestion de puissances et
résultats de simulation*

III.1. Introduction

Dans le présent chapitre, l'accent est mis sur les résultats obtenus après simulation des sous-systèmes éolien et photovoltaïque pris individuellement, puis du système hybride dans son ensemble. L'objectif est de gérer la répartition de la puissance entre les différents éléments du système, afin de contrôler les échanges d'énergie et réguler le processus de charge et de décharge de la batterie.

III.2. Gestion de puissance du système hybride avec stockage

La gestion d'énergie proposée est faite par rapport à la puissance demandée par la charge variable, l'organigramme suivant résume les différents modes de gestion :

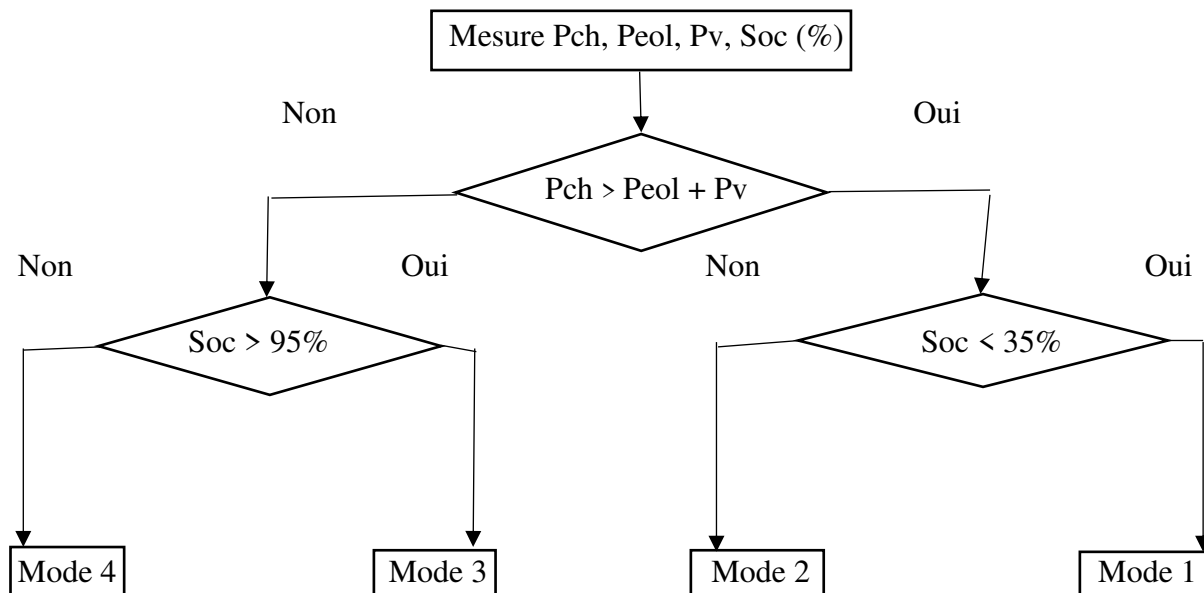


Figure III.1 : Organigramme des différents modes de gestion de puissances du système.

Lorsque la puissance demandée est supérieure à zéro, nous avons les modes suivants :

Mode 1 : $P_{ch} = P_{pv} + P_{eol}$ sans batteries (mode non-souhaité)

Mode 2 : $P_{ch} = P_{pv} + P_{eol} + P_{batt}$

Mode 3 : Sans charge de batteries (mode non-souhaité)

Mode 4 : Charge des batteries

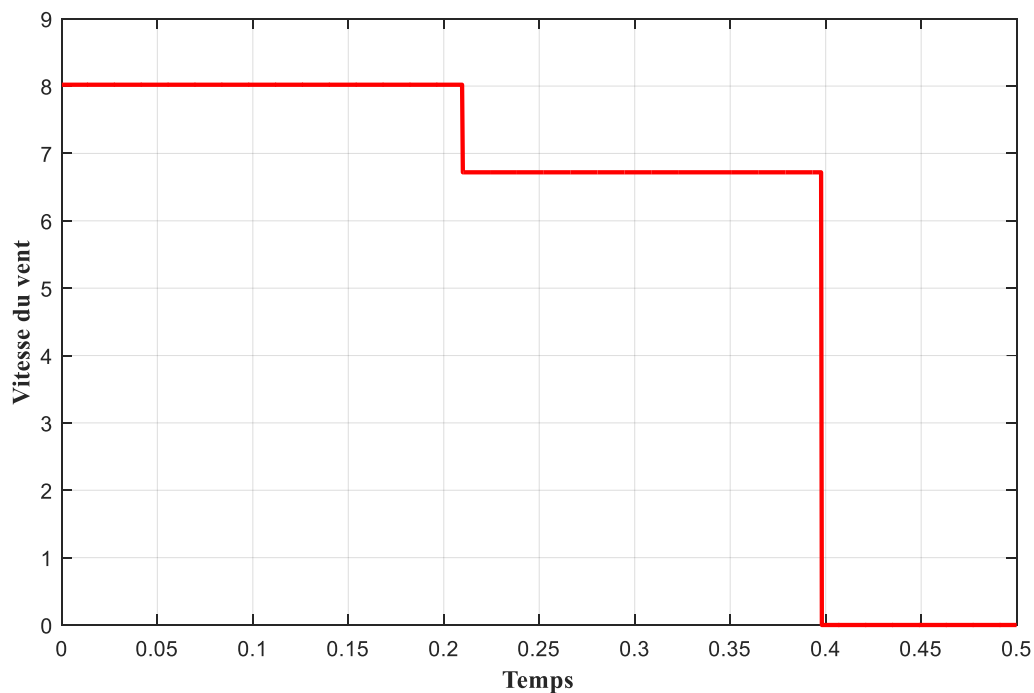


Figure III.3 : Vitesse du vent. [m/s].

La figure (III.4) présente l'évolution de la puissance éolienne au fil du temps. Cette puissance fluctue entre deux niveaux (0 W et 10500 W) pendant une période déterminée. On constate que la puissance éolienne est directement proportionnelle à la vitesse du vent.

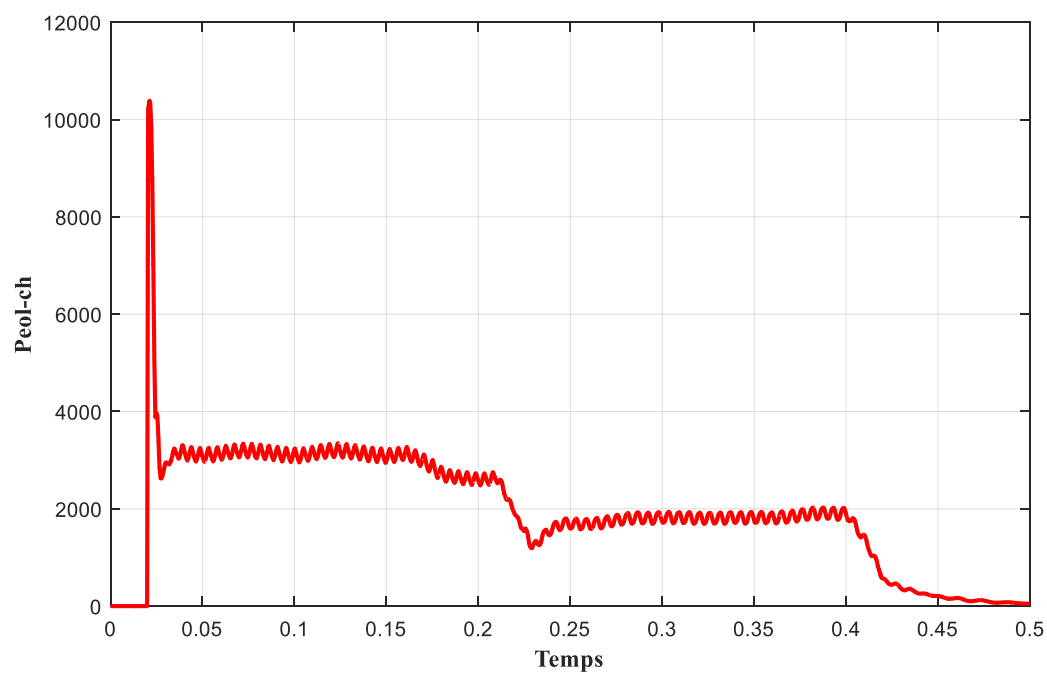


Figure III.4 : Puissance de l'éolienne. [W]

III.4. Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

La figure ci-dessous [fig.(III.5)] représente un schéma bloc du système photovoltaïque réalisé à partir de Matlab/Simulink.

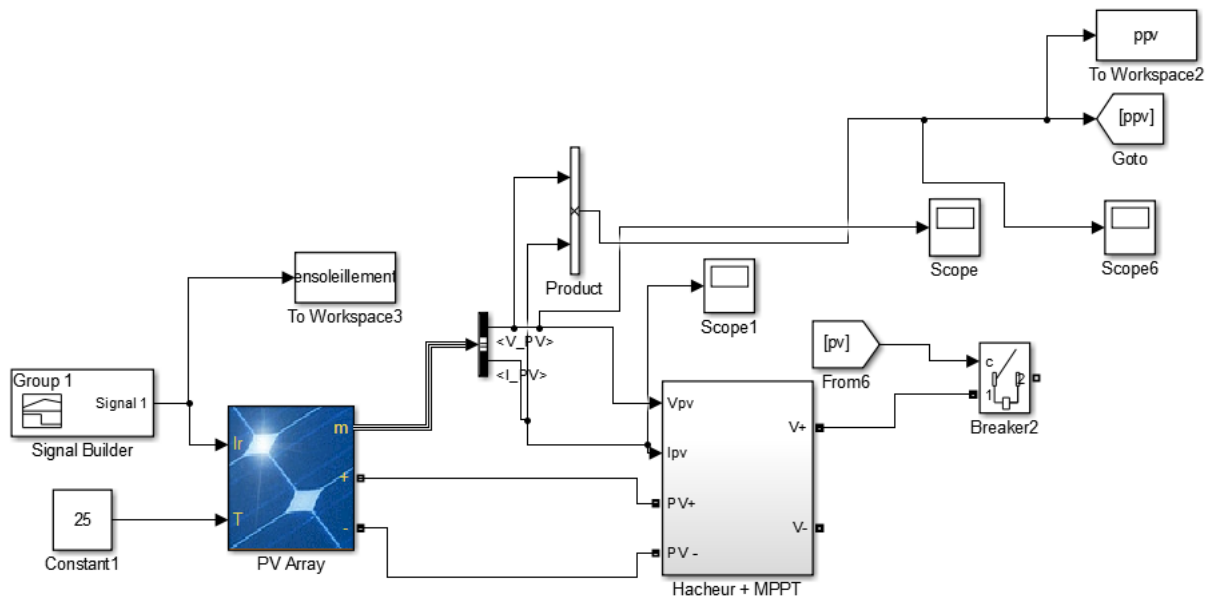


Figure III.5: Schéma Bloc du système photovoltaïque.

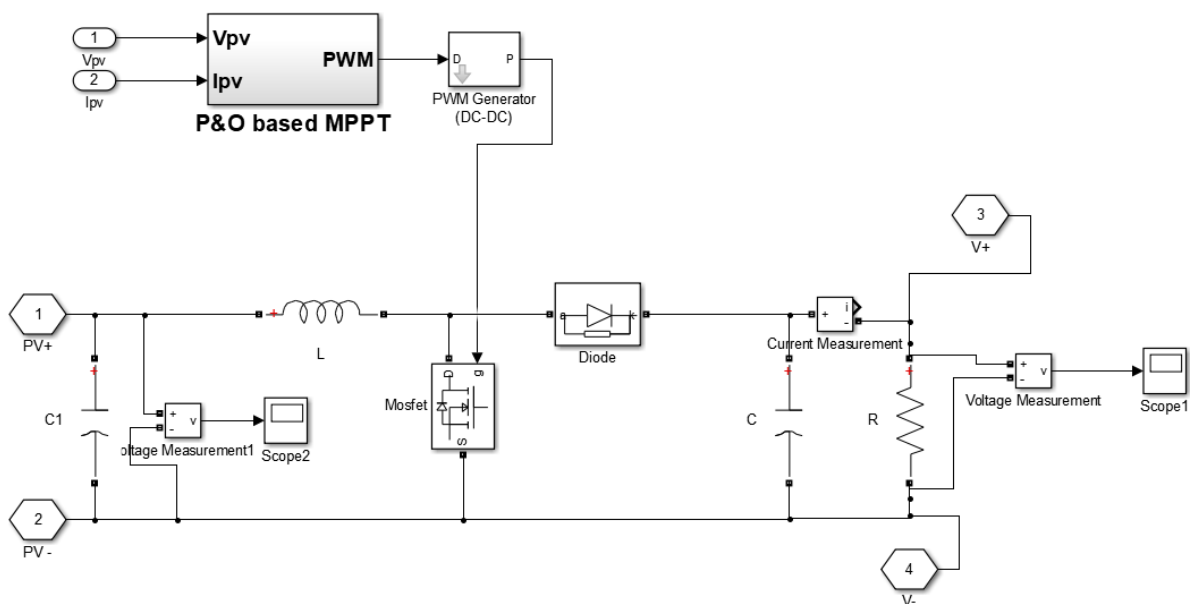


Figure III.6 : Hacheur avec MPPT (P&O) utilisé dans le système PV

La figure (III.7) représente la variation de l'ensoleillement en fonction du temps.

Dans le cas de notre simulation nous avons fixé la température à ($T = 25\text{ °C}$).

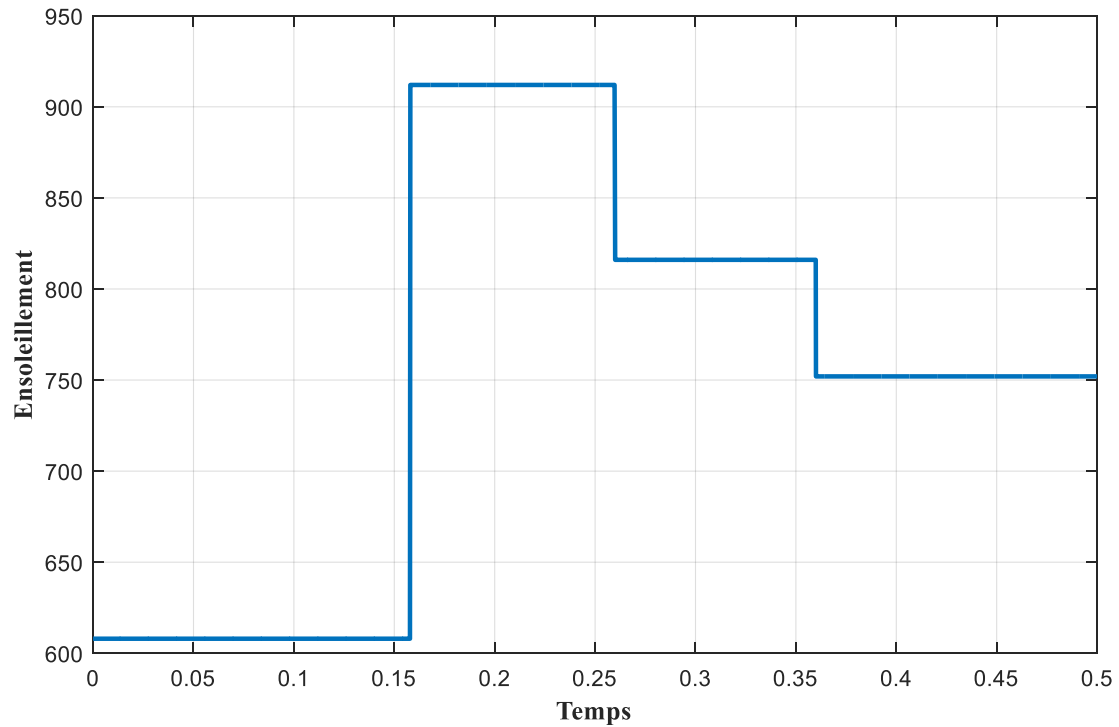


Figure III.7: L'allure de l'ensoleillement.

La figure (III.8) montre l'évolution temporelle de la puissance photovoltaïque. On observe que cette puissance varie entre 0 W et 1800 W. Cette variation reflète directement les changements d'ensoleillement représentés sur le graphique.

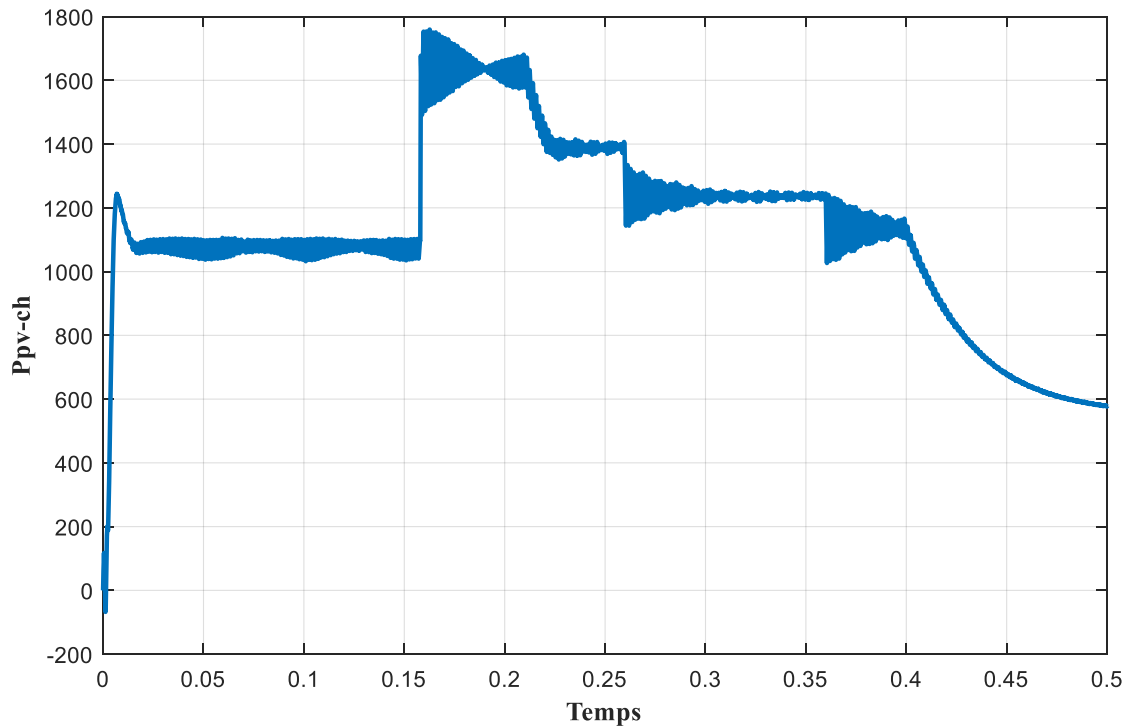


Figure III.8: Puissance photovoltaïque du système.

III.5. Batteries :

La figure ci-dessous [fig.(III.9)] représente un schéma bloc d'une batterie réalisé à partir de Matlab/Simulink.

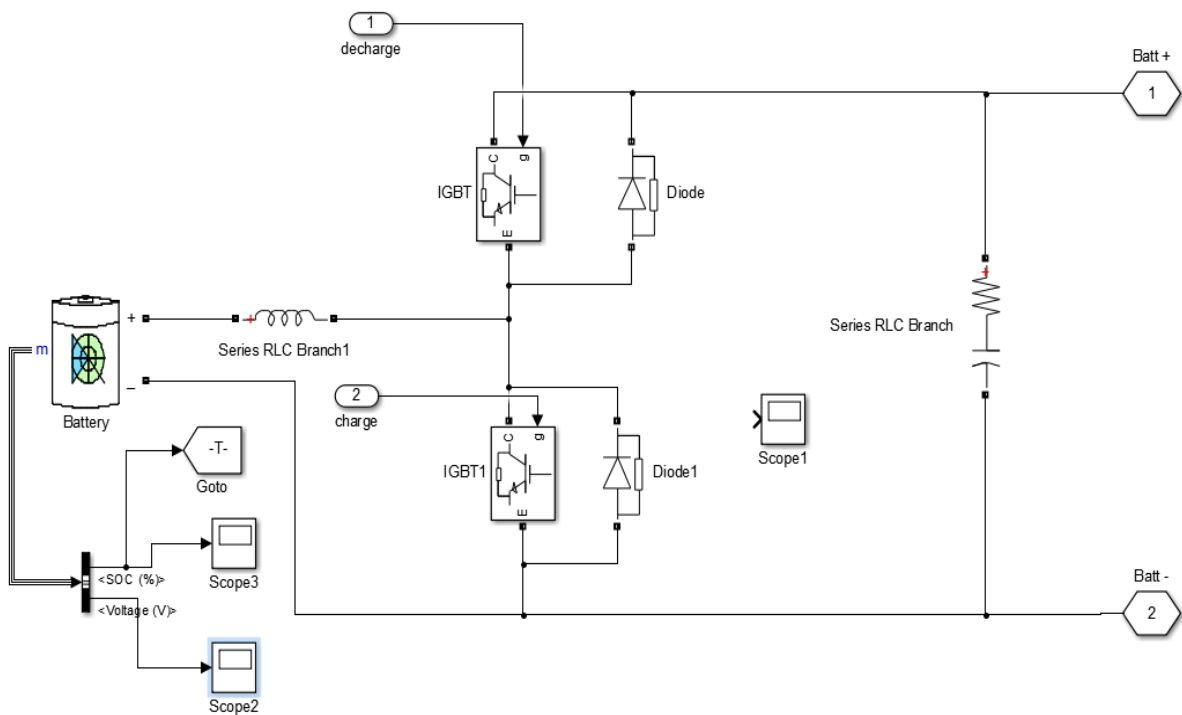


Figure III.9: Schéma Bloc de la batterie.

La figure (III.10) montre l'état de charge et de décharge de la batterie. On observe que la batterie est initialement chargée à 80% et effectue ensuite des cycles de charge et de décharge, pour finalement atteindre 74%.

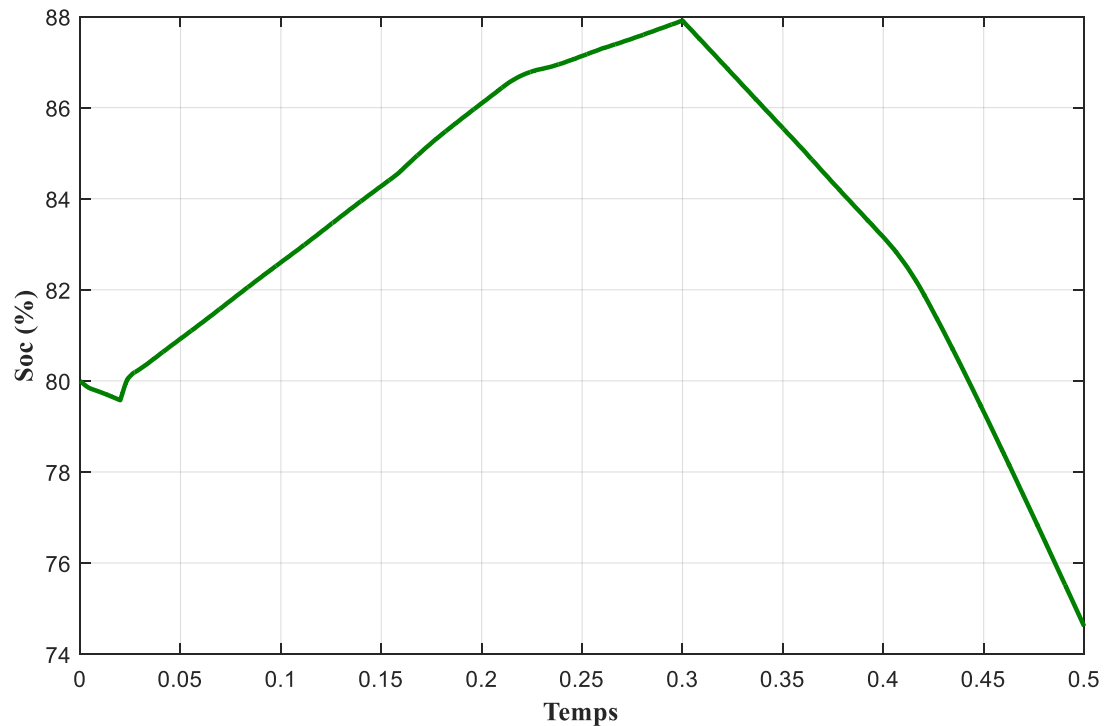


Figure III.10: Etat de charge de la batterie.

La figure (III.11) illustre l'évolution de la tension de la batterie au fil du temps. Initialement, la batterie est chargée à une tension de 107.9V, puis cette tension varie légèrement au cours du temps pour finalement atteindre une valeur proche de 107.7V.

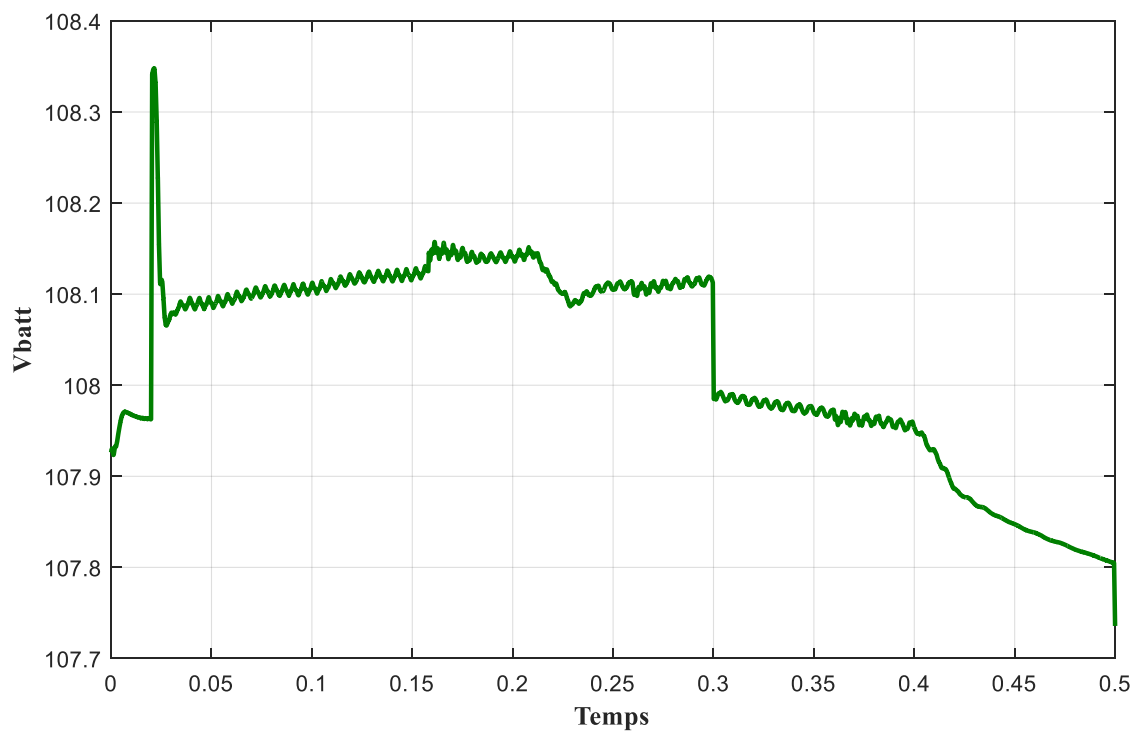


Figure III.11: L'allure de la tension dans la batterie.

La figure (III.12) montre la variation du courant dans la batterie au fil du temps. On observe que l'évolution du courant suit celle de la puissance de la batterie dans le système hybride (P_{batt}-ch) tout au long de la période de simulation.

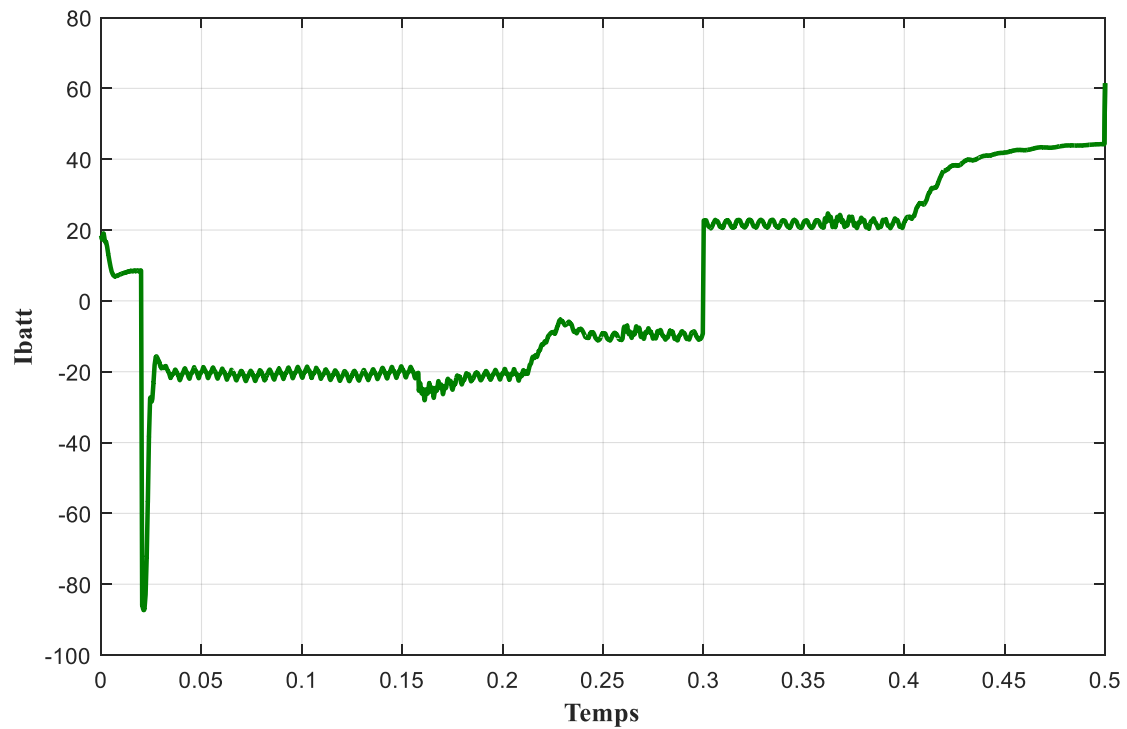


Figure III.12: L'allure du courant de la batterie.

La figure (III.13) montre l'évolution temporelle de la puissance de la batterie dans le système hybride en fonction du temps. L'évolution de cette puissance suit les fluctuations de l'allure du courant.

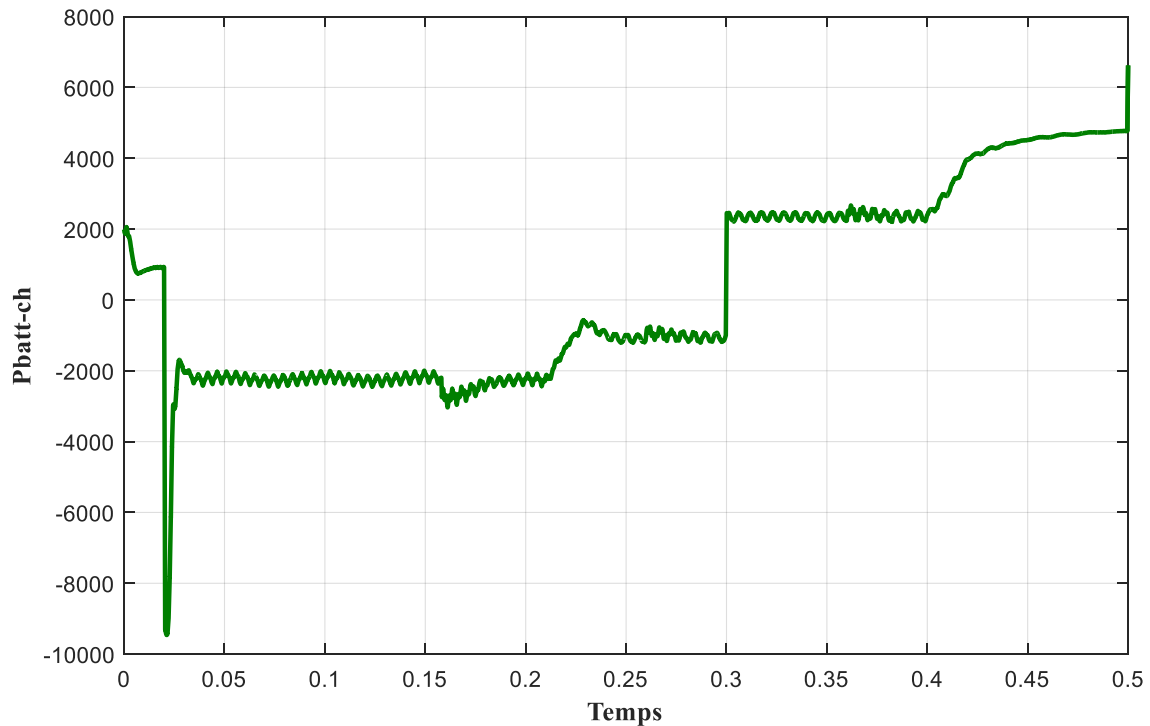


Figure III.13 : Puissance de la batterie branchée au système.

III.6. Système hybride étudié :

La figure (III.14) présente le système hybride étudié, composé de deux systèmes d'énergies renouvelables. Le premier système comprend une éolienne associée à une génératrice synchrone à aimants permanents, Le second système est constitué de panneaux solaires branchés en parallèle avec un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (Hacheur BOOST). Les deux sources d'énergie sont reliées à un contrôleur de charge puis à des batteries.

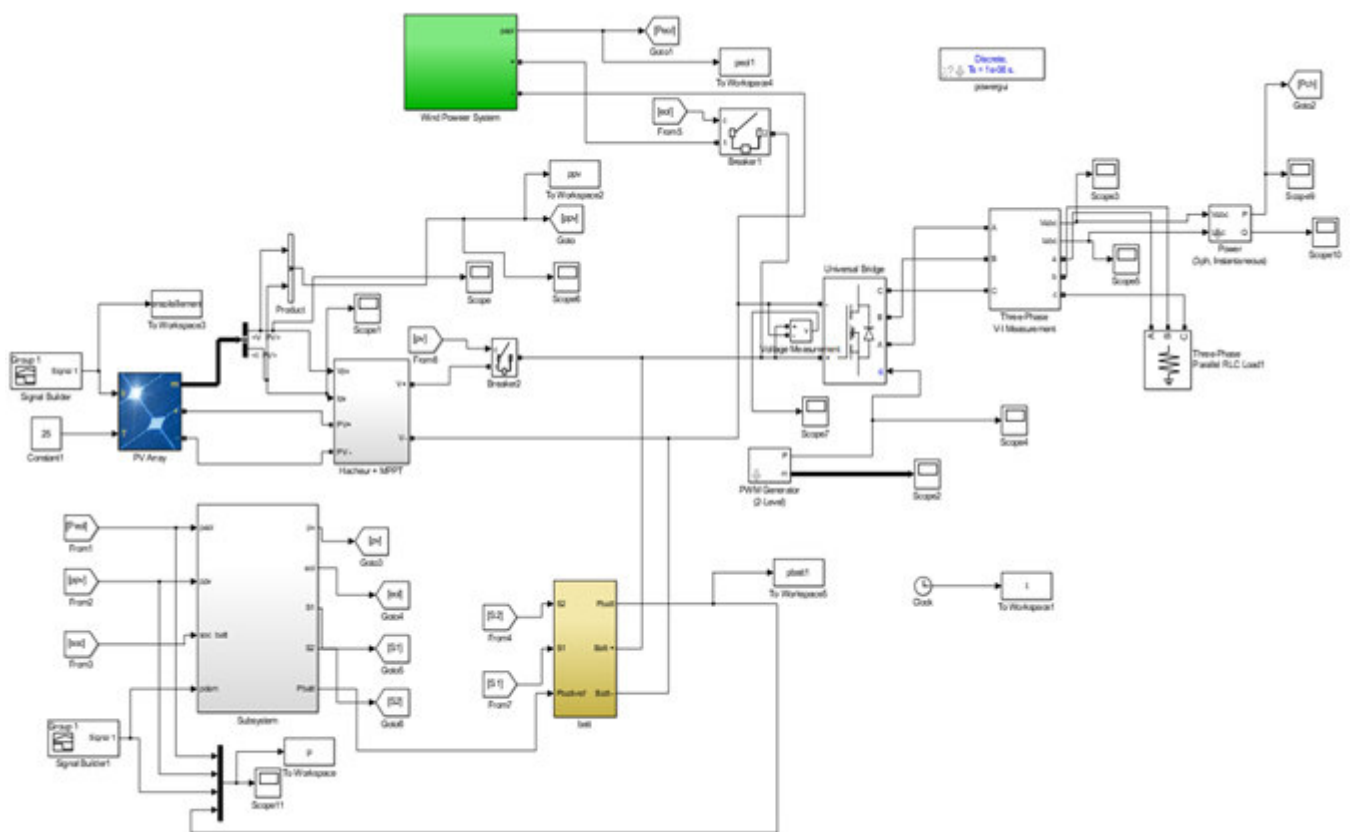


Figure III.14 : Schéma Bloc du système hybride.

III.5.1. Résultats de simulation :

La figure (III.15) montre l'allure des puissances (P_{eol} , P_{pv} , P_{ch} ou P_{dem} , P_{batt}) totales une fois notre système hybride en fonction.

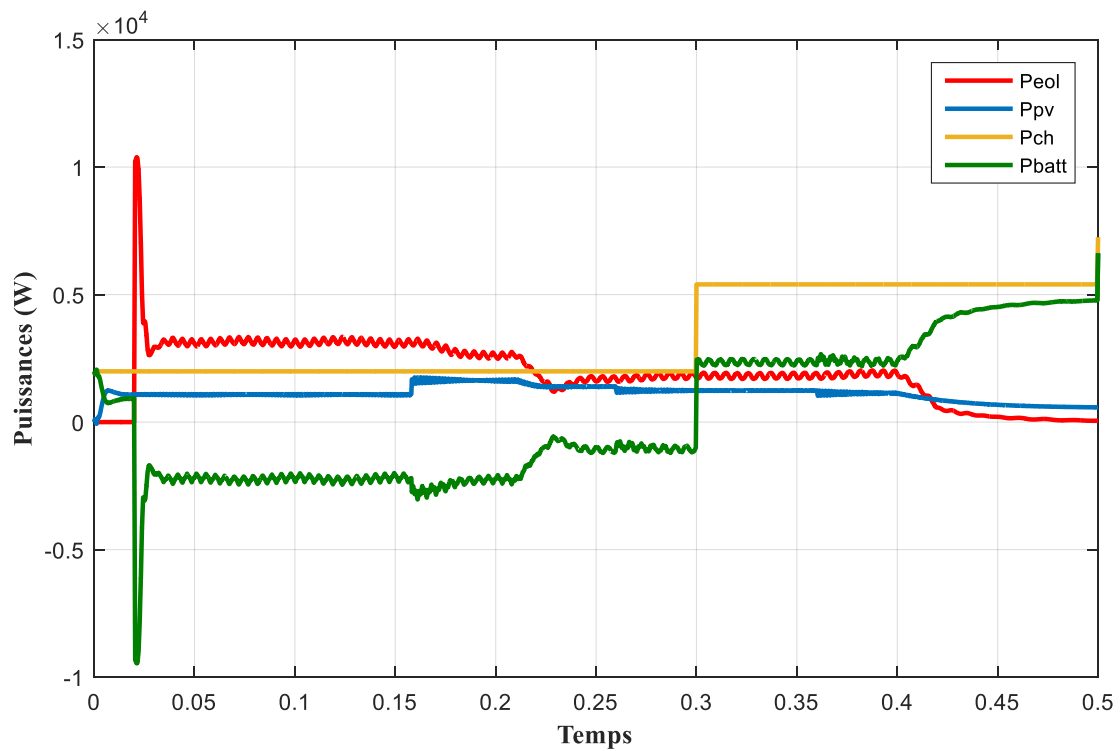


Figure III.15 : L'allure des puissances du système hybride

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons obtenu les résultats de simulation du système hybride (éolien et photovoltaïque) avec batterie de stockage suivi de la simulation du système global. Ces résultats ont révélé un bon comportement face aux variations climatiques. Et nous avons constaté que les batteries de stockage sont susceptibles de subir des cycles de charge et de décharge.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de proposer un système hybride combinant deux sources d'énergies renouvelables, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent.

En effet, ce système hybride éolien-photovoltaïque devait servir à l'alimentation en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable. En absence du soleil et du vent, nous avons prévu des batteries de stockage pour l'alimentation de secours.

Nous avons consacré un premier chapitre à la définition du système hybride, ses différents composants et ses différentes architectures.

Le deuxième chapitre se consacre à la modélisation électrique de chaque composant des chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque, ainsi que des batteries de stockage.

Le troisième chapitre, réalisé sous Matlab/Simulink, consiste d'abord en la simulation du système éolien, puis du système photovoltaïque, avant de simuler le système hybride global.

Ce travail nous a permis :

- De faire une description sur les systèmes d'énergies renouvelables (photovoltaïque et éolien).
- De modéliser puis de simuler d'abord les deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque, pour ensuite passer au système hybride global.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A.D. Bagul, Z.M. Salameh, B. Borowy, «Sizing of a Stand-Alone Hybrid Wind- Photovoltaic System Using a Three-Event Probability Density Approximation», revue Solar Energy, Vol. 56,N°4, pp. 323-335, 1996.
- [2] J.K. Kaldellisa,_, K.A. Kavadiasa, P.S. Koronakis, «Comparing wind and photovoltaic standalone power systems used for the electrification of remote consumers», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol:11, pp: 57-77, 2007 de stockage est la solution la plus sûre et la moins coûteuse pour des systèmes autonomes
- [3] Petibon, S. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». PhD thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [4] M. MEZZAI, S. MOULODJI, «Contribution à l'étude d'un Systèmes de Pompage photovoltaïque» mémoire master II de l'université de Bejaia, 2014.
- [5] Planète Énergies, "Cellule photovoltaïque - Principe de fonctionnement" // Les Énergies Renouvelables, "Définition et principe de fonctionnement du photovoltaïque"
- [6] A. Ferhat, A.Amirouche, «Etude et implémentation d'une stratégie de contrôle d'un système hybride (Photovoltaïque Diesel) », Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
- [7] MEZIANI Zahra. «Modélisation de modules photovoltaïques ». Mémoire de magister, Université de Batna Génie électrique 2012.
- [8] B. Multon, « Etat de l'art des Aérogénérateurs Electriques », Techniques de l'Ingénieur, Ref D3960, Vol D7, 2004.
- [9] "Solar Cell Device Physics" par Stephen Fonash
- [10] Les signaux analogiques – Robert Cirddu
- [11] Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration de nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle - Bacem GAIED CHORTANE
- [12] J. Fadat, 'Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque Commande MPPT', La Revue 3EI, N°43, Décembre 2005.
- [13] TP Convertisseur photovoltaïque – Vincent Boitier
- [14] Bilel BEN NASSER - Etude et modélisation de la commande MPPT avec Matlab.