

dre...../F.S.S.A/UAMOB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

SELLAMI Nassereddine

AOUADI Abdellah

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière :EM

Option : Electromécanique

Thème :

**Optimisation Et Gestion d'Energie D'un Système Hybride A Energies
Renouvelables**

Devant le jury composé de :

Mr. BERRAG	MCB	UAMOB	Président
Mm. BEN SMAIL	MCB	UAMOB	Encadreur
Mr. GRICHE	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

*Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale
pour accomplir ce travail.*

Ce travail a été effectué sous la direction de la Madame

*BENSMAIL SAMIA, docteur à l'université Bouira que nous
tenons à remercier vivement pour les conseils et aides apportés durant la
réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions également vers les membres de jurys pour
l'honneur qu'ils nous ont fait en examinant ce travail.*

*Comme nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés
durant la réalisation de ce mémoire.*

Dédicace

Je dédie ce mémoire

À la mémoire de mon très cher père

À ma très chère mère

*Pour leur aide et leur patience. Je pense ne jamais
pouvoir assez les remercier.*

*À Mes chers frères et À mes chères sœurs, À tous
mes nièces et mes neveux.*

À ma binôme Abdellah

*À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la
science et à tous ceux qui utilisent la science pour
le bien et la prospérité de l'humanité.*

Nassereddine

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers au monde, mes parents pour leur aide et leur patience.

Je pense ne jamais pouvoir assez les remercier.

À Mes chers frères et À mes chères sœurs, mes amis

À ma binôme Nassereddine

À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Abdellah

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes d'énergie hybride

Figure I.1: Configuration du système hybride à bus continu.	5
Figure I.2 : Configuration du système hybride à bus alternatif	6
Figure I.3: Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	8
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
Figure I.5 : caractéristique I(V) et P(V).....	9
Figure I.6 : Module photovoltaïque	9
Figure I.7 : Cellules identiques en série.....	10
Figure I.8 : Cellules identiques en parallèle.....	10
Figure I.9 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (np+ ns) cellules identiques	11
Figure I.10 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	11
Figure I.11 : Caractéristique P(V) pour différents éclairagements.....	12
Figure I.12 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	12
Figure I.13 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	13
Figure I.14 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	13
Figure I.15 : principaux organes du système de conversion éolien.	15
Figure I.16 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée	16
Figure I.17 : Caractéristique puissance-vitesse de vent d'une éolienne	17
Figure I.18 : Cellule électrochimique de base.....	19
Figure I.19: Connexion des cellules en série (gauche) ou en parallèle (droite).....	19

Chapitre II : MODELISATION DE SYSTEME HYBRIDE

Figure II.1: Structure de la chaîne hybride.	22
Figure II.2 : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.....	23

Liste des figures

Figure II. 3: Circuit électrique du convertisseur Boost.....	26
Figure II. 4: Circuits équivalents du convertisseur Boost,(A) : S fermé et (B) : S ouvert	26
Figure II. 5: Caractéristique P_{pv} (v_{pv}) et I_{pv} (v_{pv}) dans les conditions standards	28
Figure II.6 : Caractéristique $P_{pv}V_{pv}$ et $I_{pv}V_{pv}$ pour différents éclairement.....	29
Figure II.7 : Caractéristique $I_{pv}V_{pv}$ et $P_{pv}V_{pv}$ pour différents températures.....	29
Figure. II.8: Schéma Synoptique de reconstruction du vent.....	30
Figure. II.9: profil de vent appliqué.	31
Figure. II.10: Colonne d'air animée d'une vitesse V.	31
Figure. II.11 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	32
Figure. II.12 : Différents parties mécaniques de l'éolienne.....	34
Figure. II.13: Eléments caractéristiques d'une pale.	34
Figure. II.14 : Flux d'air sur un profil de pale.	35
Figure. II.15 : Entrées-sorties du modèle de la turbine.	35
Figure. II.16 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.....	36
Figure. II.17: Modélisation de l'arbre générateur.	37
Figure II.18 : Représentation symbolique de la MSAP	38
Figure II.19: Schéma du redresseur MLI.	40
Figure II.20 : le bus continu Vdc	40
Figure II.21 Modèle R-C de la batterie.	41
Figure II.22: Schéma d'un hacheur Buck-Boost.....	42

CHAPITRE III : OPTIMISATION DU SYSTEME HYBRIDE

Figure III.1 : Diagramme fonctionnel algorithm "perturbation et observation"	45
Figure III.2 : allure de la puissance sous conditions stables ($E_s=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$)...	46
Figure III.3: consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement lent.....	46
Figure III.4: allure de la puissance pour une variation lente de l'ensoleillement	46
Figure III.5 : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.	48

Liste des figures

Figure III.6 : Schéma de la turbine avec l'algorithme MPP.	49
Figure III.7 : Schéma de principe de la commande vectorielle.....	49
Figure III.8 : Allure de la vitesse du vent constant.	51
Figure III.9 : Allure de la vitesse de la turbine.....	51
Figure III.10: Allure de puissance de la turbine.	52
Figure III.11 : Allure du coefficient de puissance C_p	52
Figure III.12: Allure du courant i_q	52
Figure III.13: Allure du couple électromagnétique mesuré.	53
Figure III.14 : la vitesse du vent variable.....	54
Figure III.15 : la vitesse de la turbine.....	54
Figure III.16: La puissance de la turbine.....	54
Figure III.17 : coefficient de puissance C_p	55
Figure III.18: le courant de la machine i_q	55
Figure III.19 couple électromagnétique C_{em} mesuré.....	55
Figure III.20: Schéma synoptique du système hybride avec contrôleurs MPPT.	56

CHAPITRE III : OPTIMISATION DU SYSTEME HYBRIDE

Figure IV.1 : Profil de puissance demandé par la charge (foyer isolé) sur une journée utilisé dans notre étude.	59
Figure .VI.2 : Algorithme de gestion de l'énergie.	61
Figure IV.3: schéma global du système hybride sous Matlab/Simulink.	62
Figure IV.4 : Profile de l'ensoleillement et de la température.	62
Figure IV.5 : Profil du vent pendant deux jours successifs.....	63
Figure IV.6 : Profil de puissance demandée par la charge.....	63
Figure IV.7: Puissance optimale produite par le générateur photovoltaïque et l'éolienne	63
Figure IV.8 : Puissance totale demandée, puissance produite ($P_{pv}+P_{éol}$) et puissance fournie par les batteries	64
Figure IV.9: état de charge et la tension de la batterie.....	64
Figure IV.10: Tension du bus contin.	64

Nomenclature

- **SEH** : Système d'énergie hybride.
- **PV** : Photovoltaïque.
- **CC** : Courant continu.
- **CA** : Courant alternatif.
- **MPPT** : Recherche point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).
- **MLI** : Modulation de la largeur d'impulsion.
- **MSAP** : Machine synchrone à aimant permanent.
- **GSAP** : Génératrice synchrone à aimant permanent.
- **C_p** : est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine
- **ρ** : est la masse volumique de l'air.
- **G** : L'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m²).
- **A** : La surface effective des cellules.
- **I_{pv}** : Représente le photo-courant, il dépend de l'irradiation et de la température.
- **I_d** : Courant de polarisation de la jonction PN.
- **I_{mpp}** : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.
- **V_{mpp}** : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale.
- **I_{sc}** : Courant en court-circuit.
- **V_{oc}** : Tension en circuit ouvert
- **G_{Tc} et G** : Représente respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconque
- **T_{STC} et T_c** : Représente respectivement, la température dans les conditions standard de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- **ΔT_C** : Représente la variation de la température.
- **ΔI_{pv}** : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.
- **ΔV_{pv}** : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
- **α_{sc}** : Représente un coefficient d'incrément de courant **I_{sc}** quand la température de surface augmente de un degré Celsius (A/°C) (sous les conditions standard de fonctionnement).
- **β_{oc}** : Représente un coefficient d'incrément de la tension **V_{oc}** quand la température de la surface augmente de un degré Celsius (V/°C) (sous les conditions standard de fonctionnement).

Nomenclature

- **V** : vitesse instantanée du vent (m/s).
- **Ec**: Énergie cinétique du vent en joules.
- **S = $\pi.R^2$** : la surface du l'arbre de turbine en (m^2).
- **Ω_1** : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.
- **ΩM** : Vitesse d près multiplicateur en ($\frac{rad}{s}$).
- **CM**: Couple après multiplicateur (N. m).
- **G** : Gain de multiplication.
- **c_{mec}** ; Le couple électromagnétique développé par la génératrice en (N.m).
- **c_g** : Le couple après le multiplicateur en (N.m).
- **c_{me}** : Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).
- **C_f** : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).
- **$V_{a,b,c}$** : Les tensions de phase de la machine ;
- **$I_{a,b,c}$** : Les courants de phase de la machine ;
- **L** : L'inductance ;
- **R_s** : Résistance de l'enroulement statorique ;
- **$E_{a,b,c}$** : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.
- **V_{ar}, V_{br}, V_{br}** : Tensions de références.
- **V_{dc}** : Tension redressée.
- **idc**: Courant modulé par le redresseur.
- **S_a, S_b, S_c**: Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.
- **C_{bat}** : la capacité (Ah) nominale de la batterie et
- **Q_d** : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : MODELISATION DE SYSTEME HYBRIDE

Tableau(II.1) : Paramètres du panneau photovoltaïque.....25

Chapitre IV : GESTION DU SYSTEME HYBRIDE

Tableau VI.1 : Demande journalière d'énergie pour un foyer isolé à Bejaia.....59

Introduction générale	1
<i>Chapitre I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES D'ENERGIE HYBRIDE</i>	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition des systèmes hybrides	3
I.3 Avantages et inconvénients d'un système hybride	4
I.3.1 Avantages	4
I.3.2 inconvénient	4
I.4 Configuration des systèmes hybrides	4
I.4.1 Architecture à bus continu	4
I.4.2 Architecture à bus alternatif	5
I.5 Généralités sur les systèmes photovoltaïques	6
I.5.1 l'énergie solaire	6
I.5.2 Avantage et inconvénient de l'énergie photovoltaïque	7
I.5.3 La cellule photovoltaïque	7
I.5.3.1 Le principe de fonctionnement	8
I.5.3.2 La caractéristique courant-tension et puissance-tension	8
I.5.4 Le module photovoltaïque	9
I.5.5 Association en série	9
I.5.6 Association en parallèle	10
I.5.7 Association hybride (en série et en parallèle)	10
I.5.8 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques	11
I.5.9 Influence de la température sur les caractéristiques électriques	12
I.6 Généralités sur l'énergie éolienne	13
I.6.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne	14
I.6.2 Puissance récupérée par une turbine	15
I.6.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	16
I.6.4 Machines électriques dans les aérogénérateurs	17
I.6.4.1 Machine synchrone à rotor bobiné	17
I.6.4.2 Machine synchrone à aimants permanents	17
I.6.4.3 Machine asynchrone à cage d'écureuil	17
I.6.4.4 Machine asynchrone à double alimentation	17
I.7 Le système de stockage	18
I.8 Les batteries	18
I.8.1 Descriptions générales	18
1.9 Les convertisseurs statiques	20

I.10 Commande des SEH	20
I.11 Stratégie de fonctionnement.....	20
I.12 Conclusion	21

Chapitre II : MODELISATION DE SYSTEME HYBRIDE

II.1 Introduction	22
II.2 Modélisation de la chaine de production photovoltaïque.....	22
II.2.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	22
II.2.2 Convertisseur survolteur (Boost converter).....	25
II.2.2.1 Modèle mathématique du convertisseur Boost.....	26
II.2.3 Caractéristiques des panneaux.....	27
II.2.4 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV	28
II.3 Modélisation du Système de Conversion d'Énergie Eolienne.....	30
II.3.1 Le vent	30
II.3.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	31
II.3.2.1 Loi de Betz	32
II.3.2.2 Coefficient de puissance	33
II.4 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne.....	33
II.4.1 Action du vent sur les pales	34
II.4.2 La turbine.....	35
II.4.3 Le multiplicateur de vitesse	36
II.4.4 Arbre de transmission	36
II.4.5 Maximisation de puissance	37
II.4.6 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	37
II.4.7 Modélisation du redresseur	39
II.5 Modélisation du bus continu	40
II.6 Modélisation de la batterie	41
II.7 Modélisation et dimensionnement du convertisseur DC-DC côté unité de stockage	42
II.8 Conclusion.....	42

CHAPITRE III : OPTIMISATION DU SYSTEME HYBRIDE

III.1 Introduction	44
III.2 Commande du générateur photovoltaïque.....	44
III.2.1 Méthode « Perturbation et Observation »	44
III.2.3 Résultats de simulation.....	45
III.3 Optimisation de la chaîne de conversion éolienne :.....	47
III.3.1 Maximisation de puissance avec la connaissance de la courbe caractéristique	47
III.4 Commande de la chaîne de conversion éolienne.....	49
III.4.1 Commande vectorielle	49
III.4.2 Simulation du fonctionnement de générateur éolien avec l’algorithme MPPT classique.....	50
III.5 Structure de Système hybride global.....	56
III.6 Conclusion	56

CHAPITRE IV : GESTION ET DU SYSTEME HYBRIDE

IV.1 Introduction.....	58
IV.2 Détermination du profil de charge	58
IV.3 Stratégie de fonctionnement du système hybride	60
IV.4 Simulation et résultats numériques.....	61
IV.4.1 Résultats de simulation	62
IV.4.2 Interprétation de résultats.....	65
IV.5 Conclusion	66
Conclusion générale.....	67

Introduction générale

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont autant de ressources naturelles utilisables pour générer de l'énergie électrique, grâce aux différentes technologies que l'on peut regrouper par filières économiques en fonction de la ressource considérée. Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre de l'atmosphère lors de leur exploitation. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables. [1]

Les nouvelles solutionstechnologiques, apportées par les systèmes hybrides à énergies renouvelables, même si elles ne sont pas encore de point de vue économique compétitives, offrent par contre une sûreté élevée. Toutefois, à la vue de la nécessité du développement durable, ces solutions, avec l'appui de la volonté publique, peuvent être économiquement viables, à moyen et long terme.

En revanche, la nouvelle solution technique proposée par le générateur hybride, même si on la compare à la solution monoposte actuelle, est très compliquée, sa flexibilité, sa flexibilité opérationnelle et son prix de revient attractif ont également retenu une grande attention. Cependant, ces solutions nécessitent d'abord une compréhension approfondie des énergies renouvelables du site d'installation au propriétaire, une gestion stricte de la puissance produite en aval et la seule expérience en ingénierie des systèmes énergétiques qui peut être apportée. Une gestion énergétique stricte repose sur l'intelligence des équipements de régulation et de contrôle fournis par un logiciel performant.[2]

Dans ce contexte, le travail de mémoire présenté dans ce mémoire est une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelable dans un SEH. Notre travail est partagé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous donnons une description générale du système d'énergie hybride composé d'un générateur photovoltaïque, une éolienne, des batteries de stockage.

Introduction Générale

- Le deuxième chapitre est consacré au programme du système énergétique hybride étudié, et chaque composant est représenté par son modèle mathématique.
- Le chapitre 3, consacré au contrôle du sous-système composé de SEH étudié, mais les sources étudiées au cours de son fonctionnement ne donnent pas beaucoup d'énergie. Les algorithmes doivent être utilisés dans les sous-générateurs SEH afin d'atteindre le grand point de puissance.
- Dans le quatrième chapitre, nous offrons la gestion et la simulation numérique de SEH pour nourrir une maison isolée.
Nous avons conçu l'algorithme de gestion, et ce dernier détermine l'adaptabilité de l'énergie globale Obligatoire.

En conclusion générale, nous faisons une synthèse du travail présenté, ainsi que des perspectives futures.

I.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelables apportent aujourd'hui une nouvelle dimension à notre société avec des défis technologiques, économiques et sociologiques. En particulier, la production d'énergie thermique et électrique à partir de ces sources fait aujourd'hui l'objet de nombreuses initiatives, tant au niveau de la recherche que des acteurs industriels et alimentaires, avec une forte demande sur le marché du travail.

En outre, ils servent à répondre à la demande mondiale d'énergie, qui augmente de plus en plus en raison des activités industrielles dans les pays développés, et les investissements des entreprises dans des régions qui garantissent des coûts de production inférieurs ont augmenté très rapidement la demande mondiale d'énergie. [3]

En vue d'une meilleure maîtrise de ces énergies, les systèmes électriques hybrides présentent un atout intéressant. Ces systèmes permettent de diversifier les sources afin de bénéficier de chacune d'entre elles. Bien entendu, une stratégie de contrôle appropriée doit être mise en œuvre afin de gérer efficacement l'énergie [03].

I.2 Définition des systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques [04], .

Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant continu, un système de distribution à courant alternatif, un système de stockage, des convertisseurs, des charges et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures (voir figure (I.1 et I.2)). Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus continu ou alternatif en fonction de la dimension du système [05].

La puissance délivrée par les systèmes hybrides peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petits villages. Ainsi, les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à courant continu. Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100kW, connectés sur le bus à courant alternatif, sont conçus pour être connectés aux grands réseaux interconnectés [06].

I.3 Avantages et inconvénients d'un système hybride

I.3.1 Avantages

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.
- Rentabilité, faible coût lié au cycle de vie des composants du système hybride.

I.3.2 inconvénient

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage dans la majorité des cas.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel.

I.4 Configuration des systèmes hybrides

Les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [07].

I.4.1 Architecture à bus continu

Dans le système hybride présenté dans la figure (I.1), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries sont dimensionnées pour alimenter des pics de charge. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande [07].

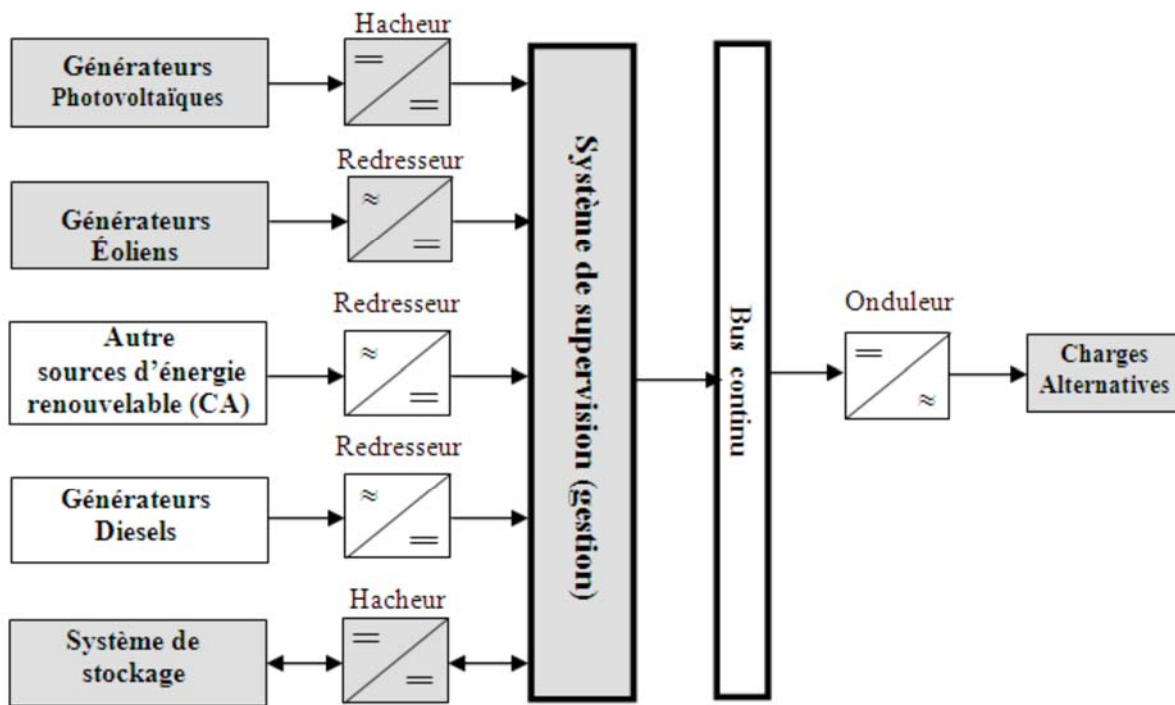


Figure I.1: Configuration du système hybride à bus continu.

I.4.2 Architecture à bus alternatif

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.2). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. Dans le cas d'une faible demande de charge, tous les générateurs et les systèmes de stockages sont à l'arrêt sauf par exemple le générateur photovoltaïque, pour couvrir la demande de la charge.

Cependant, pendant les fortes demandes de charge ou les heures de pointes les générateurs et les unités de stockage fonctionnent en parallèle pour couvrir la demande de la charge.

La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [08]. La configuration adaptée dans notre travail est celle à bus continu.

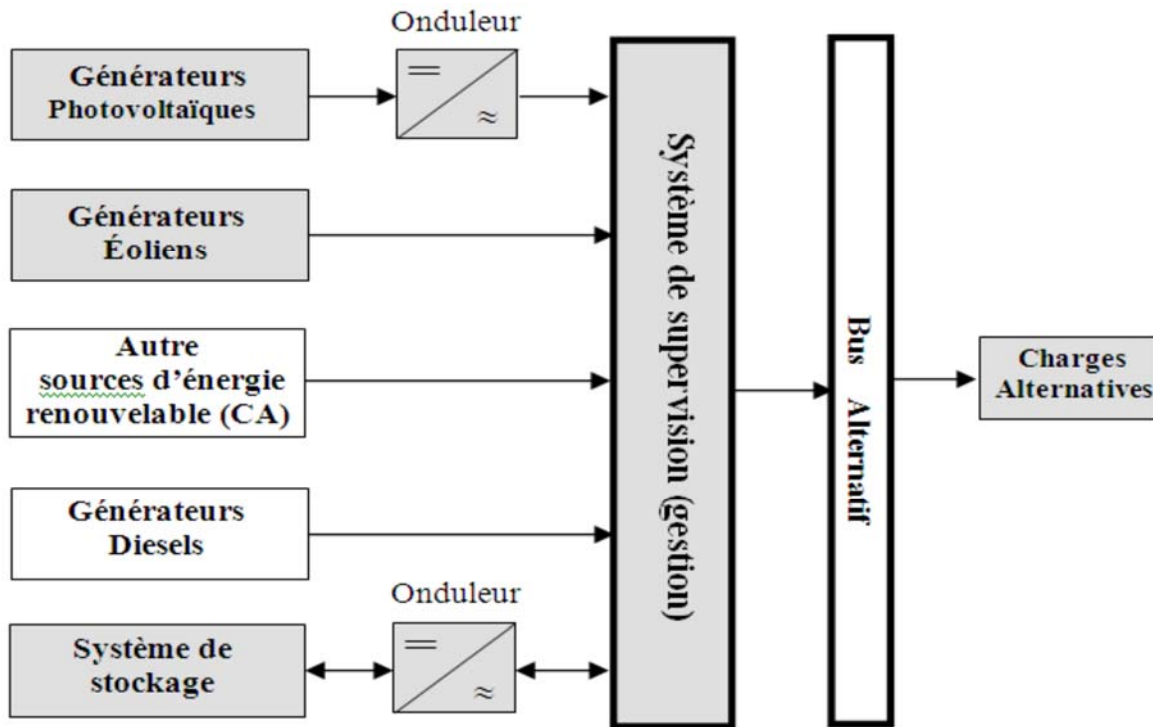


Figure I.2 : Configuration du système hybride à bus alternatif

I.5 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.5.1 l'énergie solaire

La première énergie disponible en grande quantité sur la surface terrestre est l'énergie solaire, caractérisée par l'ensoleillement qui donne l'énergie fournie par le soleil par unité de surface sur une période donnée, en J/m^2 , et par l'irradiation solaire qui correspond à la puissance à un instant donné, en W/m^2 [08].

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 ($h\nu$). 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 [08].

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.5.2 Avantage et inconvénient de l'énergie photovoltaïque [09]

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- **Les avantages**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

- **Les inconvénients**

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

I.5.3 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs. [10]

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Le schéma d'une cellule solaire peut se présenter sous diverses variantes. La configuration la plus usuelle est la suivante.

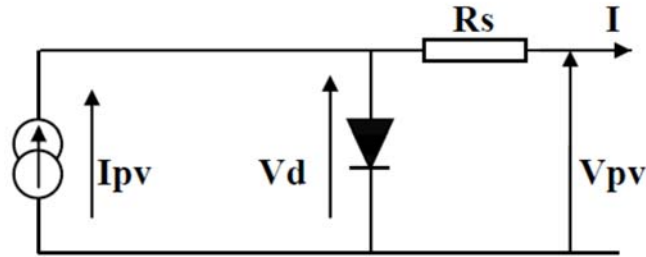


Figure I.3: Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [10]

I.5.3.1 Le principe de fonctionnement [10]

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques.

Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes, comme nous montre la figure ci-dessous :

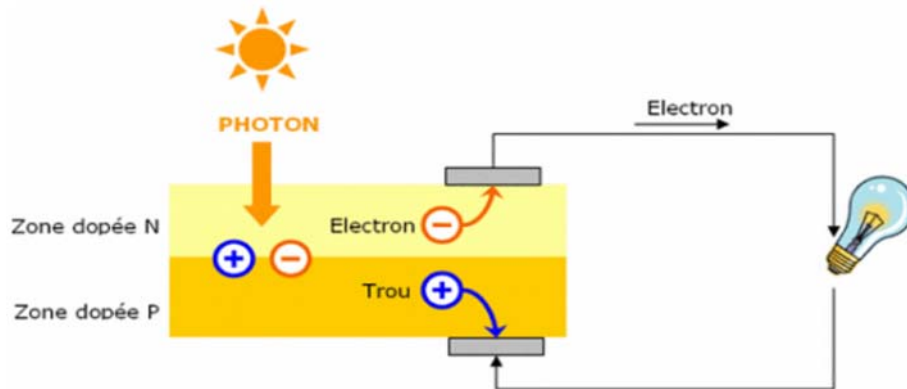


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.5.3.2 La caractéristique courant-tension et puissance-tension

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standards de fonctionnement à ensoleillement $G = 1000\text{W/m}^2$ et à température $T = 25^\circ\text{C}$.

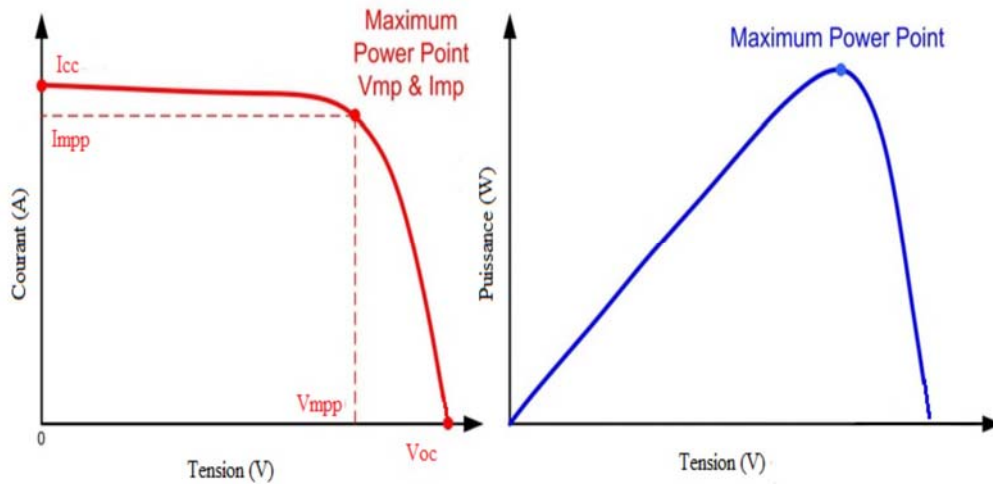


Figure I.5 : caractéristique I(V) et P(V).

I.5.4 Le module photovoltaïque

Afin d’augmenter la tension d’utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque[11].

Les modules peuvent également être connectés en parallèle afin d’augmenter l’intensité d’utilisation.

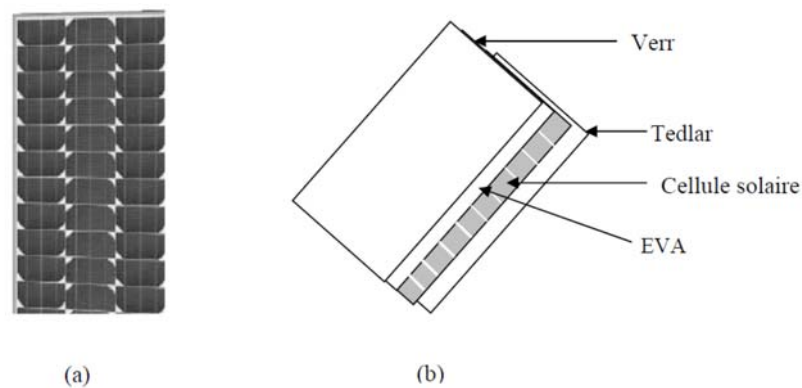


Figure I.6 : Module photovoltaïque

I.5.5 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

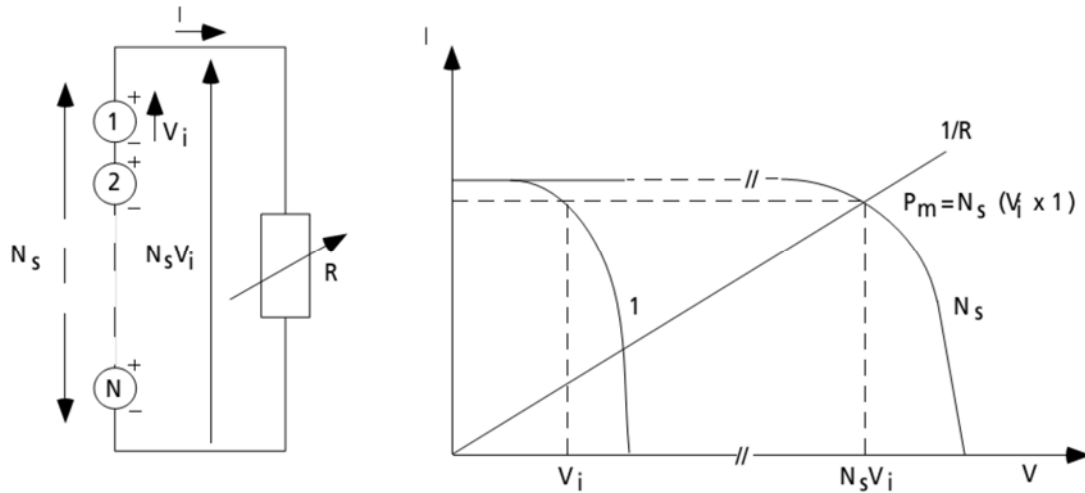


Figure I.7 : Cellules identiques en série

I.5.6 Association en parallèle

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

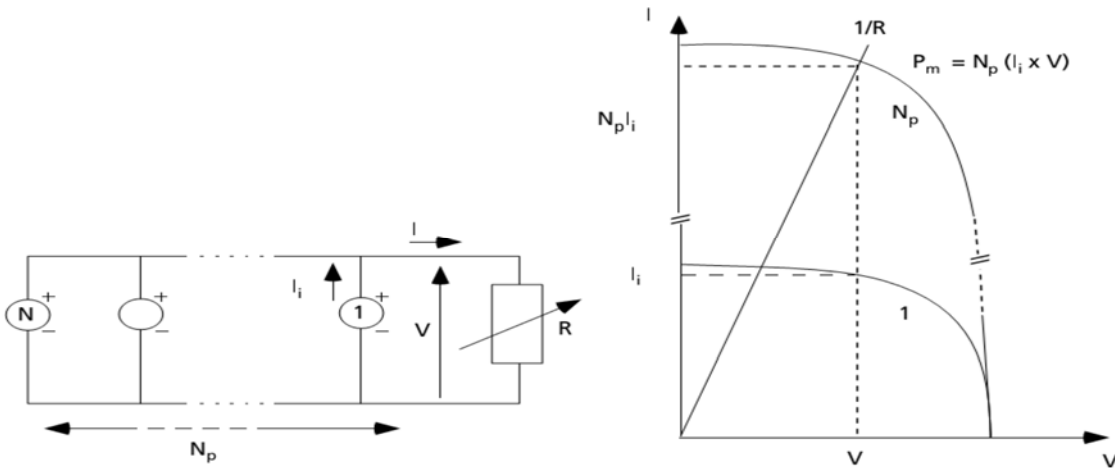


Figure I.8 : Cellules identiques en parallèle.

I.5.7 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc}$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc}$$

Avec : (n_p) nombre des cellule en parallèle, (n_s) nombre des cellule en série.

La figure (I.9) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

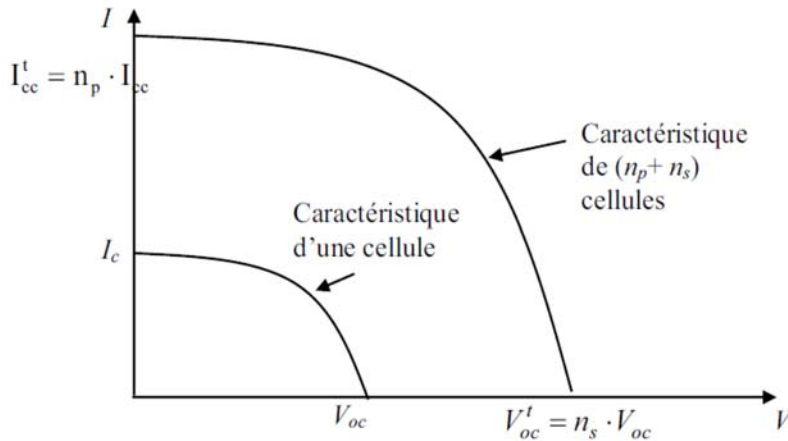


Figure I.9 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques.

I.5.8 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques

La figure suivante présente un exemple des courbes pour différents niveaux de l'éclairement [10].

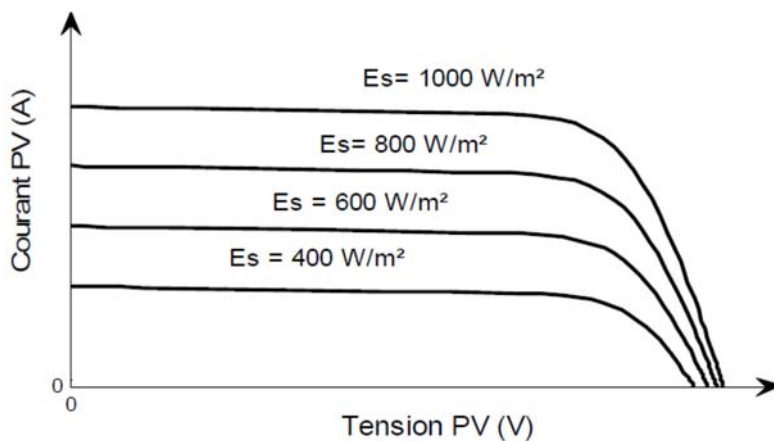


Figure I.10 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité de l'éclairement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

La figure (I.11) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ [11].

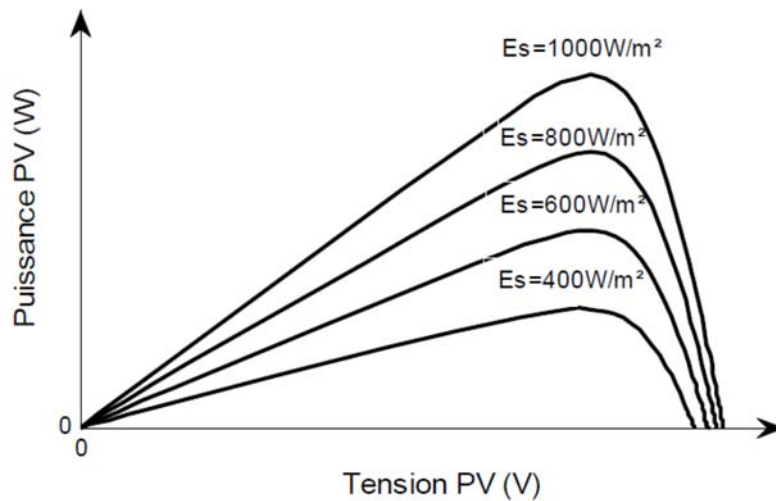


Figure I.11 : Caractéristique P(V) pour différents éclairements.

I.5.9 Influence de la température sur les caractéristiques électriques

La figure (I.12) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement d'un module photovoltaïque.

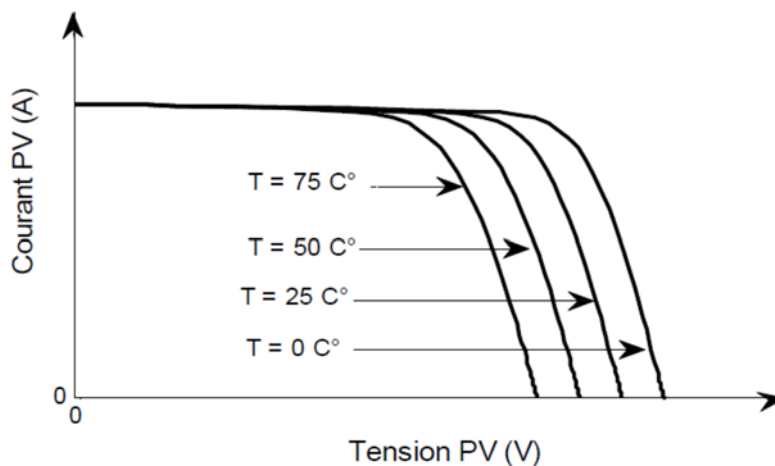


Figure I.12 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

La figure (I.13) illustre la variation de la puissance délivrée par un module photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

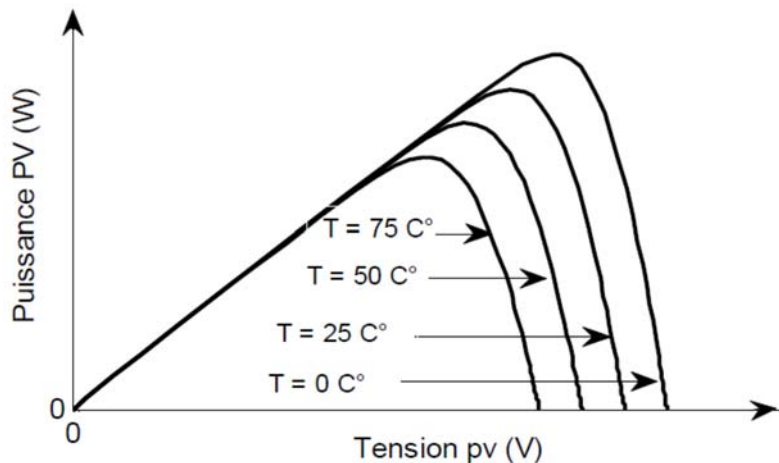


Figure I.13 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

I.6 Généralités sur l'énergie éolienne

L'énergie éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [12]. L'évolution de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir ces dernières années une alternative aux sources traditionnelles. Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique.

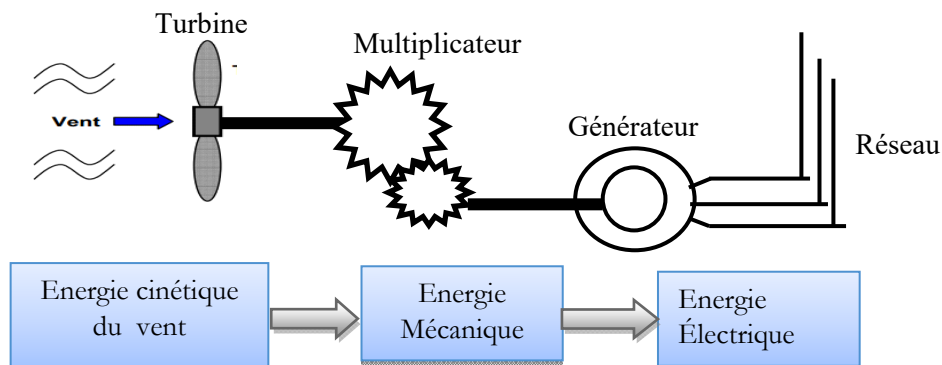


Figure I.14 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Les avantages de l'énergie éolienne les plus importants sont :

- C'est une énergie renouvelable, gratuite et abondante.
- Elle est fiable et rentable.
- Elle n'est pas une énergie à risque.
- C'est une énergie qui n'est pas chère.

- L'installation de parc éolienne est relativement simple et son démontage ne laisse pas de trace.

En contrepartie l'énergie éolienne présente quelques inconvénients à citer : [13]

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- Le coût de l'énergie éolienne plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

Les générateurs éoliens peuvent être regroupés selon différentes catégories. Ces dernières peuvent se croiser et ils peuvent être classés selon [14].

- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, machine à courant continu...);
- Le mode de régulation (pitch ou stalle régulation);
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou à attaque directe);
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable);
- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).

I.6.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé « éolienne », est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique [15].

D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome. Un schéma synoptique est présenté dans la figure (I.15) :

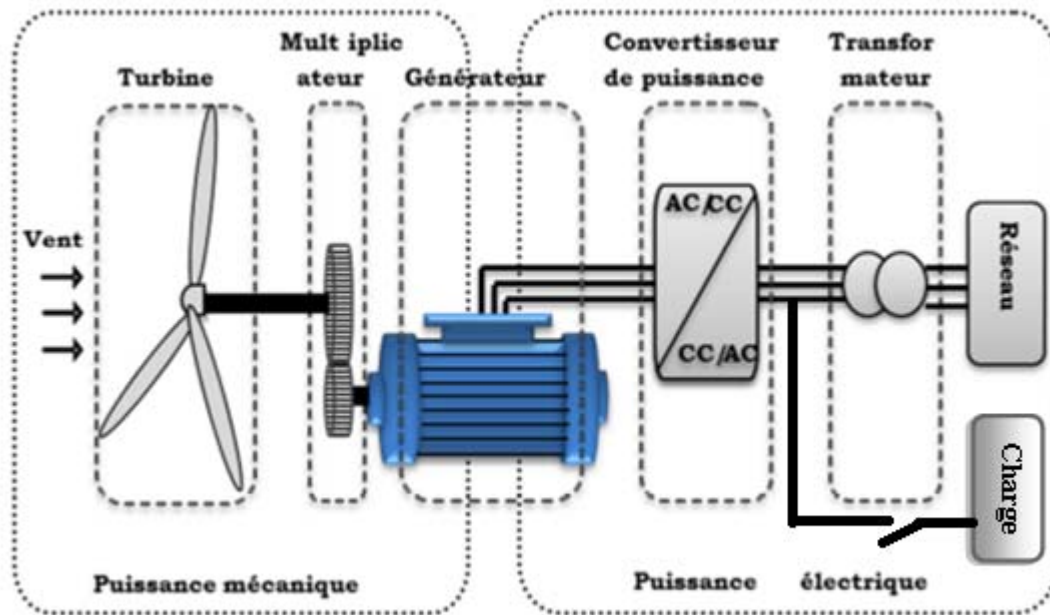


Figure I.15 : principaux organes du système de conversion éolien [15].

I.6.2 Puissance récupérée par une turbine

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_p^2 \cdot V_v^3 \quad (I.1)$$

C_p : Est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine $C_p(\lambda)$ c'est la caractéristique propre de la turbine).

ρ : Est la masse volumique de l'air.

S : La surface balayée par la turbine.

V_v : La vitesse du vent.

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Elle peut avantageusement s'exprimer en fonction de λ .

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_{vent}} \quad (I.2)$$

La figure (I.16) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal pour différents types d'éoliennes [16]. On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse spécifique λ_{opt} qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera

en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.

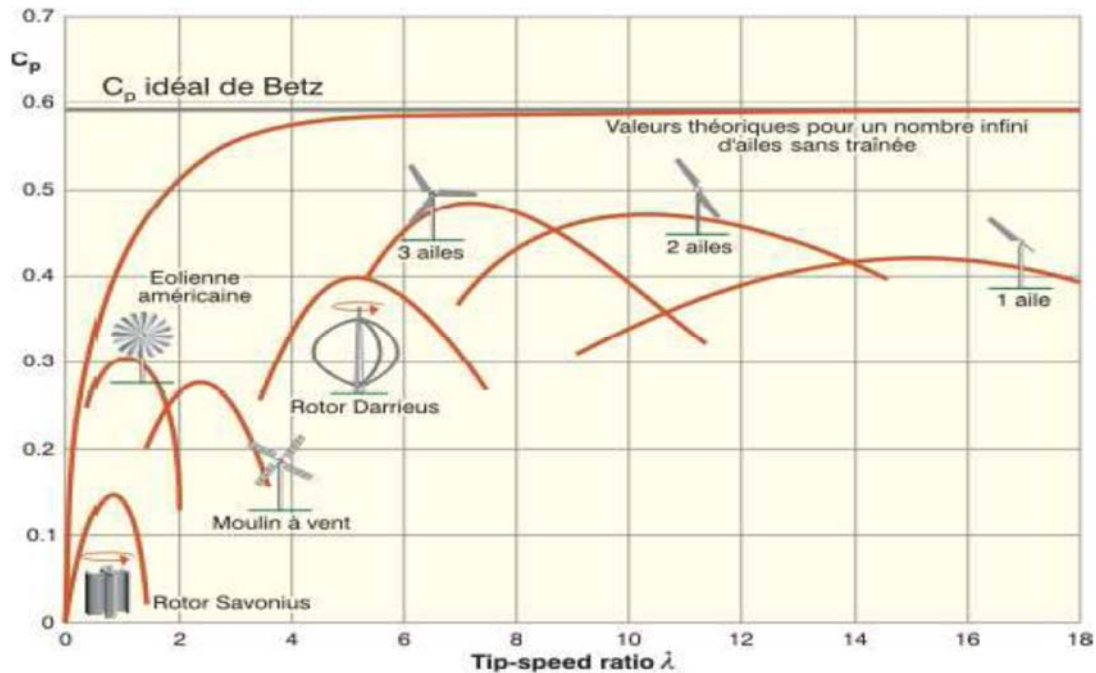


Figure I.16 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [16].

I.6.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_m qui pourrait endommager la turbine.

On peut définir quatre zones de fonctionnement [16]:

- **la zone I :** le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- **la zone II :** la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- **la zone III :** la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n
- **la zone IV :** dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

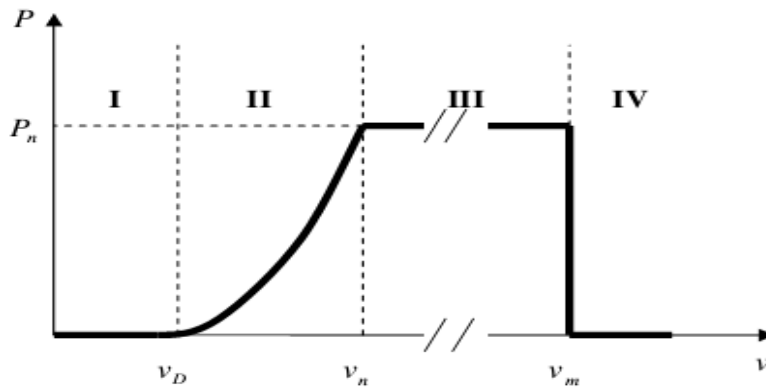


Figure I.17 : Caractéristique puissance-vitesse de vent d'une éolienne [13]

I.6.4 Machines électriques dans les aérogénérateurs

I.6.4.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [17].

I.6.4.2 Machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones.

I.6.4.3 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence [19].

Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice [19].

I.6.4.4 Machine asynchrone à double alimentation

Avec les machines synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse [20].

I.7 Le système de stockage

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

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau et les volants d'inertie. Dans le cas de stockage par pompage de l'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie . Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasinier l'énergie en mettant en rotation une masse importante [20]. L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur.

I.8 Les batteries

Une batterie ou un accumulateur électrochimique est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique d'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie [21].

I.8.1 Descriptions générales

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 désoxydation et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) 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 [22].

Le schéma de principe d'une cellule électrochimique est le suivant:

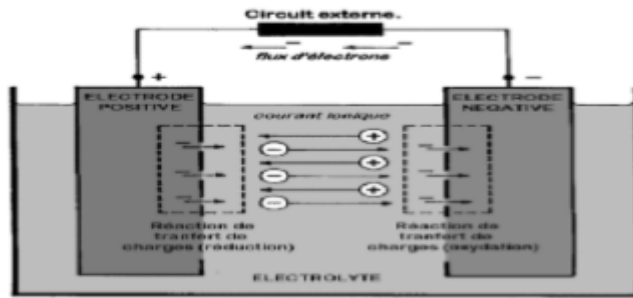


Figure I.18 : Cellule électrochimique de base.

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 le positif est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens. Les cellules sont assemblées en série lorsque l'on désire disposer d'une tension plus grande que celle d'une seule cellule, et en parallèle bien que cette configuration soit beaucoup moins courante lorsque le courant requis dépasse la capacité d'une seule cellule



Figure I.19: Connexion des cellules en série (gauche) ou en parallèle (droite).

Les propriétés électriques suivantes sont généralement employées pour caractériser une cellule [22] :

- sa capacité
- sa tension
- la charge et le courant maximum qu'elle peut supporter
- la conservation de la charge (donc son auto-décharge)
- sa durée de vie, en nombre de cycles ou en années.

Une bonne connaissance de ces grandeurs est importante afin d'assigner à chaque type de batterie une application qui lui convient. Donc les type de batteries sont :

- Batterie plomb acide ;
- Batterie nickel cadmium ;

- Batterie sodium chlorure de nickel ;
- Batterie lithium-ion ;
- Batterie zinc air ;

1.9 Les convertisseurs statiques

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

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs réalisent la conversion CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner.

Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.[24]

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

I.10 Commande des SEH

Le problème principal dans la commande de SEH est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables. Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SEH [25] :

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

I.11 Stratégie de fonctionnement

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [25]. Le fonctionnement d'un SEH dépend des paramètres suivants :

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

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description des diverses énergies renouvelables, systèmes de stockage et hybrides. Après cette description, on a opté pour une chaîne hybride composée de deux chaînes de conversion d'énergie éolienne et photovoltaïque avec batteries de stockage.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons le caractère distinctif des différentes composantes du système hybride choisi (figure II.1) à travers lequel les équations qui les exécutent seront données et les paramètres qui affectent leurs caractéristiques pour ce choix (matlab -simulink) et les programmes de simulation seront donnés .

La modélisation obtenue doit être précise et rapide pour le calcul de ces transferts d'énergie, ce qui permet aux simulations sur de longues périodes de faire des calculs raisonnables et logiques.

L'objectif est d'avoir des modèles (fiables) confirmés pour mener l'étude dans le but d'améliorer la mise à l'échelle et la gestion de l'énergie de l'ensemble du système.

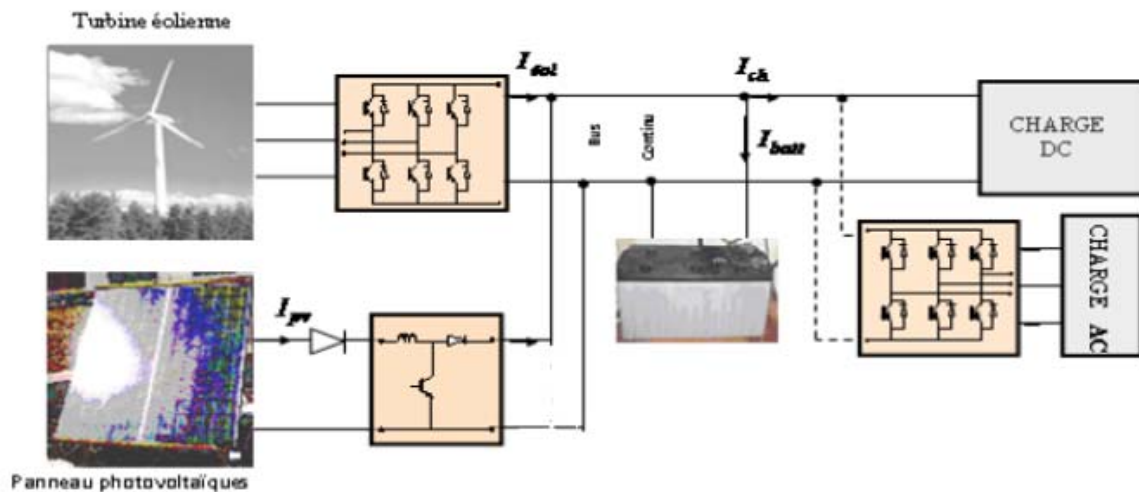


Figure II.1: Structure de la chaîne hybride étudiée.

II.2 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

II.2.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la performance des générateurs PV sont basées sur les caractéristiques courant-tension et puissance. Dans la littérature on trouve de nombreux modèles mathématiques pour représenter le comportement fortement non linéaire d'une cellule photovoltaïque .

Parmi ces modèles on trouve:

- **Le modèle idéalisé:** c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant

généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est supposé être nul ($R_s = 0$).

- **Le modèle à une diode** : pour tenir compte des chutes de tension dans les zone P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_{sh} .
- **Le modèle à deux diodes** : une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons. [32]

Pour trouver le modèle de cellule photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent.

La littérature offre de nombreux modèles avec différentes configurations dépendant du besoin d'utilisation. Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle à une seule diode.

Le schéma équivalent d'une cellule PV est montré dans la figure I.16 Le modèle considéré est constitué d'un générateur de courant continu I_{ph} qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique avec une diode parallèle modélisant la jonction P-N, d'une seule diode D et de deux résistances R_p et R_s caractérisant respectivement les courants de fuite de la jonction et les diverses résistances des contacts de connexion.

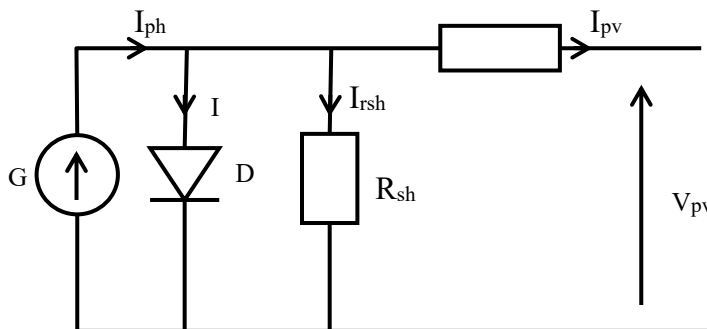


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.[26]

Le courant I_{pv} est donné par

D'après la figure (II.2), le courant I_{pv} du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement, est donné par l'équation (II.1) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (II.1)$$

L'expression(II.1) s'écrit aussi de cette manière:[27]

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot [1 - K_1 \cdot (e^{K_2 \cdot V_{pv}^m} - 1)] \quad (II.2)$$

Dans cette équation, le courant I_{pv} dépend des paramètres K_1 , K_2 , met de la tension aux bornes du générateur PV.[27]

Les coefficients K_2 , K_3 et K_4 sont donnés par les équations suivantes :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (II.3)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc} \cdot (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}} \right] \quad (II.4)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \quad (II.5)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.6)$$

Tel que :

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

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelée aussi tension optimale.

I_{cc} : Courant de court circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.2) est applicable que pour un niveau d'ensoleillement G_{STC} et de température particulière ($G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2, T_{STC} = 25 \text{ °C}$). Relatifs aux conditions standards de fonctionnement (STC). Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_c - T_{STC} \quad (II.7)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{STC}} - 1 \right) \cdot I_{cc,STC} \quad (II.8)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (II.9)$$

Avec :

G_{STC} et G : Représentent respectivement, l'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

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

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

β_{oc} : Coefficient d'incrémentation de la tension quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnements).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par

$$V_{pv,nouv} = V_{pv,STC} + \Delta V_{pv} \quad (II.10)$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv,STC} + \Delta I_{pv} \quad (II.11)$$

Les paramètres (($I_{cc}, I_{mpp}, V_{co}, V_{mpp}$) du module sous les conditions standard de fonctionnement c'est-à-dire ($G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2, T_{STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) sont fournis par le constructeur de panneaux photovoltaïques.

Chaque groupe de panneau est une association série-parallèle de N_s, N_p cellule élémentaires. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons un GPV, selon les besoins des applications visées.

Le constructeur de panneaux photovoltaïques fournit les paramètres du panneau ($I_{sc}, I_{mpp}, V_{oc}, V_{mpp}$) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C , AM 1.5). Le tableau (II.1) montre les données d'un panneau solaire de **SIEMENS PV SM110**, qui sont utilisées pour la simulation du panneau photovoltaïque.

Tableau (II. 1) : Paramètres du panneau photovoltaïque .

Paramètres	valeurs
Puissance maximale du panneau P_m	110 W
Courant au point de puissance maximale I_{mp}	2.72 A
Tension au point de puissance maximale V_{mp}	40.6 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.15A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	52.5 V

Pour valider ce modèle nous l'avons simulé en utilisant le modèle mathématique déjà décrit et les paramètres du tableau (II.1).

II.2.2 Convertisseur survolteur (Boostconverter)

Le convertisseur survolteur a pour rôle principal de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Il est aussi appelé convertisseur élévateur de tension ou hacheur parallèle. Son circuit idéal est donné par la figure (II . 3). [9]

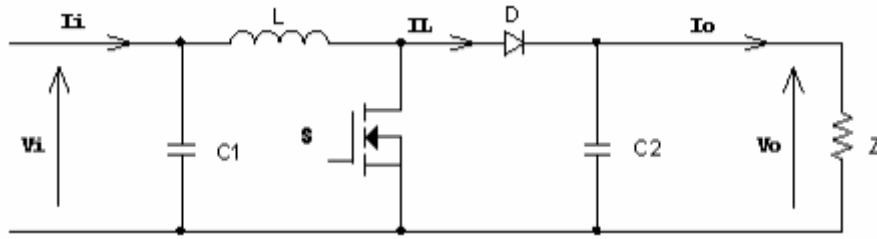


Figure II.3 :Circuit électrique du convertisseur Boost.

Au premier temps DT_s , le transistor S est fermé et la diode D est ouvert , le courant traversant l’inductance L croit progressivement, et au fur et mesure elle emmagasine de l’énergie, au même temps le condensateur C fournit de l’énergie à la charge Z jusqu’à la fin de la première période. Ensuite, le transistor S s’ouvre et la diode D est fermé l’inductance L s’opposant à la diminution de courant I_L et l’énergie emmagasinée dans l’inductance L est restituée au condensateur et à la charge Z , donc L génère une tension qui s’ajoute à la tension de source, qui s’applique sur la charge Z à travers la diode D . [08]

II.2.2.1 Modèle mathématique du convertisseur Boost

La figure (II.4) montre les deux schémas équivalents du convertisseur Boost pour les deux périodes de fonctionnement.

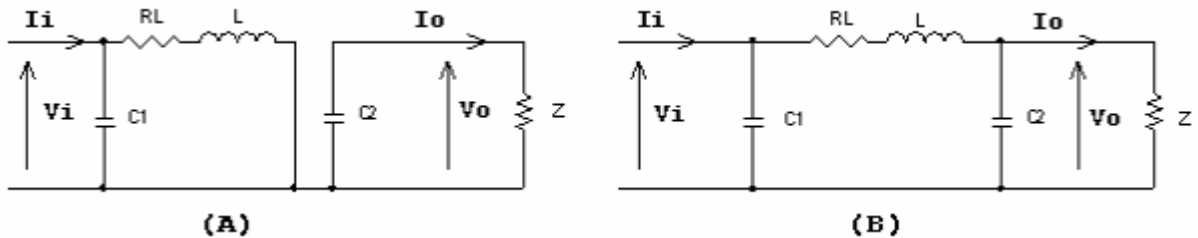


Figure II.4: Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé et (B) : S ouvert

Comme pour les circuits précédents, l’application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - R_L i_L(t) \end{cases} \quad 0 < t < DT_s \quad (II.12)$$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_0(t) - R_L i_L(t) \end{cases} \quad DT_s \ll T_s \quad (II.13)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt} \Big|_{t \in [0, DT_s]} \cdot DT_s + \frac{dx}{dt} \Big|_{t \in [DT_s, T_s]} \cdot (1-D)T_s \quad (II.14)$$

En appliquant la relation (II.41) sur le système d'équation (II.12) et (II.13), on trouve :

$$\begin{cases} c_1 \frac{dv_i}{dt} T_s = DT_s (i_i - i_L) + (1-D)T_s (i_i - i_L) \\ c_2 \frac{dv_0}{dt} T_s = -DT_s i_0 + (1-D)T_s (i_L - i_0) \\ L \frac{di_L}{dt} T_s = DT_s (v_i - R_L i_L) + (1-D)T_s (v_i - v_0 - R_L i_L) \end{cases} \quad (II.15)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost :

$$\begin{cases} i_L = i_i - c_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_0 = (1-D)i_L - c_2 \frac{dv_0}{dt} \\ v_i = (1-D)v_0 + R_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (II.16)$$

D:raport cyclique

II.2.3 Caractéristiques des panneaux

La figures (II.5) donnent les caractéristiques (I-V_{pv}) et (P-V_{pv}) pour les conditions climatiques standar (G=1000W/m² et T=25°C).

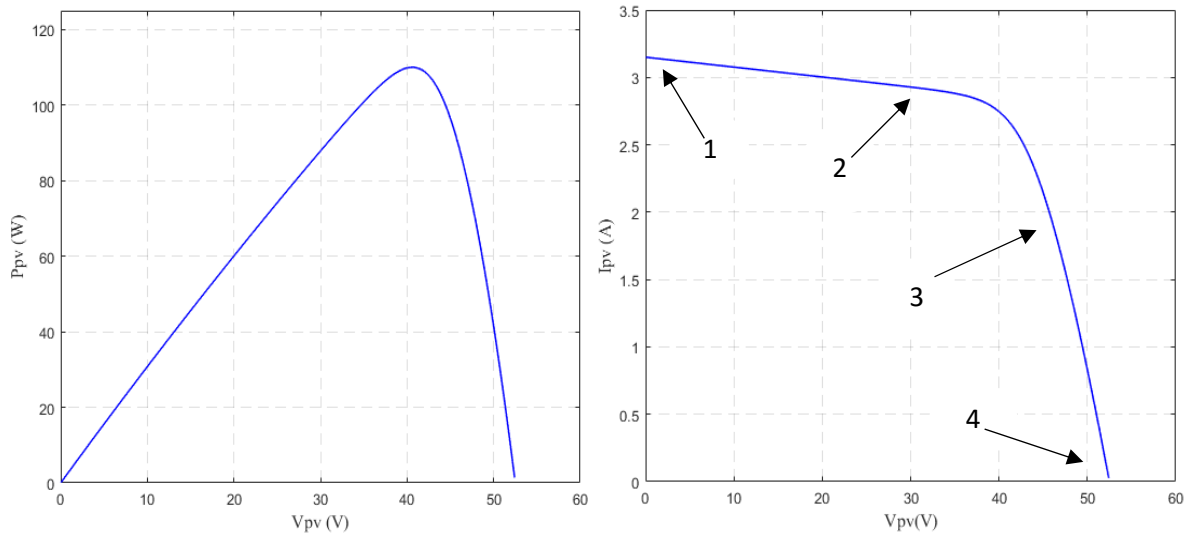


Figure II.5 : Caractéristique $P_{pv}(v_{pv})$ et $I_{pv}(v_{pv})$ dans les conditions standards.

On remarque d'après La caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

La zone (1-2) : ou le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone (2-3) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractéristique par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone (3-4) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension[27].

II.2.4 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

❖ Influence de l'irradiation :

La figure (II.6) représente les caractéristiques (P-V) et (I-V) pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante :

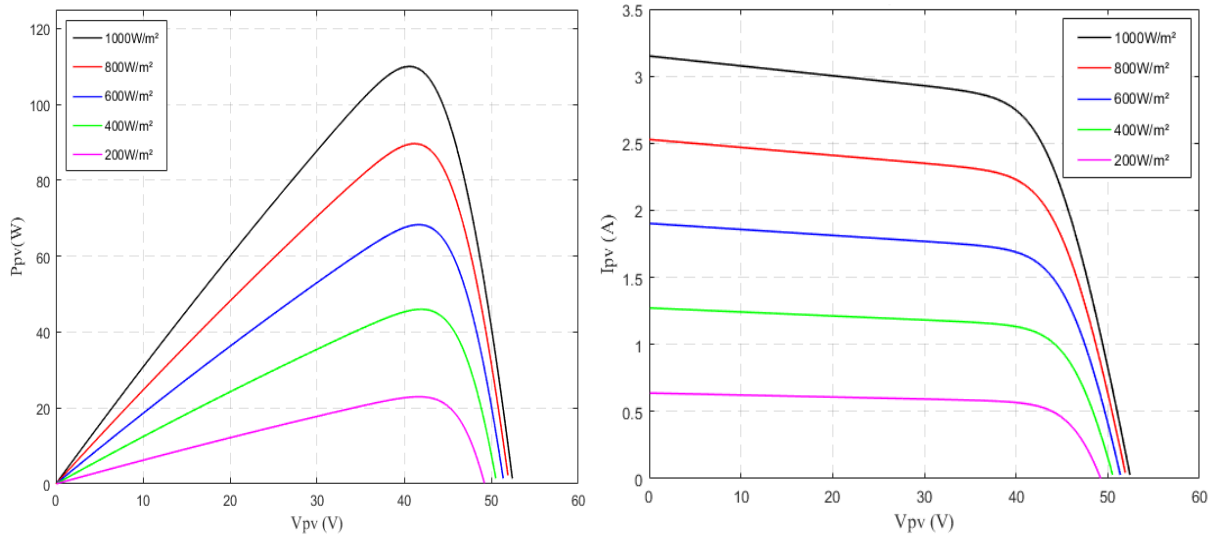


Figure II.6 : Caractéristique $P_{pv}(V_p v)$ et $I_{pv}(V_p v)$ pour différents éclairciment.

On remarque que la variation de l'éclairciment influe visiblement sur le courant de court circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM proportionnellement a l'éclairciment.

❖ Influence de la température Tc

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. La figure (I.7) donne l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairciment constant.

On remarque, que lorsque la température augmente, le courant photogénéré augmente très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

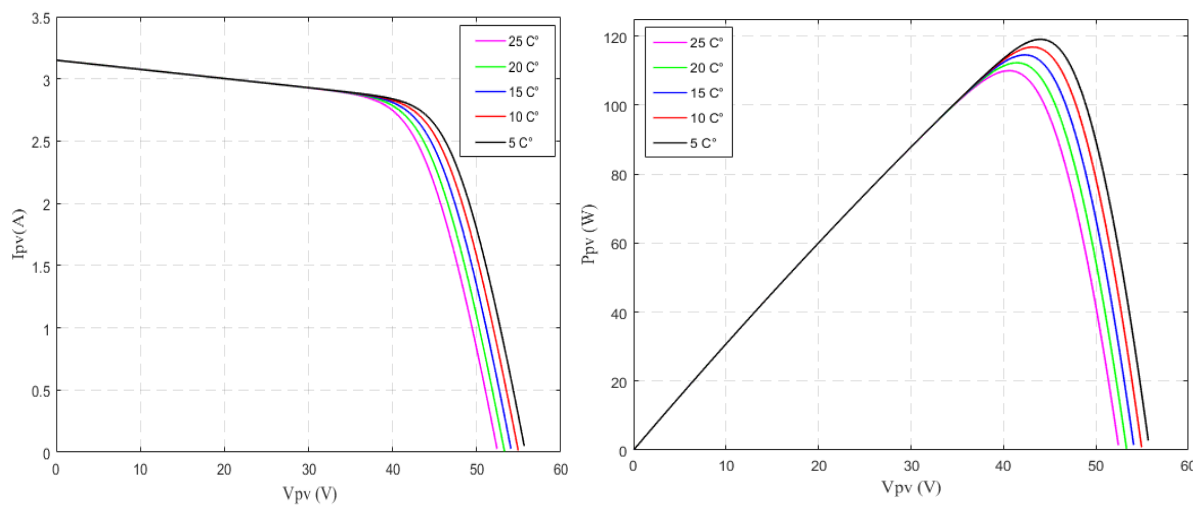


Figure II.7: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_p v)$ pour différents températures.

II.3 Modélisation du Système de Conversion d'Énergie Éolienne

L'aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique est alors utilisée pour faire tourner un générateur électrique et produit de l'électricité. Pour l'emploi efficace de cette ressource (le vent) il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée et le vent lui-même [28].

II.3.1 Le vent

L'énergie cinétique du vent est l'élément primaire et fondamental du système de conversion d'énergie éolienne. Le vent est un champ de déplacement de masses d'air caractérisé par une vitesse variable et une direction aléatoire. Son déplacement au niveau de la turbine éolienne crée des forces sur les surfaces de ses pales, qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif [29].

La vitesse du vent en un point de l'espace $V(t)$ est la résultante de deux composantes, l'une

$V_0(t)$ varie lentement [30] et régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné [7], alors que l'autre $V_T(t)$ varie en turbulence en fonction de temps. Son expression est donnée par la formule (II. 17) [30].

$$V_T(t) = V_0(t) + V_T(t) \quad (\text{II.17})$$

L'aér-turbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert (G_f) est donnée par la formule (II. 18):

$$G_f = \frac{1}{1+\tau.s} \quad (\text{II. 18})$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($t=0.11375s$) [31].

Avec : $t = \gamma \cdot (Rt/V_{moy})$.

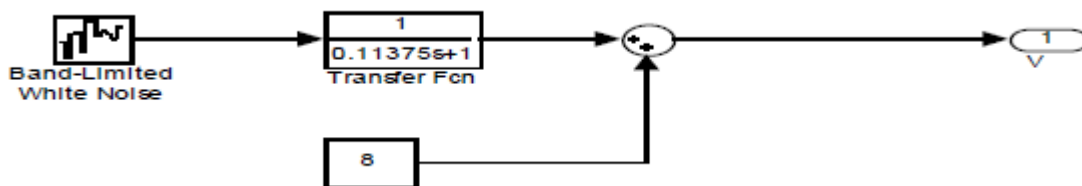


Fig. II.8:schéma Synoptique de reconstruction du vent.

La figure suivante représente une séquence de vent générée par le modèle Simulink de

la Fig.II.9 avec une vitesse moyenne de vent $V_0(t) = 8\text{m/s}$.

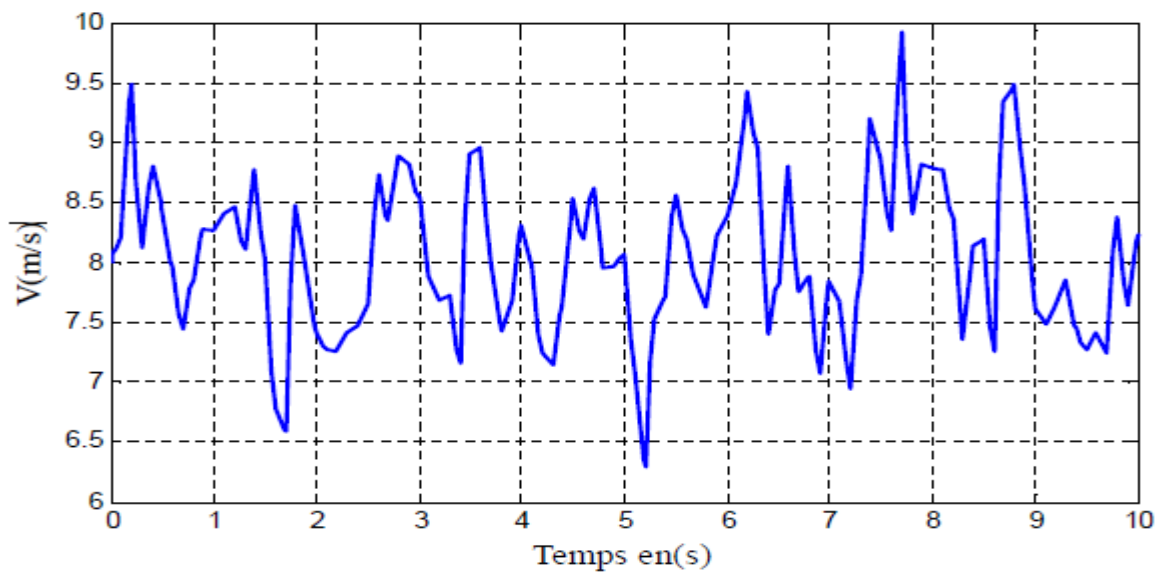


Fig. II.9: profile de vent appliqué.

II.3.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Soit une colonne d'air élémentaire de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse V , (Fig. II.9) s'écrit [31]:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot dx \cdot v^2 \quad (\text{II.19})$$

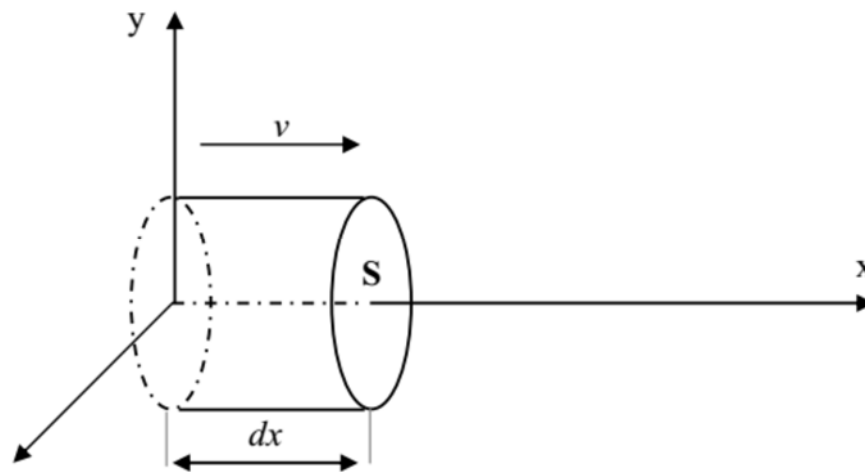


Fig. II.10: Colonne d'air animée d'une vitesse V .

La puissance de vent disponible Pv extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps [30].

En supposant $dx = V \cdot dt$, on déduit l'expression de Pv :

$$Pv = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot V^3 \quad (\text{II.20})$$

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

V : vitesse instantanée du vent (m/s).

E_c : Énergie cinétique du vent en joules.

$S = \pi.R^2$: la surface du l'arbre de turbine en (m^2).

II.3.2.1 Loi de Betz

La formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par l'unité de temps (seconde) [32].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (II.11), sur lequel on représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne v_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor v_2 , soit v_{12} [33].

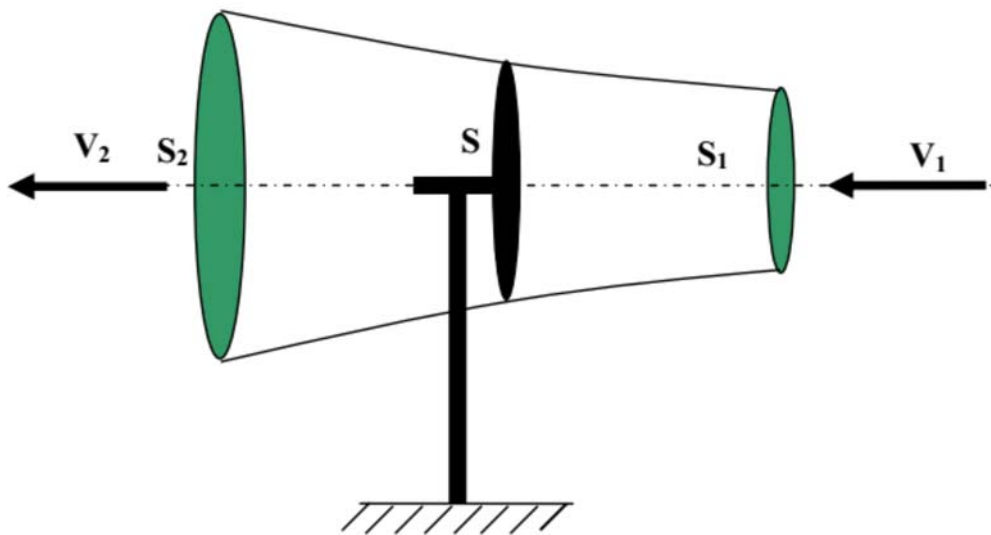


Fig. II.11 : Tube de courant autour d'une éolienne [30].

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [34].

$$m_0 = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.21})$$

La puissance récupérable P_t est la puissance réelle extraite par le rotor des pales qui signifie la différence des puissances du vent en amont et en aval [35].

$$P_t = \frac{m_0 \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.22})$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans (II.22) :

$$P_t = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.23})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de

vitesse de vent en mettant $V_2 = 0$ dans l'expression (II.23) :

$$p_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v_1^3}{2} \quad (\text{II.24})$$

II.3.2.2 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent (récupérable) et la puissance totale théoriquement disponible [36].

$$C_p = \frac{P_T}{p_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.25})$$

Le coefficient de puissance présente un maximum de 0.33 . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant la vitesse relative est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [36].

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V} \quad (\text{II.26})$$

R: Rayon de la surface balayée en m.

Avec : V: Vitesse de vent en m/s.

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

Dans notre travail on utilise cette formule du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ et l'angle de calage β [31]:

$$c_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,167(\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)}\right) - 0,00184(\lambda - 3)(\beta - 2). \quad (\text{II.27})$$

II.4 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne [37]

Dans cette partie, on modélise la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission :

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables.
- Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique autrement dit relie la turbine au générateur.

La figure II.12, ci-dessous représente différents composants de la partie mécanique :

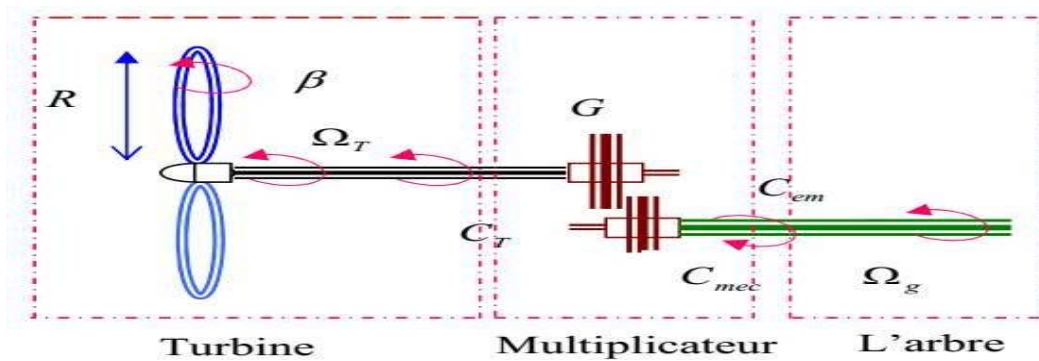


Fig. II.12 : Différents parties mécaniques de l'éolienne.

II.4.1 Action du vent sur les pales

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la Surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Fig. II.13.

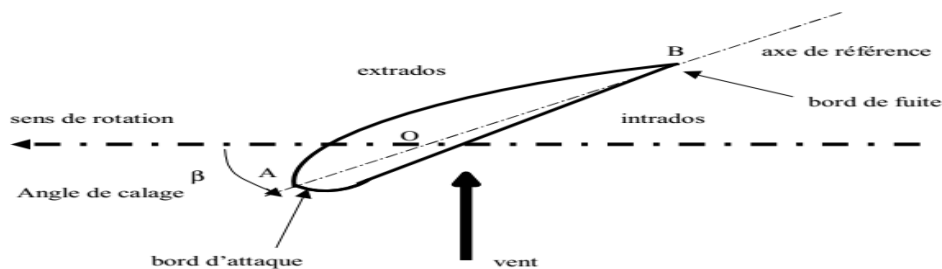


Fig. II.13 : Eléments caractéristiques d'une pale [38].

On remarque plus particulièrement les éléments suivants [39]:

- extrados : dessus de la pale.
- intrados : dessous de la pale.
- corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- angle de calage β : l'angle entre le plan de rotation et la corde du profil [32].

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados

est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes) [39].

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage β ce qui diminue la valeur du facteur de puissance d'où une diminution du

rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur, comme illustrée sur la figure II.14[34] :

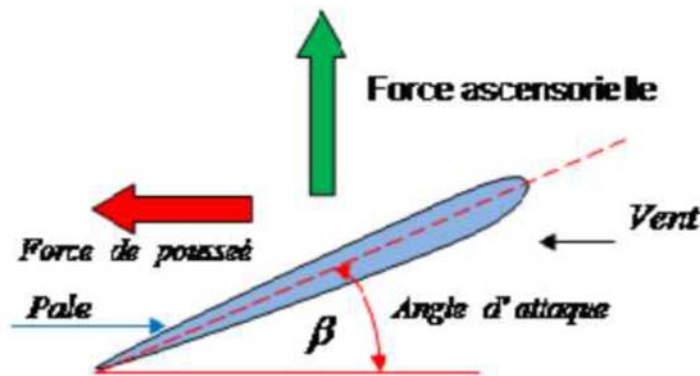


Fig. II.14 : Flux d'air sur un profil de pale.

II.4.2 La turbine

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales qui pivotent sur les axes d'un angle β . Le vent de vitesse V , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine [37].

En combinant les équations (II.24), (II.25), et (II.26), la puissance mécanique P_T disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [37]:

$$P_T = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{II.28})$$

D'où l'expression du couple :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \frac{R \cdot P_T}{\lambda \cdot V} = \frac{C_p}{2 \cdot \lambda} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \quad (\text{II.29})$$

Où :

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

Le coefficient de puissance C représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine [40].

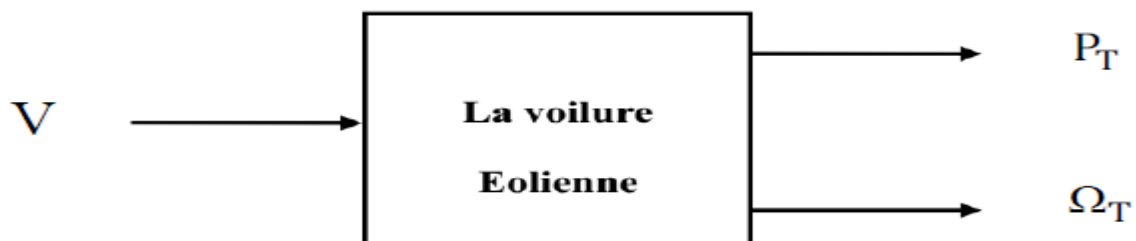


Fig. II.15 : Entrées-sorties du modèle de la turbine.

II.4.3 Le multiplicateur de vitesse

En introduisant le Gain de multiplicateur de vitesse G sur l'équation (II.29) on aura :

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t, \quad \text{et} \quad C_g = \frac{c_T}{G} \quad (\text{II.30})$$

$$\text{Donc : } C_g = \frac{P_T}{\Omega_g} \quad (\text{II.31})$$

$$\text{Ou} \quad \begin{cases} \Omega_M: \text{Vitesse d après multiplicateur en } \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right). \\ C_M: \text{ Couple après multiplicateur (N.m).} \\ G: \text{ Gain de multiplication.} \end{cases}$$

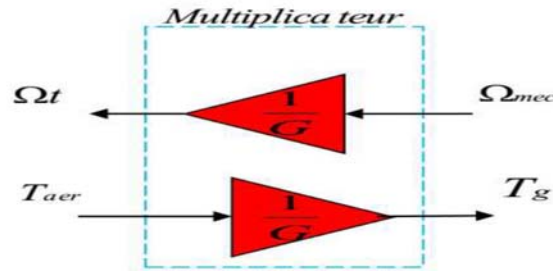


Fig. II.16 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.

II.4.4 Arbre de transmission [39]

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution

de la vitesse à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor [39]:

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = c_{mec} \quad (\text{II.32})$$

Où :

J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$c_{mec} = c_g - C_{em} - c_f \quad (\text{II.33})$$

c_{mec} ; Le couple électromagnétique développé par la génératrice en (N.m).

c_g : Le couple après le multiplicateur en (N.m).

c_{me} : Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

C_f : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).

$$C_f = f \cdot \Omega_g \quad (\text{II.34})$$

On aura :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g = c_g - C_{em} \quad (\text{II.35})$$

Où :

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

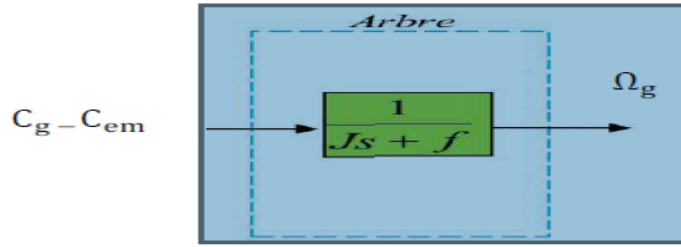


Fig. II.17: Modélisation de l'arbre générateur.

II.4.5 Maximisation de puissance

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en connaissant la caractéristique de la voilure éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent [40].

La courbe spécifique d'une turbine tripale possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale (λ_{opt}) et le coefficient de puissance maximal (C_{p_opt}). La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation est égale à :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (\text{II.36})$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p(\lambda) \cdot s \cdot \frac{R^2}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{II.37})$$

Si on divise cette dernière sur la vitesse de rotation, on aura l'expression du couple :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II.38})$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (II.33) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$C_{t_opt} = k_{opt} \Omega_t^2 \quad (\text{II.39})$$

$$\text{Avec : } K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{p_max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad (\text{II.40})$$

II.4.6 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation de la génératrice synchrone et primordiale pour concevoir des systèmes de commandes performantes, ceci consiste à décrire son comportement par un modèle mathématique, la génératrice à aimant permanent dans sa configuration exacte est complexe.

La structure générale d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents est présentée par la figure (II.18) :

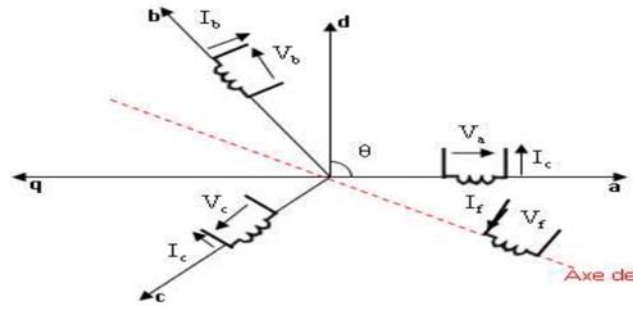


Figure II.18: Représentation symbolique de la MSAP

Il s'agit d'une machine multi pôle. Lors de la modélisation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées, permettant ainsi une mise en équations particulièrement simple [41].

- La non saturation du circuit magnétique.
- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air. Le rotor est donc (à pôle lisse, $L_d=L_q=L$) du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position du rotor.
- La tension magnéto motrice engendrée par les trois phases est à répartition sinusoïdale.
- Les pertes fers et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.

A. Equations électriques et magnétiques de la machine

•Equations des tensions et du couple

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse, dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Le neutre est isolé et la somme instantanée des courants de phase est nulle.

Les équations des tensions (convention moteur) sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Où :

$V_{a,b,c}$: Les tensions de phase de la machine ;

$I_{a,b,c}$: Les courants de phase de la machine ;

L : L'inductance ;

R_s : Résistance de l'enroulement statorique ;

$E_{a,b,c}$: Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

- L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$c_{em} = \frac{p}{\omega} (E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c) \quad (\text{II.42})$$

p : Le nombre de paire de pôle,

ω : La vitesse du rotor avec ($\omega=p.W$).

La résolution de L'équation matricielle de la machine obtenue est trop complexe; pour simplifier cette équation, on fait appel la transformation de Park, qui permet une économie considérable du temps de calcul.

.Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP

En reportant la transformation de PARK, dans le système d'équations (II.36), on obtient

l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L \\ \omega L & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

L'expression des fem est donnée par:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Ou : ϕ_f est le flux de l'aimant permanent.

- L'expression du couple :

$$c_{em} = \frac{p}{\omega} (E_d I_d + E_q I_q) \quad (\text{II.45})$$

- Le système d'équations (II. 36) devient :

$$\begin{cases} v_d = R_s I_d + L \frac{dI_d}{dt} - L I_q \omega \\ v_q = R_s I_q + L \frac{dI_q}{dt} + (L I_d + \phi_f) \omega \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

- L'expression du couple se réduit à :

$$c_{em} = \frac{p}{\omega} (E_q I_d) = p \phi_f I_q \quad (\text{II.47})$$

II.4.7 Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur statique qui assure la transformation d'énergie d'une source alternative en énergie continue, comme le montre le schéma ci-dessous :

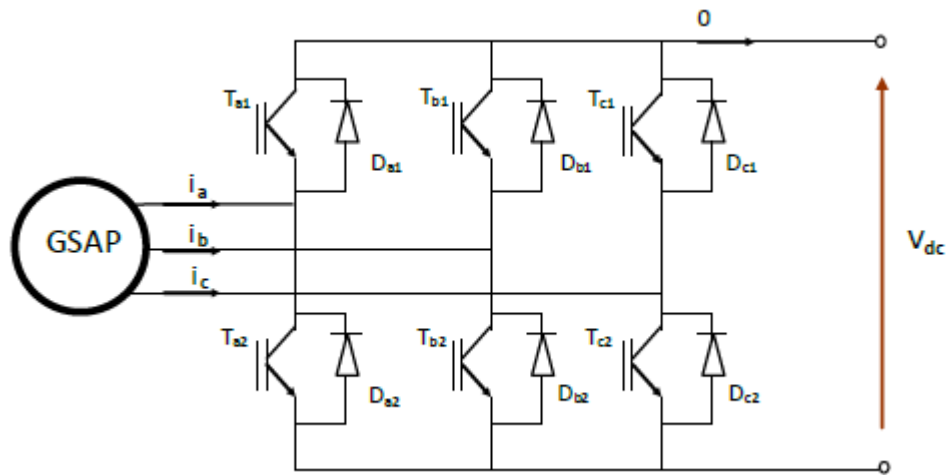


Figure II.19: Schéma du redresseur MLI.

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante [41]:

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

$$I_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (\text{II.49})$$

Avec :

Var, Vbr, Vcr : Tensions de références.

Vdc : Tension redressée.

idc: Courant modulé par le redresseur.

Sa, Sb, Sc: Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.5 Modélisation du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de courant. L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif:

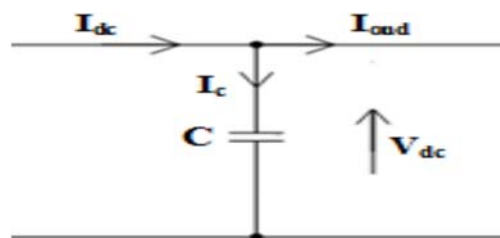


Figure II.20: le bus continu Vdc

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} i_c \quad (\text{II.50})$$

Avec i_c , le courant qui traverse le condensateur.

II.6 Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances [21]. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, on utilise le modèle R-C dit aussi model simple, qui nécessite pas d'identifications expérimentales de paramètres empiriques nécessaires à l'emploi des autres modèles couramment utilisés, et qui permet également le choix d'un simulateur à pas fixe dont le pas de calcul est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le model R-C comprend une Fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie C_{bat} et une résistance interne R_s .

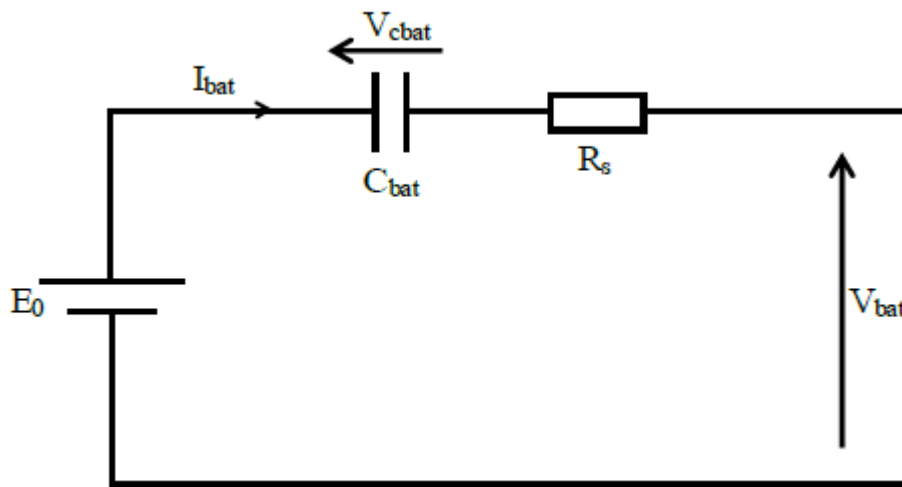


Figure II.21 Modèle R-C de la batterie.

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.51})$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Qd}{C_{bat}} \quad (\text{II.52})$$

Avec : C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie et Qd la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

II.7 Modélisation et dimensionnement du convertisseur DC-DC côté unité de stockage

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [08]. Tandis que lorsque le transistor est fermée le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

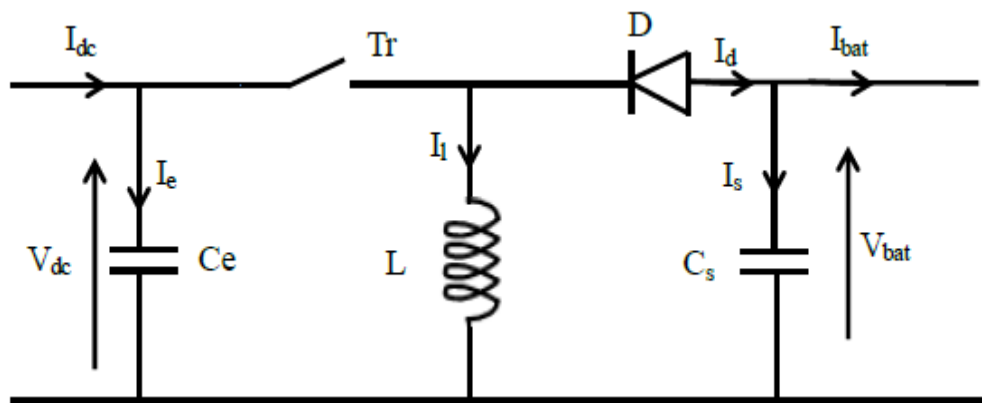


Figure II.22: Schéma d'un hacheur Buck-Boost.

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{bat} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)}V_{dc} \quad (II.53)$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire:

$$I_{bat} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha}I_{dc} \quad (II.54)$$

α : rapport cyclique

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, des modèles des différents composants de la chaîne de transformation hybride ont été développés à partir des modèles existants dans la littérature. Cette

modélisation est une étape importante pour introduire un certain nombre de modèles puis évaluer les caractéristiques de chaque élément de l'installation.

Il a été observé que les caractéristiques des différents générateurs (photovoltaïque, éolien) présentent une forte non-linéarité. Afin d'utiliser correctement l'énergie fournie par ces sources d'énergie, elle doit être contrôlée par la technologie de maximisation de la puissance, qui sera l'objet du prochain chapitre.

III.1 Introduction

L'objectif de la maîtrise du système énergétique hybride est de pouvoir fournir l'énergie nécessaire à la charge, malgré les fortes variations énergétiques induites par le caractère stochastique des ressources renouvelables.

Le principe du contrôle appliqué est de contrôler les tensions d'énergie renouvelable pour que la tension du bus à courant continu soit égale aux variations d'éclairage et de vitesse du vent et d'extraire le maximum de puissance des sources d'énergie renouvelables.

III.2 Commande du générateur photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques peuvent fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais ne peuvent fournir une puissance maximale que pour des valeurs de courant et de tension spécifiques. En effet, les caractéristiques du générateur $I(V)$ dépendent de l'éclairage solaire et de la température, ces changements climatiques entraîneront des fluctuations du point de puissance maximale. En raison de cette fluctuation, un ou plusieurs convertisseurs statiques contrôlés sont généralement insérés entre le générateur et le récepteur pour aider à maintenir une puissance maximale. Ces commandes sont appelées MPPT (Maximum Power Point Tracking) associé au hacheur, qui assure le couplage entre le générateur photovoltaïque et le récepteur, obligeant ainsi le récepteur à délivrer une puissance maximale.

La technique MPPT est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser en permanence la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques et atteindre en permanence le point de puissance maximum qui n'est pas facile à atteindre.

En fait, cette question de recherche a fait jusqu'à présent l'objet de nombreuses études. Plusieurs méthodes ont également été développées et utilisées.[42]

III.2.1 Méthode « Perturbation et Observation »

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes du panneau est augmentée du fait de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

L'organigramme fonctionnel de cet algorithme est le suivant:[43]

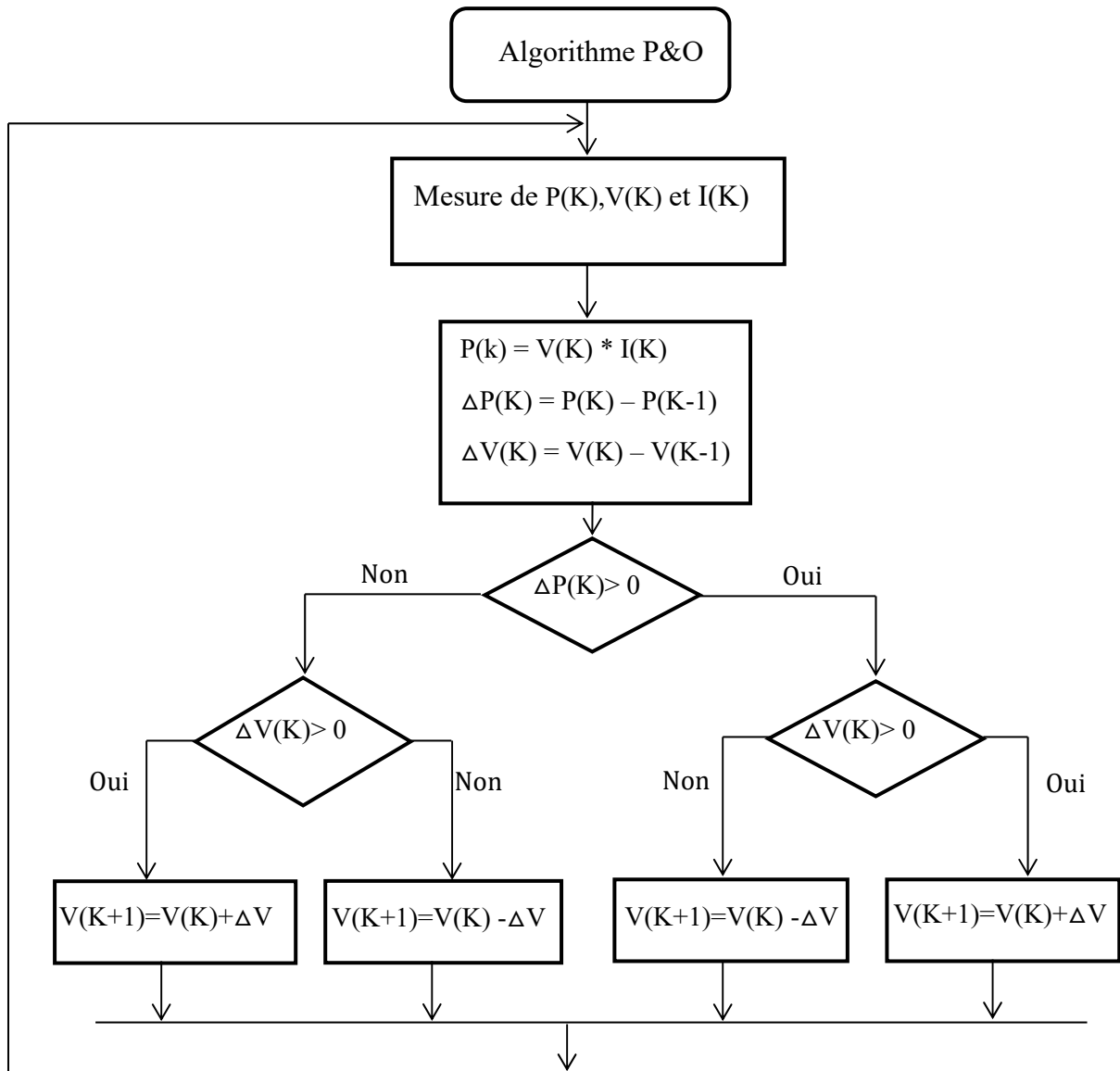


Figure III.1 : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation".[43]

III.2.3 Résultats de simulation

A. Fonctionnement sous des conditions constantes

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants ($T=25^{\circ}\text{C}$; $E_s=1000\text{W/m}^2$). Le but de ces simulations est d'évaluer le temps de réponse de chaque MPPT ainsi visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP.

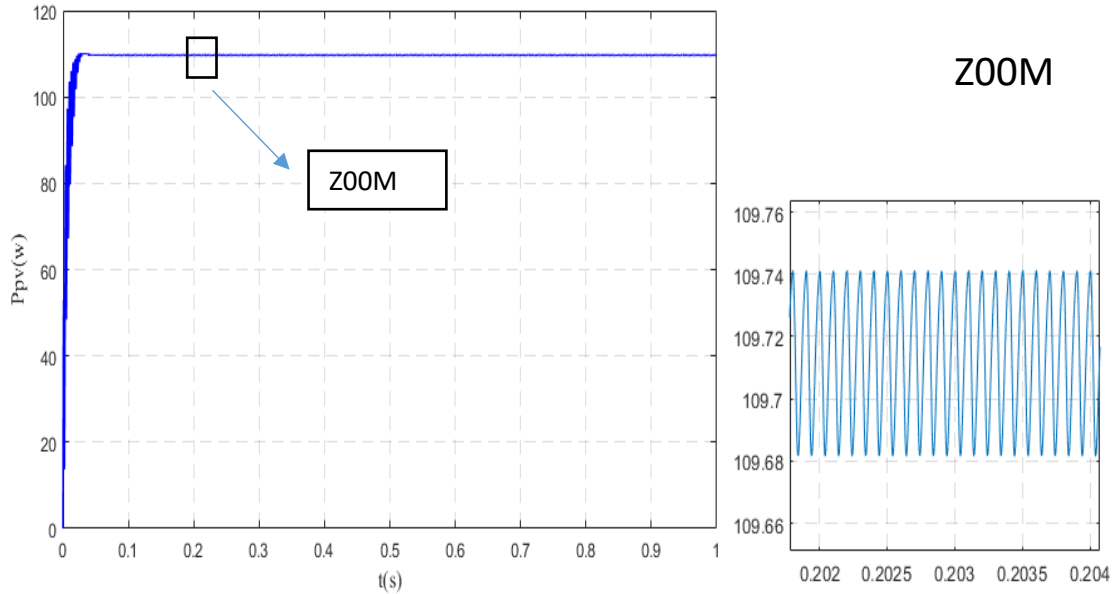


Figure III.2 : allure de la puissance sous conditions stables ($E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).

La figure (III.2) montrent la réponse de contrôleur MPPT(P&O) proposé sous conditions standards pour ($E_s=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).

On remarque que la P&O présente des oscillations en régime permanent suite à la perturbation continue de la tension de fonctionnement pour atteindre le MPP ce qui causera des pertes de puissance.

A. Fonctionnement sous conditions variables:

Pour voir le comportement du système face aux changements de l'éclairement on va lui faire subir le test dont le profil d'ensoleillement est donnée par la figure suivante :

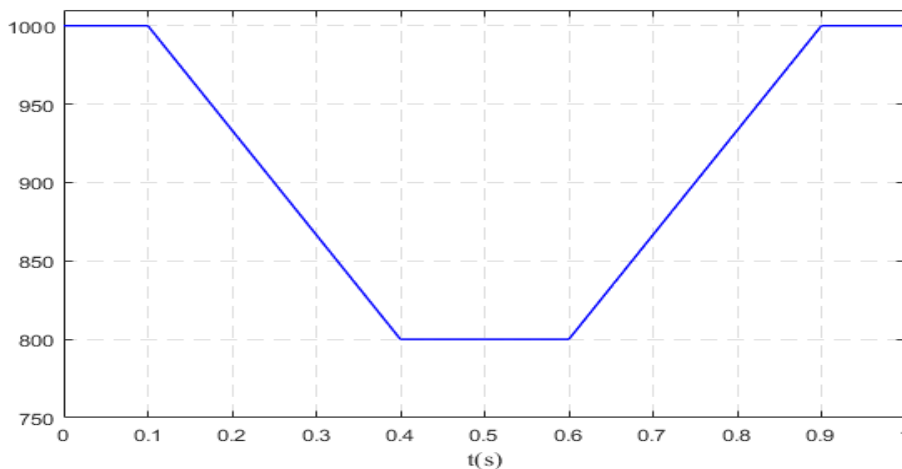


Figure III.3: consigne de l'ensoleillement dans le cas d'un changement lent.

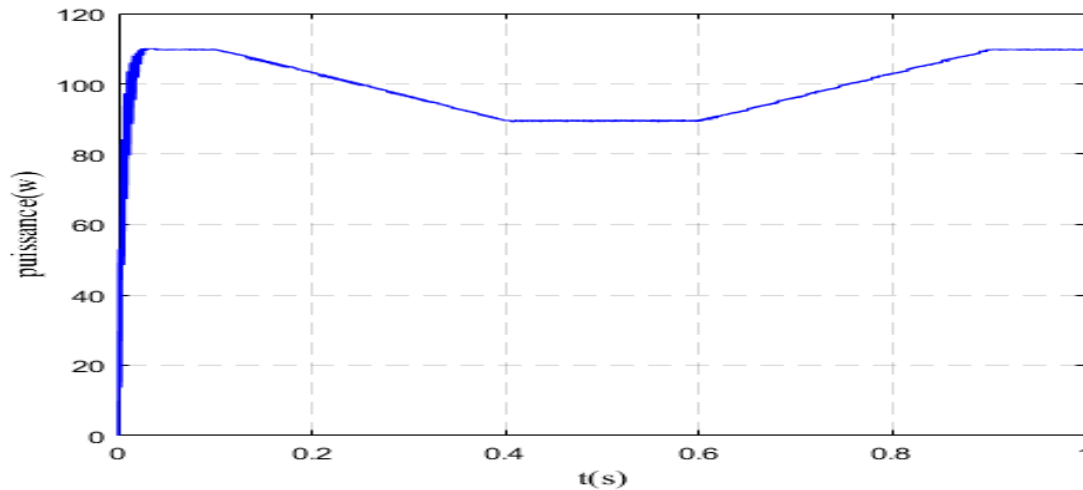


Figure III.4 : allure de la puissance pour une variation lente de l'ensoleillement.

Les résultats de la simulation obtenue par la méthode de pré-programmation et notez la recherche à partir du point de jeu de puissance maximale MPPT classique (p&o) contrôleurs sont moins rapides en cas de variation lente de la lumière du soleil.

III.3 Optimisation de la chaîne de conversion éolienne :

Le système de conversion de l'énergie éolienne se compose d'éoliennes dont les caractéristiques définissent leur potentiel à extraire l'énergie de l'air en mouvement. En effet, la courbe de puissance en forme de cloche d'une éolienne doit trouver le meilleur point de fonctionnement, on peut donc dire qu'il s'agit de la puissance maximale (MPPT). Pour assurer un fonctionnement dans ces conditions optimales, il est nécessaire de définir les règles de contrôle à appliquer. Pour cette raison, dans le cas de variations lentes du rayonnement solaire, il est nécessaire d'étudier l'optimisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à travers l'algorithme MPPT.

III.3.1 Maximisation de puissance avec la connaissance de la courbe caractéristique

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en connaissant la caractéristique de la voile éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent [38].

La courbe spécifique d'une turbine tripale possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale (λ_{opt}) et le coefficient de puissance maximal (C_{p-opt}). La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation est égale à :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V_v} \quad (\text{III.1})$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho C_p(\lambda) \cdot S \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{III.2})$$

Si on divise cette dernière sur la vitesse de rotation, on aura l'expression du couple :

$$c_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{III.3})$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (III.5) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$c_{t\text{-opt}} = K_{\text{opt}} \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Avec : } K_{\text{opt}} = \frac{1}{2\lambda_{\text{opt}}^3} C_{p\text{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad (\text{III.5})$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence montrée par la figure (III.5) [11].

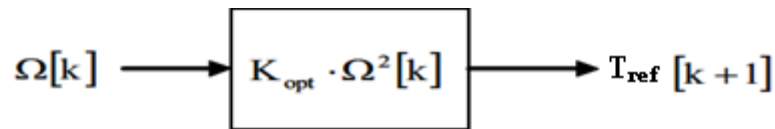


Figure III.5 : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal. La Figure (III.6) donne l'illustration graphique de ce mode de recherche du point maximal de puissance.

- La mesure de la vitesse de rotation Ω_t engendre le calcul du couple $T_{\text{mec-ref}}$. Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromagnétique de la génératrice :

$$c_t - c_{\text{mec}} = J \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} + f \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{III.6})$$

- Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique (III.8) pour atteindre, au pas de calcul suivant la vitesse Ω_t ; où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée.
- Après quelques itérations, on atteint l'optimum à $(T_{\text{opt}}, \Omega_{\text{opt}})$ correspondant à la puissance optimale $P_{\text{opt}}(\lambda_{\text{opt}}, C_{p\text{-opt}})$.

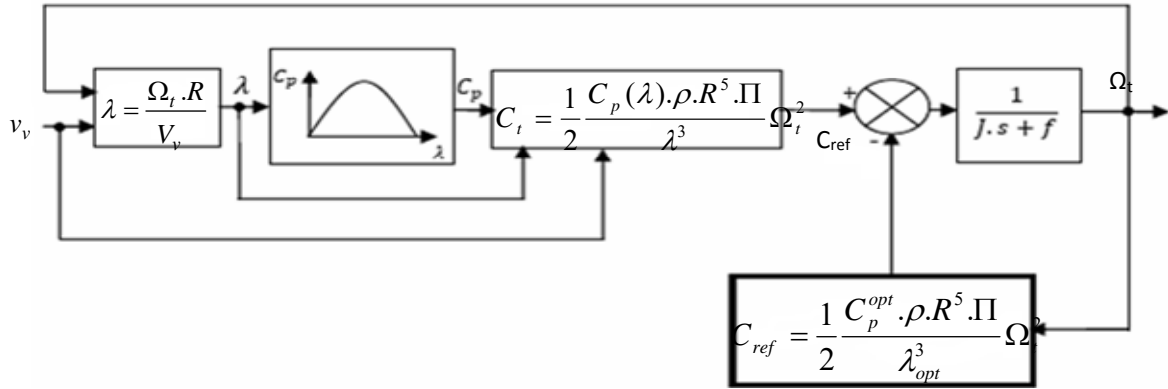


Figure III.6 : Schéma de la turbine avec l’algorithme MPPT [36].

III.4 Commande de la chaîne de conversion éolienne

III.4.1 Commande vectorielle [29]

La commande vectorielle a pour objectif de réguler la tension continue à la sortie du redresseur par le contrôle des courants de références, $\vec{i}(i_{q_ref})$ qui sera déterminé à partir de la régulation de la tension continue aux bornes du bus continu et $\vec{i}(i_{d_ref})$ sera imposé nul.

Il s’agit d’une commande vectorielle en couple, dont le courant d’axe d est maintenu nul pour minimiser les pertes joules. Le courant d’axe q issu de la régulation de la tension continu à sa référence. La régulation des courants se fait à l’aide des régulateurs à hystérésis.[29]

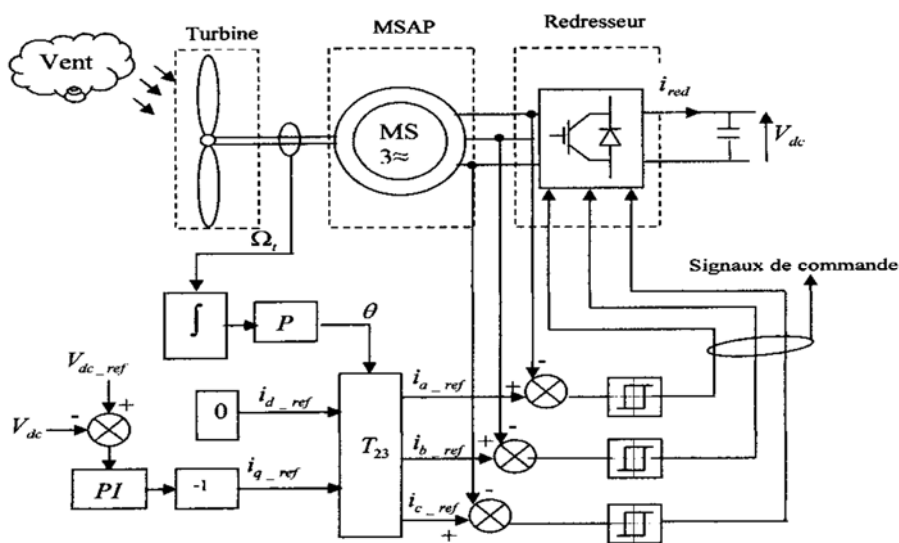


Figure III.7 : Schéma de principe de la commande vectorielle.

Quel que soit le but de la commande (régulation de vitesse, de couple ou de position...), il est nécessaire de contrôler instantanément le couple. Ceci peut se faire en agissant sur les courants satatoriques réels en agissant sur leurs composantes directes et en quadrature.

L'expression du couple est donnée par l'expression suivante :

$$C_e = p(\Psi_d i_d - \Psi_q i_q) = p[(L_d - L_q)i_d + \Phi_f]i_q \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas d'une MSAP à rotor lisse ($L_d = L_q$) l'expression du couple devient :

$$C_e = p\Phi_f i_q \quad (\text{III-8})$$

Étant donné que le flux rotorique Φ_f est fixe, on remarque que ce couple ne dépend que de la composante en quadrature du courant i_q il est maximal, pour un courant donné, lorsque $i_d = 0$. Ainsi, le déphasage entre les courants de phase et les f.é.m. de la machine est nul d'après la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{III-9})$$

Et le couple électromagnétique est proportionnel aux courants d'alimentation, comme dans la machine à courant continu à excitation séparée. De même la puissance absorbée est optimisée pour $i_d = 0$.

III.4.2 Simulation du fonctionnement de générateur éolien avec l'algorithme MPPT classique

A. Vitesse du vent constant

Afin d'utiliser l'algorithme MPPT pour vérifier le fonctionnement de l'éolienne, une étape de vitesse du vent est appliquée. Au début, la vitesse est de 8m / s, puis à $t = 2s$, la vitesse est réduite à 6m / s (voir Figure (III.8)). La figure (III.9) représente la réponse de la turbine à un pas de vitesse du vent. Nous avons remarqué que la vitesse de la turbine change proportionnellement à la vitesse du vent. L'entraînement de l'éolienne démarre à vitesse nulle et se stabilise après 0,5 s. La puissance de la turbine diminue également lorsque la vitesse du vent diminue (Figure .10).

La figure (III.11) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p avec le temps, même si la vitesse du vent change, elle reste constante. Par conséquent, une attention particulière doit être accordée au travail à la puissance maximale.

La figure (III.12) représente l'allure du courant (I_q) montre l'influence de la variation de la vitesse qui a introduit une variation du couple électromagnétique de la génératrice synchrone à aimant permanent.

La figure (III.13), représente le couple électromagnétique de la génératrice synchrone.

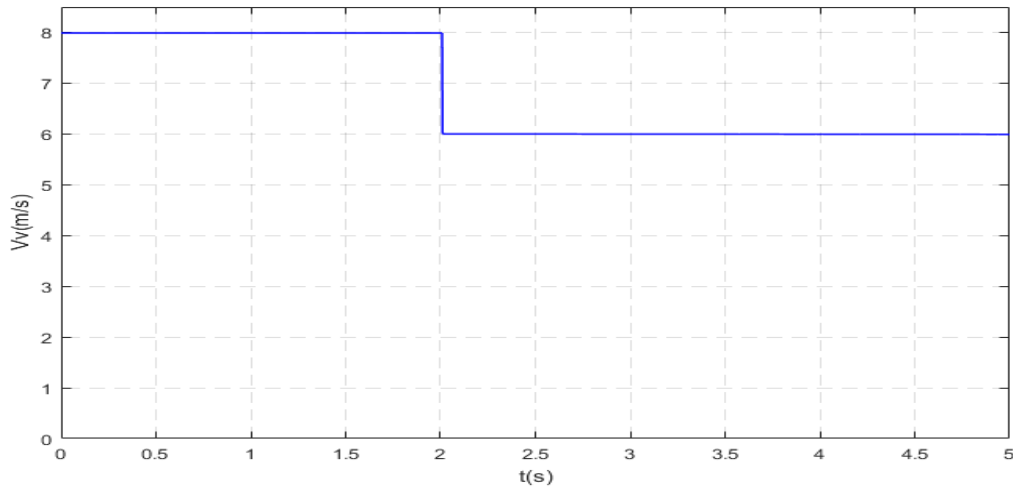


Figure III.8 : Allure de la vitesse du vent constant.

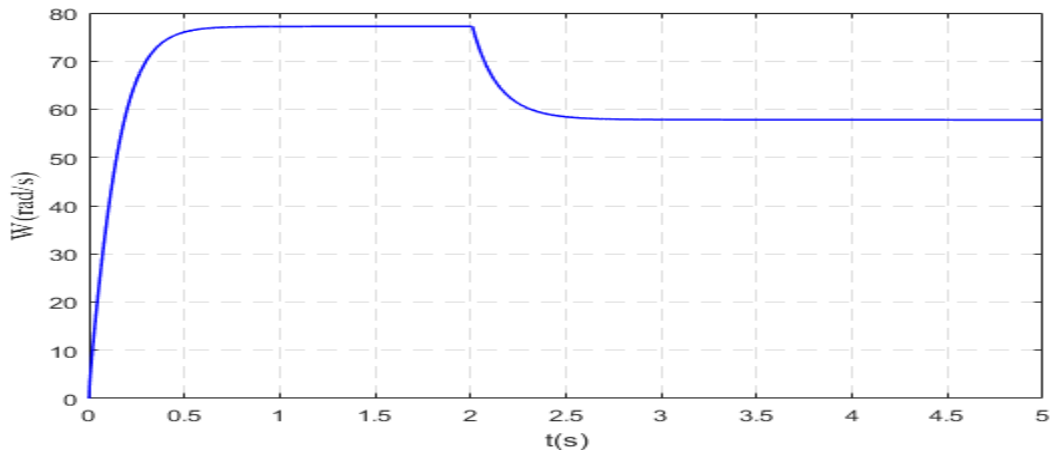


Figure III.9 : Allure de la vitesse de la turbine.

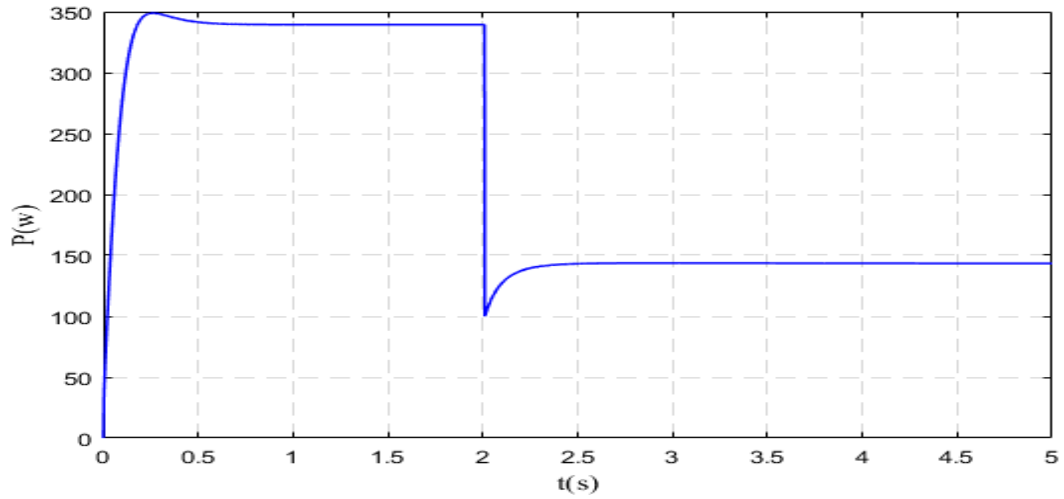


Figure III.10: Allure de puissance de la turbine.

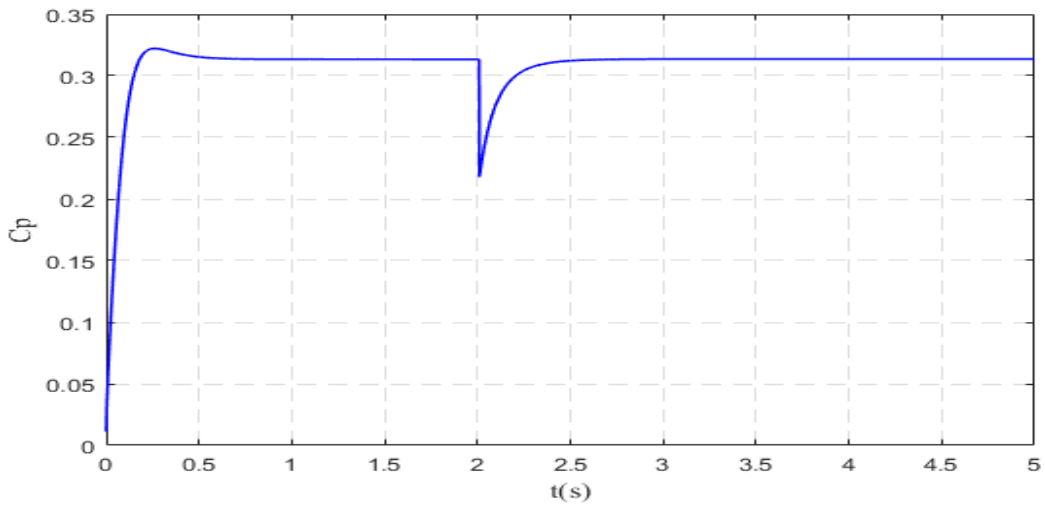


Figure III.11: Allure du coefficient de puissance C_p .

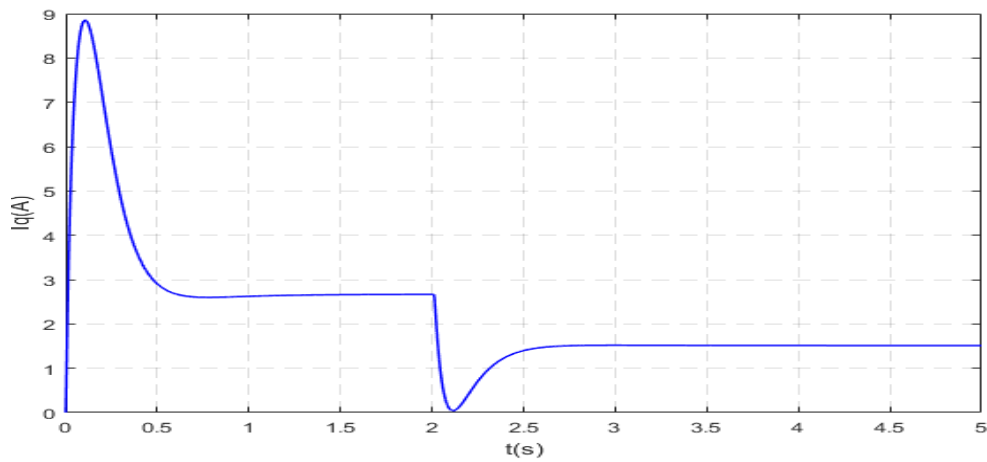


Figure III.12: Allure du courant i_q .

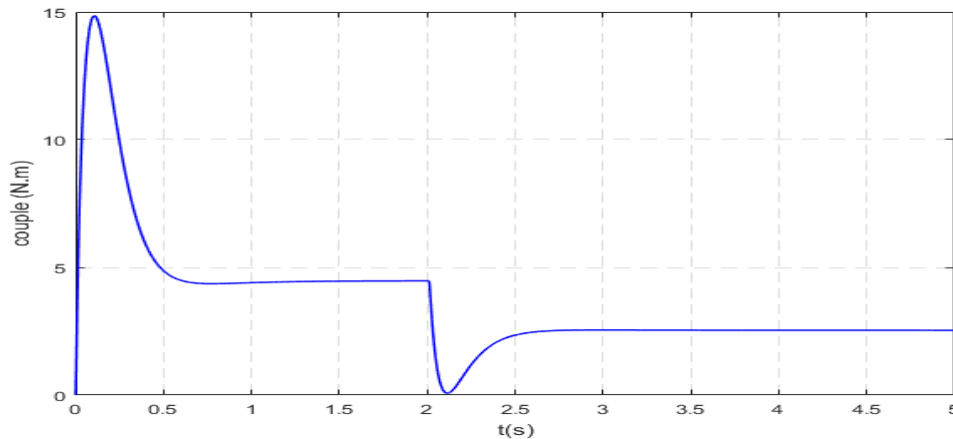


Figure III.13: Allure du couple électromagnétique mesuré.

B. Vitesse du vent variable

On a appliqué un profil du vent aléatoire plus proche de l'évolution du vent réel qui on a filtré pour l'adapter à la dynamique lente du système étudié. L'objectif c'est de voir le degré de poursuite du point à maximum de puissance et l'efficacité du réglage de vitesse assuré par le PI classique (stabilité face aux variations lors du vent). (Voir la figure III.14)

La figure (III.15) représente la réponse de la turbine à l'étape de vitesse du vent où nous notons que la vitesse de la turbine change proportionnellement à la vitesse du vent.

La figure (III.16) représente la puissance de la turbine, on remarque que le moteur de l'éolienne démarre à vitesse nulle. Lorsque nous remarquons que le changement de puissance des turbines change proportionnellement à mesure que la vitesse du vent change.

La figure (III.17) représente l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du Temps, qui est constant même avec la variation de la vitesse du vent. Donc le fonctionnement à puissance maximale est respecté.

Les figures (III.18, III.19) représentent le courant de la machine I_q et le couple électromagnétique C_{em} , on constate une petite oscillation au démarrage puis les 2 courbes suivent parfaitement la courbe de vent.

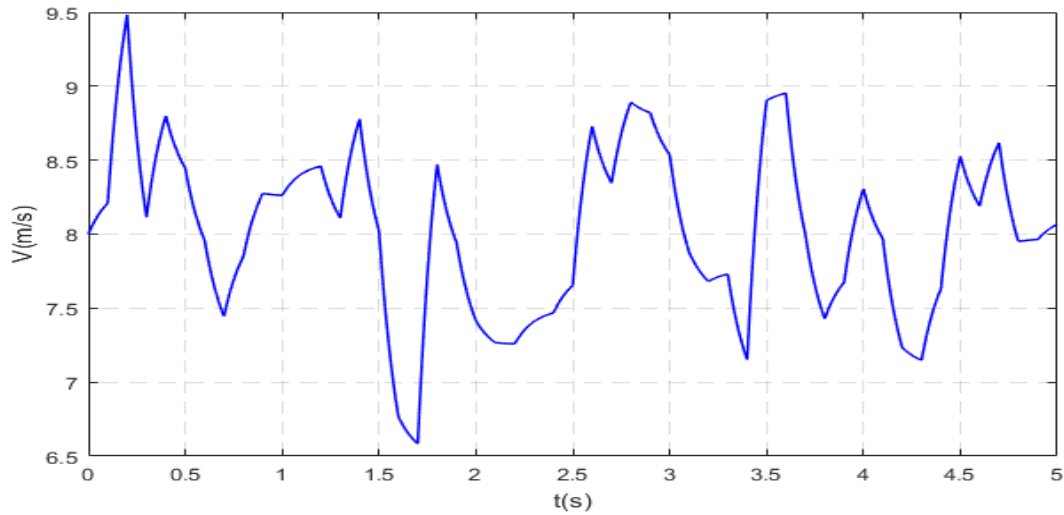


Figure III.14 : la vitesse du vent variable.

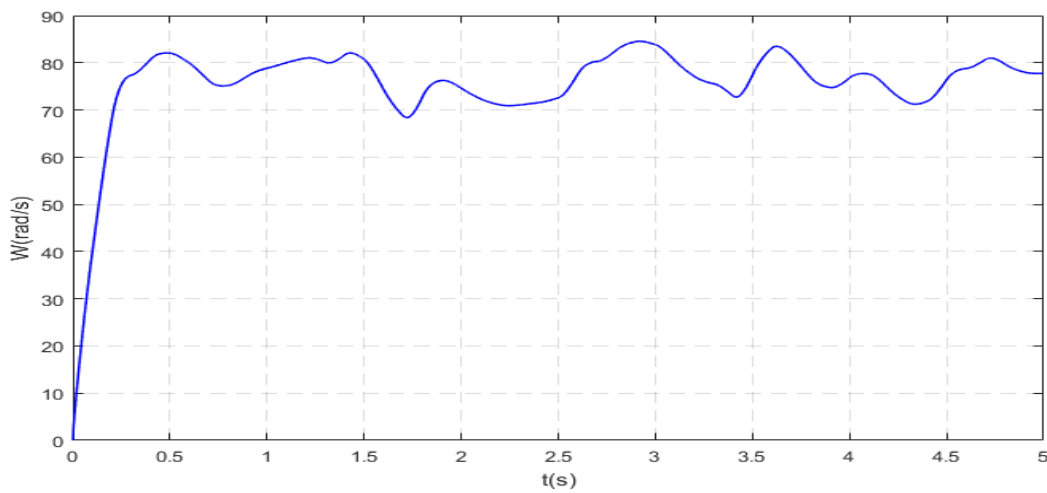


Figure III.15 : la vitesse de la turbine.

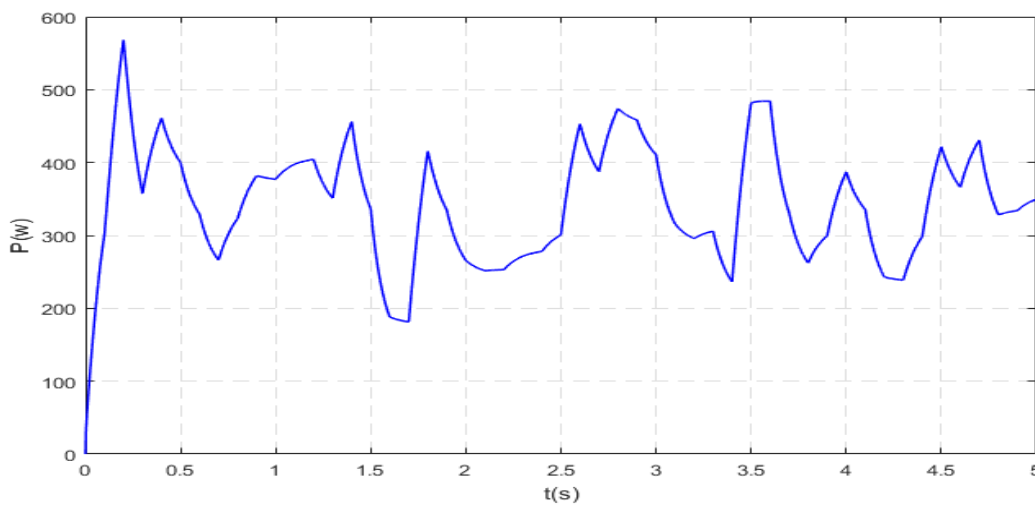


Figure III.16: La puissance de la turbine.

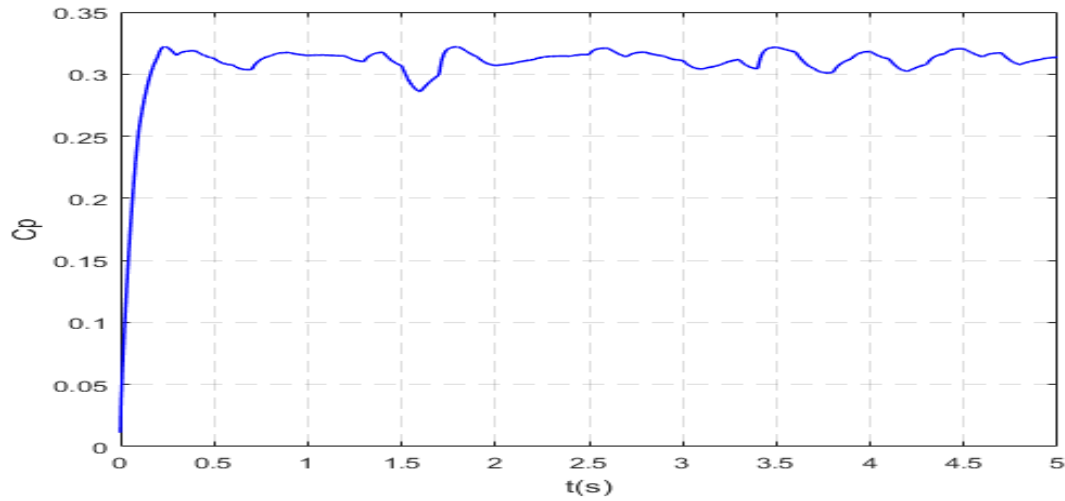


Figure III.17: coefficient de puissance C_p .

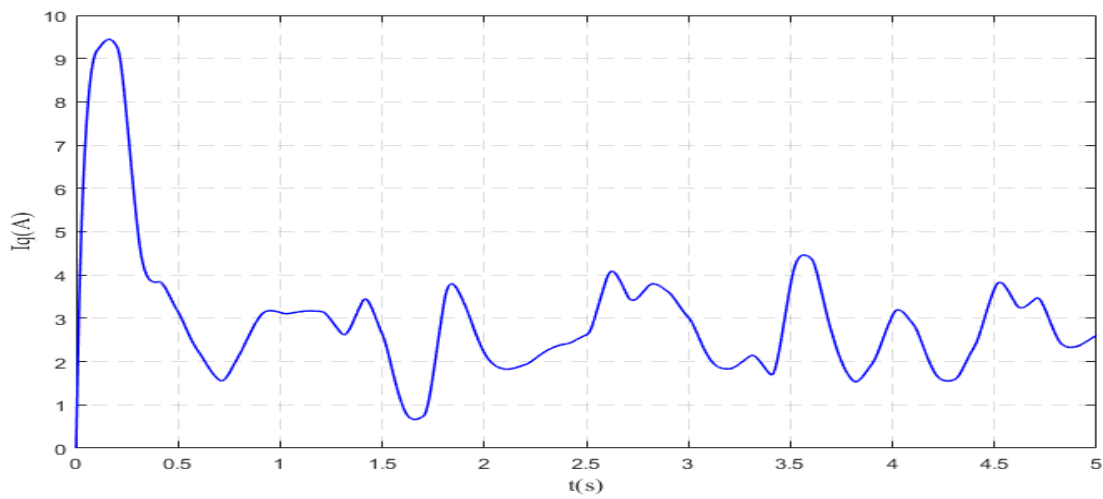


Figure III.18: le courant de la machine i_q .

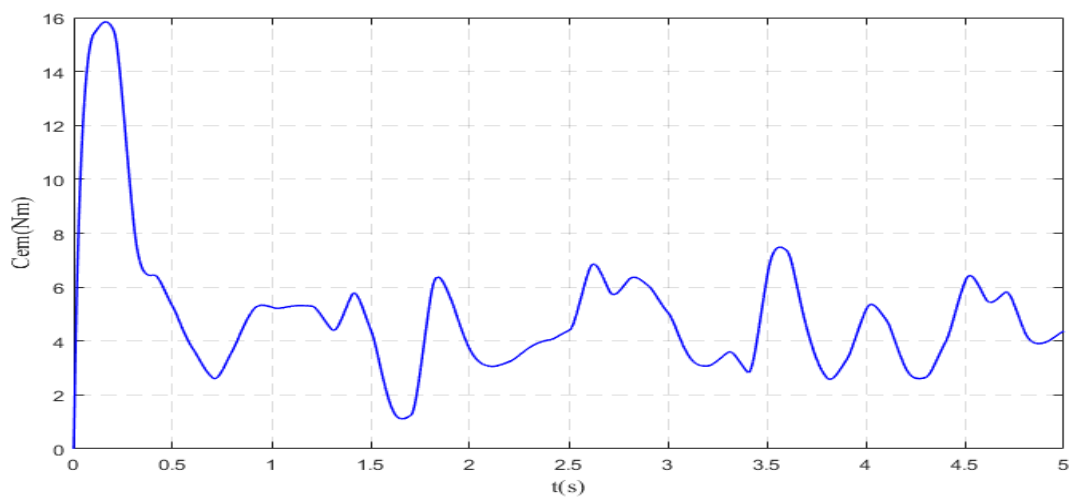


Figure III.19 couple électromagnétique C_{em} mesuré

III.5 Structure de Système hybride global

Le système hybride contient les sources d'énergies renouvelables (PV, EOL, PAT). La puissance est maximisée en utilisant le contrôleur P&OLA configuration choisie est celle a bus continu comme présenté sur figure (III.20).

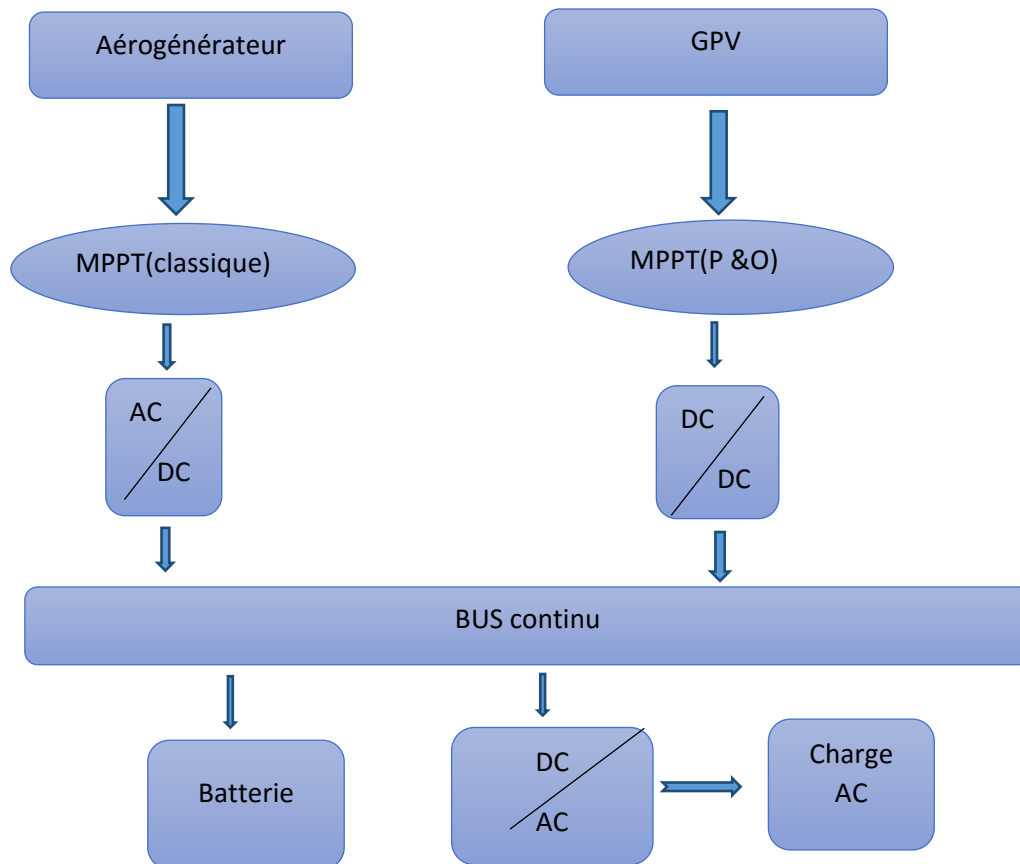


Figure III.20: Schéma synoptique du système hybride avec contrôleurs MPPT.

III.6 Conclusion

Ce chapitre été consacré à l'optimisation de la puissance produite par le système de conversion d'énergie hybride. Pour se faire nous avons commencé par le générateur photovoltaïque, tel qu'on a proposé la techniques classiques (P&O).

Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité du contrôleur vue son temps de réponse qui est rapide et aussi sa robustesse face au changement climatiques

Le générateur éolien à son tour présente une caractéristique non linéaire et nécessite un contrôleur MPPT, afin d'extraire le maximum de puissance. La technique de recherche de MPP a été proposée (technique classique).

La commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent pilotée à l'aide d'un convertisseur électronique à commande MLI. Ce convertisseur joue le rôle d'un

redresseur, Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un des correcteur PI. L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent. Dans le but d'augmenter ce degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système.

Pour le système hybride l'optimisation s'est porter sur la technique classique et P&O pour les deux générateurs photovoltaïque et éolien.

IV.1 Introduction

L'efficacité de toute installation électrique dépend fondamentalement de la rigueur de son dimensionnement et de son utilisation, dans le cas du système hybride de production d'énergie électrique étudiée, la maîtrise du dimensionnement de ses différents constituants est nécessaire car il influe directement sur le coût, les performances et la pérennité de notre installation.

Aussi, étant donné la nature aléatoire de la source solaire et de la vitesse du vent, et afin de garantir la fourniture d'énergie électrique durant les périodes nocturnes et de beau temps, il est nécessaire d'optimiser le calcul de la taille de nos générateurs, photovoltaïque, éolienne, de la capacité de la batterie d'accumulateurs.

Il est utile de noter que ce dimensionnement devrait être fait sur des données météorologiques (l'irradiation solaire et la vitesse du vent), ainsi que sur le profil de charge exacte des consommateurs sur de longues périodes.

IV.2 Détermination du profil de charge

La connaissance exacte du profil de charge de nos consommateurs facilitera la détermination de la taille de nos générateurs. Nous rappelons que notre système hybride est prévu pour l'alimentation électrique d'un site isolé.

L'étude du bilan énergétique a pour l'égalité

Dans notre étude nous avons choisi une maison type non raccordé au réseau de distribution d'énergie classique et équipée de l'ensemble des appareils électroménagers permettant de fournir le confort aux occupants. Par ailleurs dans notre cas nous supposons que l'habitation sera occupée en permanence durant toute l'année et que les équipements domestiques fonctionnent sous une tension standard 220V-50Hz (tension secteur). Concernant, l'heure du lever et du coucher de la famille est supposée respectivement à 6h00 et à 23h00.

L'estimation de l'énergie quotidienne consommée sur notre site par les différents équipements électroménagers et éclairage, est dressée sur le tableau suivant on suppose dans la suite de chapitre que cette énergie est constante : [44].

Charges		Nombre de charges	Puissance nominale (W)	Heures d'utilisation (h)		Consommation (Wh/j)	
				Jour	Nuit	Jour	Nuit
Lampe fluorescente	Cuisine	01	40	—	03	—	120
	Salle de séjour	02	40	—	03	—	240
Lampe à incandescence	Chambre 1	01	60	—	02	—	120
	Chambre 2	01	60	—	02	—	120
	Toilette douche	03	40	—	01	—	120
Téléviseur	—	01	80	03	03	240	240
Radio	—	01	40	02	02	80	80
Réfrigérateur	—	01	280	06	05	1680	1400
Divers	—	—	90	02	01	180	90
Consommation total	—	—	730	13	24	2180	2530
Total = 4710Wh/j							

Tableau VI.1 : Demande journalière d'énergie pour un foyer isolé à Bejaia.

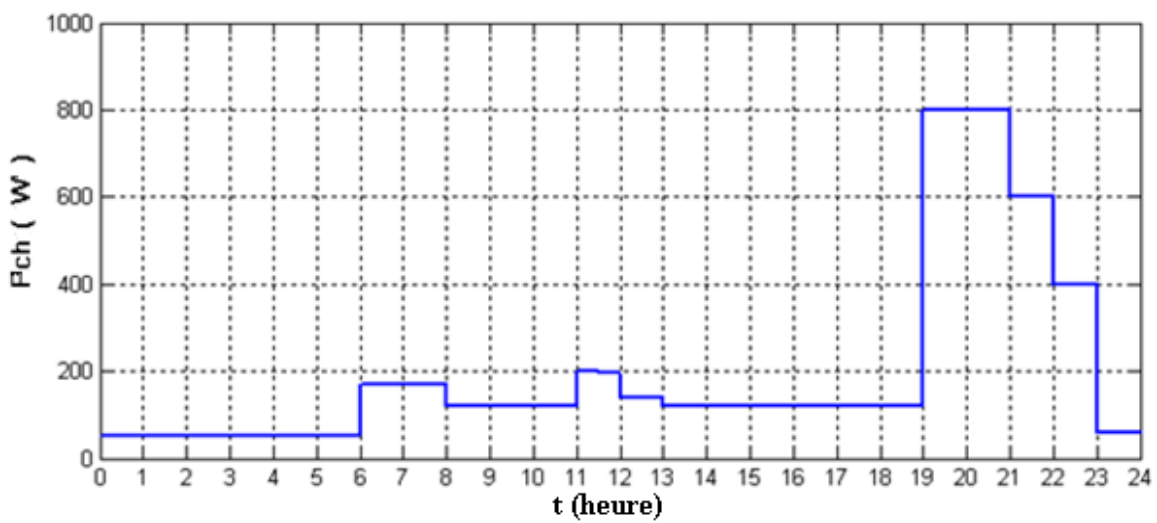


Figure IV.1 : Profil de puissance demandé par la charge (foyer isolé) sur une journée utilisé dans notre étude.

IV.3 Stratégie de fonctionnement du système hybride

La gestion du système est basée sur un algorithme qui permet au système la surveillance d'un SEH de décider combien et quels générateurs allumer, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible. [45]

Cet outil doit aussi tenir en compte:

- ✓ Empêcher les décharges profondes de la batterie.
- ✓ Empêcher les surcharges de la batterie.
- ✓ Déconnection de la charge dans le cas de l'insuffisance de la production et décharges profondes de la batterie.

On propose dans ce travail 05 modes de fonctionnement pour déterminer la capacité du système hybride à satisfaire la puissance totale demandée (la puissance de charge plus la puissance nécessaire pour charger les batteries) et cela en fonction des conditions atmosphériques (ensoleillement, température et vitesse du vent).

Mode 1 :

Dans ce mode on a $P_{hyb} = P_{ch}$, alors la puissance produite par les deux générateurs (photovoltaïque et éolien) est utilisée pour alimenter la charge.

Mode 2 :

En ce mode on a $P_{hyb} > P_{ch}$ et $EDC \geq 90\%$ alors cette puissance produite par les deux générateurs va entraîner la charge et le surplus sera dissipé dans une charge dérivative.

Mode 3 :

En ce mode on a $P_{hyb} > P_{ch}$ et $EDC < 90\%$ alors cette puissance produite par les deux générateurs va entraîner la charge et le surplus sera utilisé pour charger les batteries.

Mode 4 :

Ce mode correspond à $P_{hyb} < P_{ch}$ et $EDC > 30\%$ donc la puissance produite, n'est pas suffisante pour l'alimentation de la charge donc les batteries seront sollicitées pour compléter la puissance produite par le générateur photovoltaïque et éolien en même temps satisfaire la puissance totale de la charge.

Mode 5 :

Ce mode correspond à $P_{hyb} < P_{ch}$ et $EDC \leq 30\%$ la charge est déconnectée et les batteries se chargent.

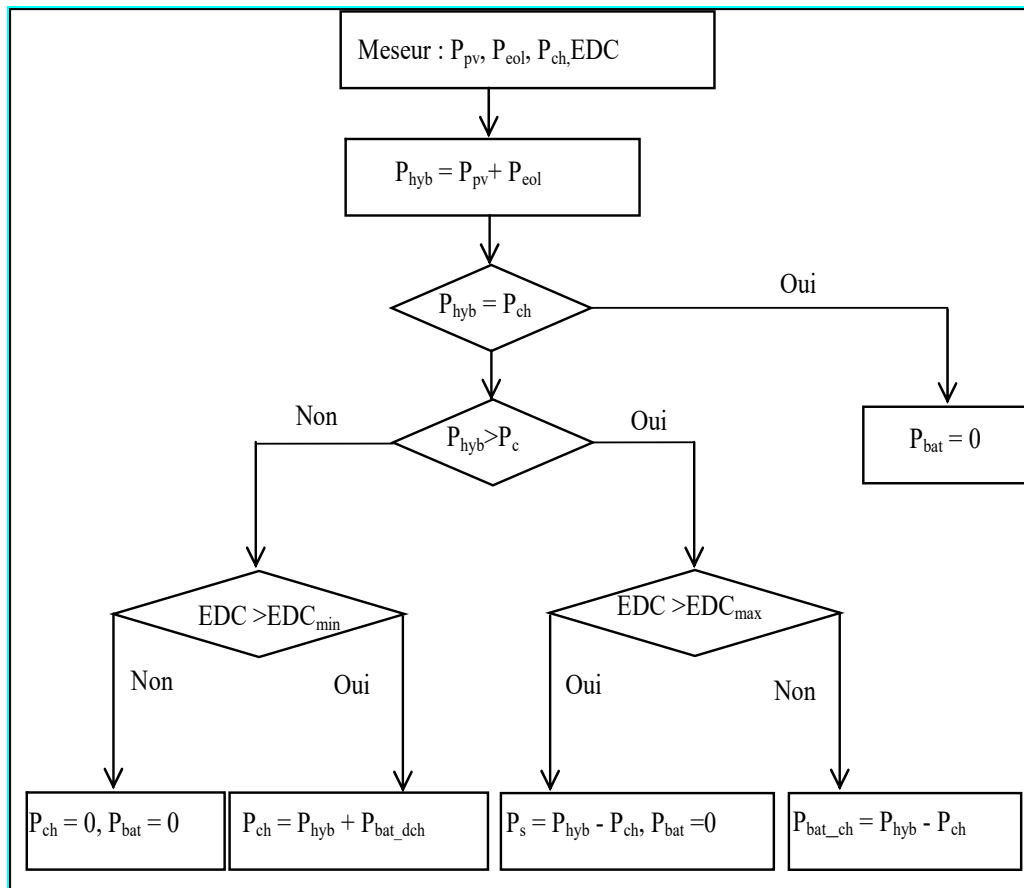


Figure .VI.2 : Algorithme de gestion de l'énergie.

IV.4 Simulation et résultats numériques

(Une note a été prise à l'Université de Béjaïa comme référence pour prendre le dimensionnement étudié)**[44]**.

D'après les résultats de dimensionnement le système étudié est constitué de :

- Un sous système photovoltaïque constitué de 9 panneaux de 110W chacun, d'un hacheur élévateur (boost) relié aux batteries de stockage par un bus continu. Un contrôleur basé sur la P&O est utilisé pour la recherche de MPP.
- Un sous système éolien composé d'une éolienne de 1kW constituée d'une génératrice synchrone a aimant permanent, d'un redresseur relié aux batteries de stockage. Comme pour le générateur photovoltaïque, un contrôleur basé sur la méthodeclassic utilisé pour recherche de MPP.
- Un système de stockage constitué de 4 batteries plomb acide (12V, 100Ah) branchées en série, qui se chargent quand la production de d'énergie est supérieure à celle demandée par la charge et se déchargent dans le cas d'un déficit d'énergie.

La simulation est faite sur Matlab/simulink, les différentes parties du système (générateur photovoltaïque, éolienne, batterie, charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliées entre eux d'une manière cohérente comme le montre la figure(V.14).

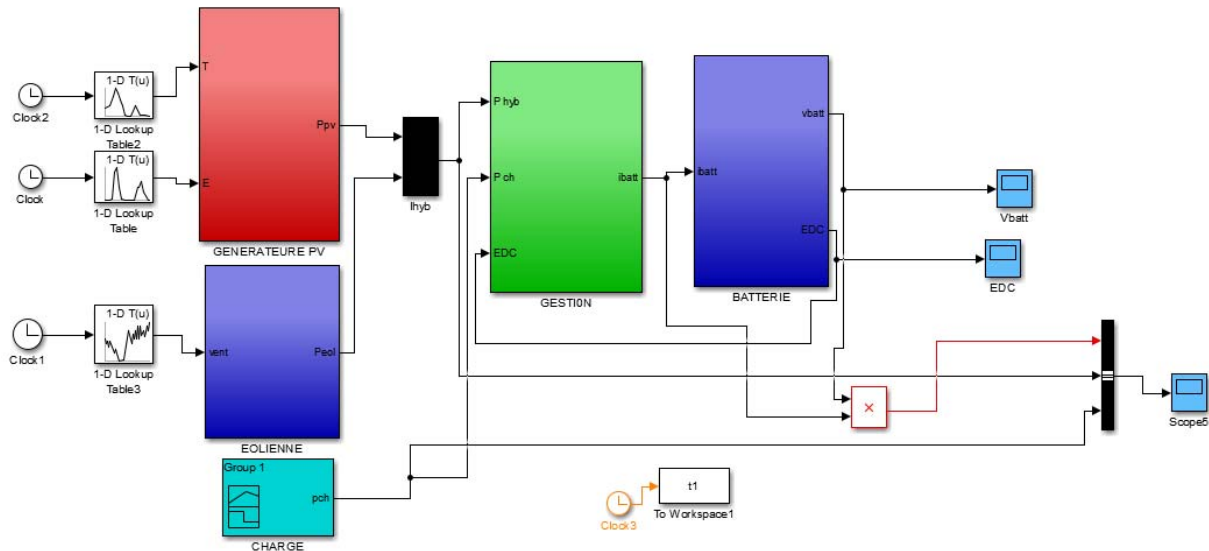


Figure IV.3: schéma global du système hybride sous Matlab/Simulink.

IV.4.1 Résultats de simulation :

Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans différentes situations possibles, la simulation d'un système d'énergie hybride (éolien-photovoltaïque) en introduisant la lumière du soleil, la température et la vitesse sera venteuse sur deux jours différents (été et hiver), donc la courbe de charge sera Modifications; les résultats obtenus sont indiqués ci-dessous.

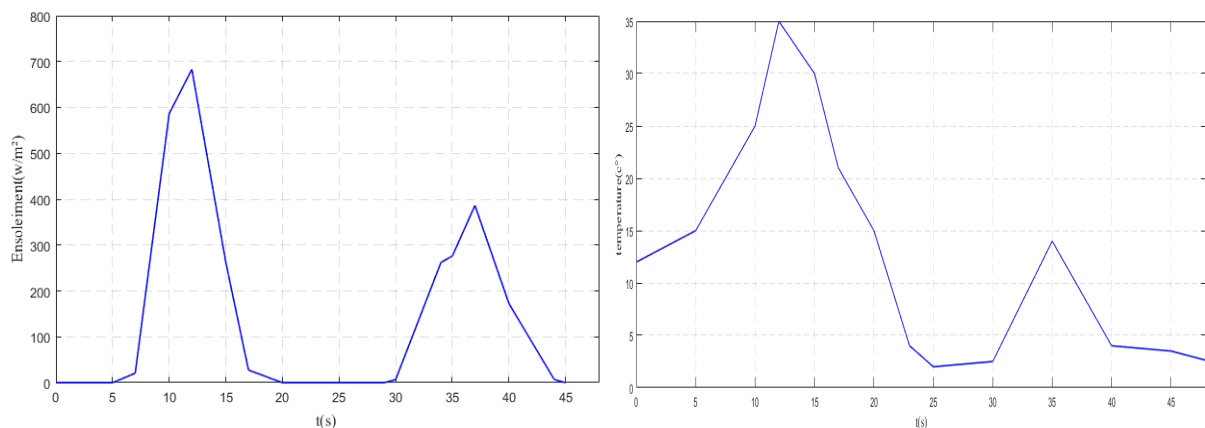


Figure IV.4 : Profile de l'ensoleillement et de la température.

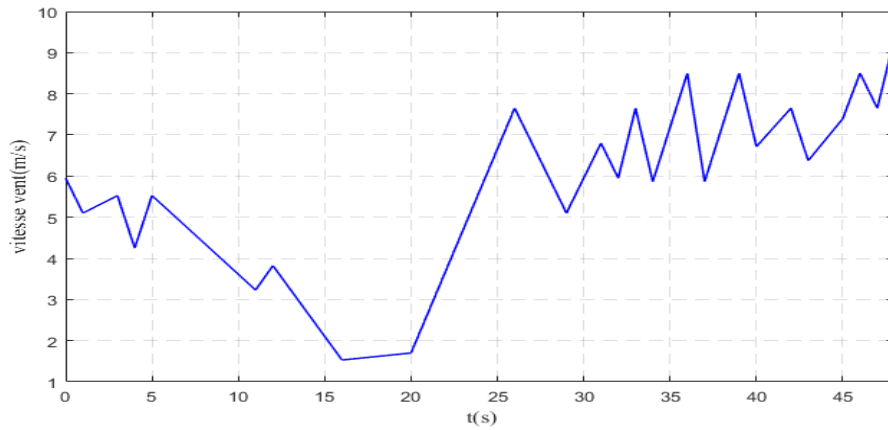


Figure IV.5 : Profil du vent pendant deux jours successifs.

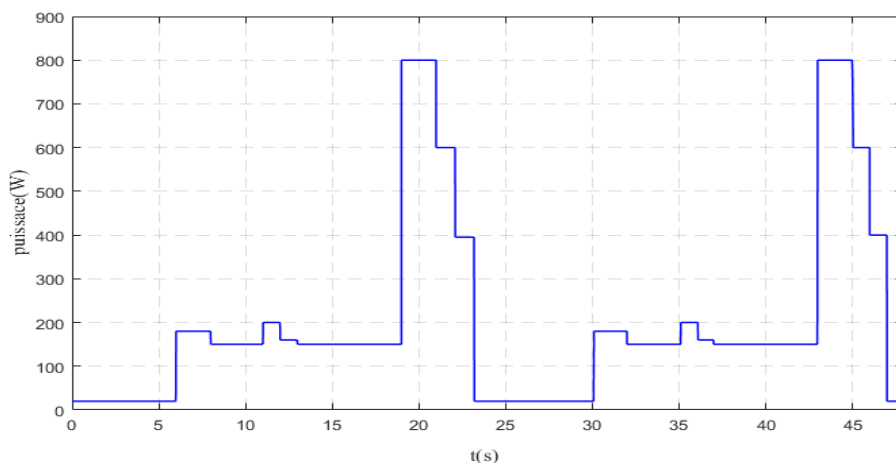


Figure IV.6 : Profil de puissance demandée par la charge

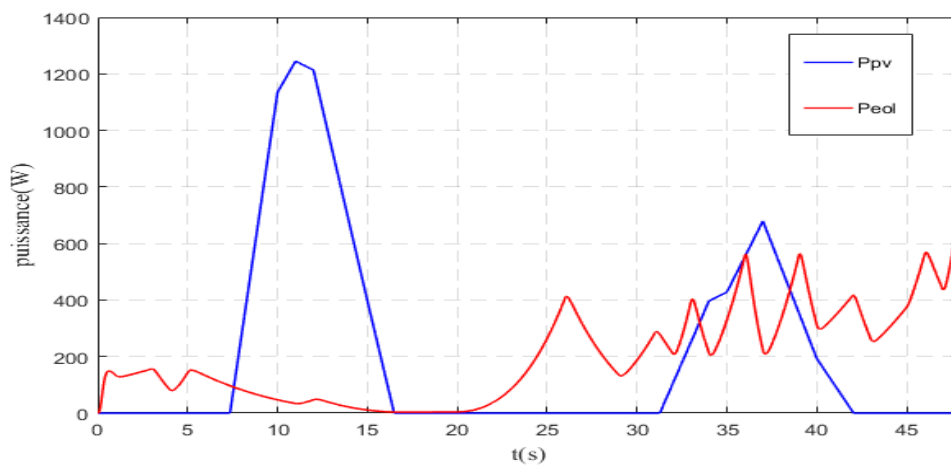


Figure IV.7: Puissance optimale produite par le générateur photovoltaïque et l'éolienne

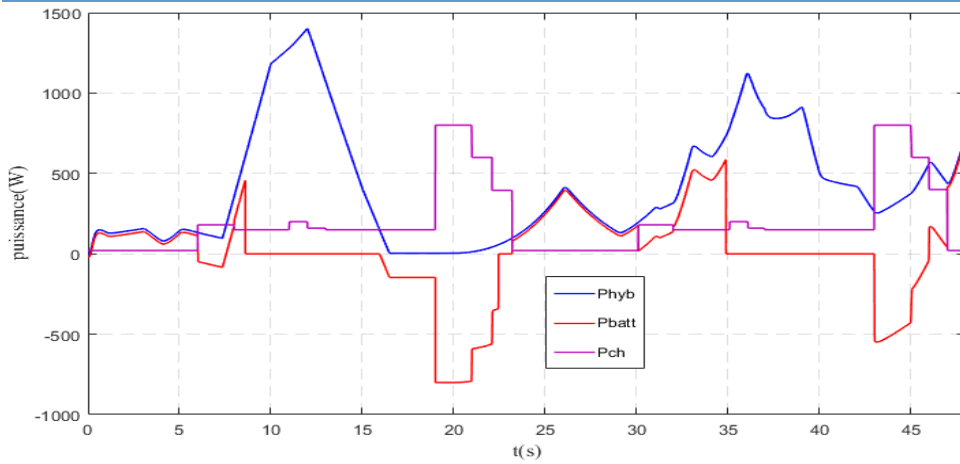


Figure IV.8 : Puissance totale demandée, puissance produite ($P_{pv}+P_{éol}$) et puissance fournie par les batteries .

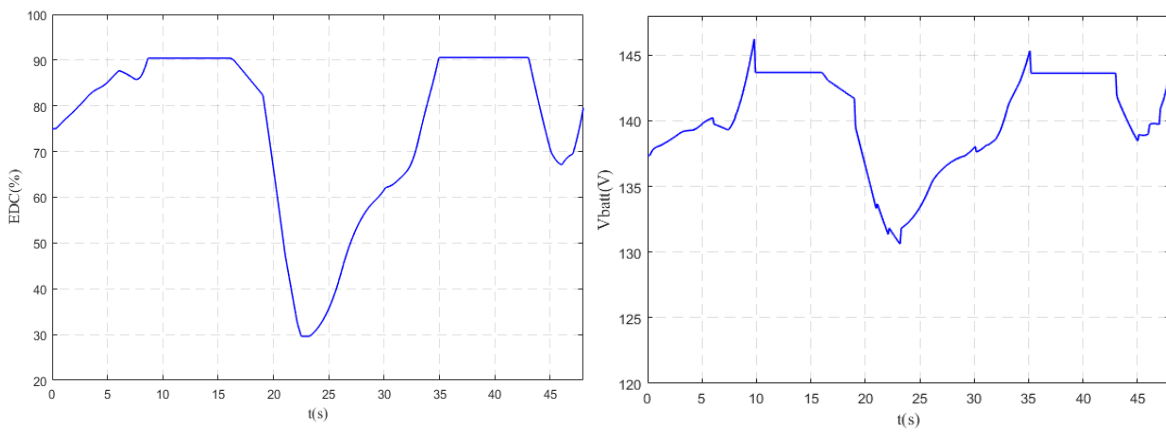


Figure IV.9: état de charge et la tension de la batterie.

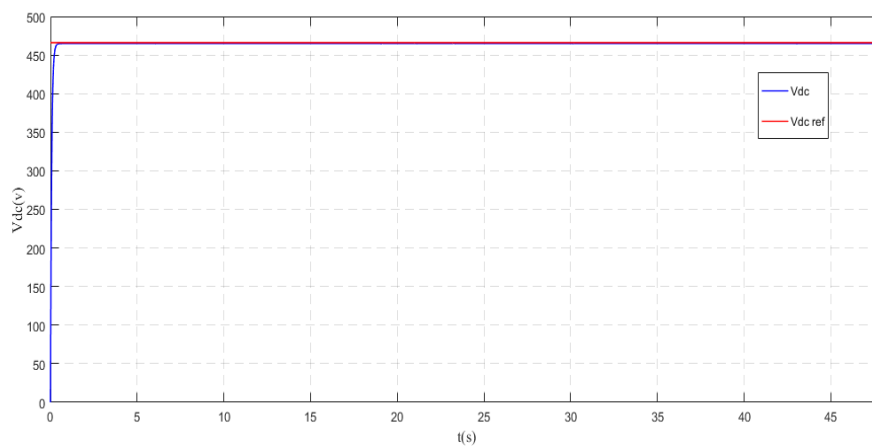


Figure IV.10: Tension du bus continu.

IV.4.2 Interprétation de résultats

En deux jours différents (Figure (IV.4-5)), les résultats de simulation obtenus dans des conditions climatiques variables sont que le premier jour a un fort ensoleillement et une faible vitesse du vent, et le deuxième jour un faible ensoleillement et une forte vitesse du vent. L'essai a également pris en compte les changements de charge au cours des deux jours (figure (IV.6)).

La figure (IV.7) montre la puissance optimale tirée par le contrôleur MPPT basé sur le contrôleur (P&O, Mppt classic) des deux générateurs (photovoltaïque, éoliennes).

Par des panneaux solaires incurvés noter que l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques varie en fonction des conditions climatiques en particulier le soleil, de sorte que la forme de la courbe obtenue est presque similaire à celle du soleil, il atteint la valeur maximale de la puissance a une relation directe avec la différence d'éclairage

Nous notons également que pour la courbe du vent, il varie proportionnellement en fonction de la vitesse du vent.

La figure(IV.8) montre les allures des différentes puissances des sources d'énergie de système hybride étudié, on remarque que : au début les batteries fournies une puissance d'une manière à satisfaire la demande de la charge avant qu'elles se déchargent au cours de temps, , et on remarque aussi que les panneaux photovoltaïques délivrent une puissance importante pendant l'intervalle de [8h à 16h],(évidement lorsque les conditions de fonctionnement optimal l'ensoleillement et la température sont adoptés),

cette puissance elle réponde au besoin énergétique de la charge, où les batteries se chargent à travers le surplus d'énergie PV, éolienne elle fournie une puissance suffisante pour alimenter la charge dans le cas où la puissance PV est insuffisante et les batteries sont déchargées. Donc notre système répond au besoin de profile de charge durant toute les deux journées.

On peut voir l'efficacité du moniteur, comme le montre la figure (IV.9), selon la disponibilité de l'énergie électrique produite par le générateur, l'état de charge de la batterie est maintenu à (30%, 90%) de la puissance totale de la batterie.

La figure(IV.11) montre le comportement de la tension au niveau du bus continu on remarque qu'elle atteint la valeur maximale qui est de l'ordre de 465 V et se stabilise autour de cette dernière durant toutes les phases de fonctionnement

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini un algorithme destiné à la gestion de l'énergie dans le système hybride étudié. Cet algorithme est basé sur l'analyse des cas de figures (situations) possible lors du fonctionnement de ce système et qui font que cette gestion soit primordiale .

L'algorithme présenté est programmé puis simulé sous Matlab/Simulink afin de vérifier son comportement dans le système étudié. Les résultats de simulations ont montré le bon fonctionnement du système étudié, ces résultats ont été présentés et commentés.

Conclusion générale

Le but de ce travail proposé dans cet mémoire est d'optimiser et de gérer l'énergie d'un système hybride a énergies renouvelables d'auto-stockage (photovoltaïque, éolien, batterie), et d'ajouter des algorithmes de gestion pour gérer, le flux d'énergies des différentes sources du système hybride.

Dans le premier chapitre de cet mémoire, nous avons rappelé différents types d'énergies renouvelables, puis décrit leur principe de fonctionnement. Différentes configurations de systèmes hybrides ainsi que leurs principaux composants ont été analysés. La combinaison choisie comprend un système d'énergie hybride constitue de panneaux photovoltaïques, d'une éolienne et de batteries de stockages.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation et la simulation numérique des différents éléments de la chaine de conversion hybride a été effectuées en utilisant le logiciel Matlab ce qui nous a permis de voir l'influence des conditions climatiques sur les sources d'énergies renouvelables, puis les résultats ont été présentés et commentés

Dans le troisième chapitre, des applications traditionnelles pour les générateurs de lumière et les éoliennes ont été présentées, afin d'améliorer la réponse du système

Le dernier chapitre récapitule la simulation des différentes configurations des systèmes hybride (éolien-photovoltaïque) raccordés au foyer isole

Comme perspective, nous espérons que notre travail de simulation de soit complété par des tests de validité sur le terrain afin de connaître les performances réelles de notre système hybride et que la modélisation que nous avons effectuée soit enrichie.

- Mise en œuvre du système étudié en temps réel
- Utiliser des moteurs diesel pour éviter toute panne de courant

Bibliographie

- [1] M. Lopez, “ Contribution A L'optimisation D'un Système De Conversion Eolien Pour Une Unité De Production Isolée ”, Thèse De Doctorat, Université De Paris-Sud, 2008.
- [2] O. Gergaud, “ Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur ”, Thèse De Doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, Décembre 2002
- [3] E. IAN BARING-GOUL, L. FLOWERS, P. LUNDSAGER « World wide status of wind-diesel application » Pre-work shop Wind-diesel, Anchorage, Alaska, 2004.
- [4] Y. Ammar, « Conception de systèmes de gestion d'énergie pour micro-systèmes autonomes », Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, France, 2006.
- [5] J.G. Mc GOWAN, J.F. MANWELLE « Hybrid/PV/Diesel system experiences » Renewable energy, 116, 928-933, 1999.
- [6] Ionel VECHIU « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », thèse doctorat en génie électrique, Université du Havre, 2005
- [7] M. ASHARI, C. V. NAYAR « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system » Renewable energy, Vol.66, No.1, PP.1-9, Elsevier Science 1999.
- [8] Z. Roumila « Commande d'un système d'énergie hybride (Photovoltaïque - éolien- diesel) », mémoire de magister de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [9] L. Croci, « gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs », Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, 2013, France.
- [10] R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2005.

Bibliographie

- [11] AoufiSaliha, <<Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque>>, Magister, université Ferhat Abbas-Setif 1-, 28/09/2014.
- [12] M. L. ELHAFYANI, S. ZOUGGAR, A. AZZIZ, M. BENKADDOU « Conception et modélisation d'un système éolien contrôlé par un régulateur de tension » Ecole supérieure de technologie, 2003.
- [13] R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2005.
- [14] S. Singer, and A. Braunstein, "A general model of maximum power point tracking" Proceedings of MELECON'85 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Madrid, Spain pp 147-151.
- [15] B. Abdelhalim, " étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire ", *Mémoire magister. Biskra, 2009.*
- [16] K. Zaouche, « Etude et Développement de Différentes Méthodes MPPT pour un Système Photovoltaïque », Mémoire de magister, USTHB, 2011.
- [17] A. Mirecki. « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [18] H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 18 Décembre 2003.
- [19] J. Martin « Energies éoliennes », Technique de l'ingénieur B1360, 1990.
- [20] L. Chang, « Systèmes de Conversion de l'Énergie Éolienne », IEEE Canadian Review, pp. 1 – 5, 2002.
- [21] A. J. Dhers « 10 questions sur le stockage de l'énergie électrique » académie des technologies commission énergie et environnement, 2006.

Bibliographie

- [22] J. Kauv, J. Bonal et P. Odru «Stockage inertiel de l'énergie » technique de l'ingénieur.
- [23] J. F. colson « Modélisation de l'état de charge des batteries de véhicules électrique » mémoire d'ingénieur civil électricien et mécanicien, université de liège, Belgique, 1998.
- [24] A. Payman « Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multisourcesmulti-charges » thèse de doctorat génie électrique, l'institut national polytechnique lorraine, Nancy université, France, 2009
- [25] S. Ben smail, D.REKIOUA « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » International Congrès on Télécommunication and Application, Bejaia, Algeria 11-12 April 2012.
- [26] L. PROTIN, S. ASTIER «Convertisseurs photovoltaïques » Technique d'ingénieur, D3360, 2003.
- [27] A. LABOURET, M. VILLOZ «Energie solaire photovoltaïque » Le manuel du professionnel, Edition, DUNOD, Paris, 2003.
2002.
- [28] Touahri.A, «Application de la DTC à un aérogénérateurAsynchrone double alimentation», mémoire de magister, option : Machines Electriques, L'universitéBatna 2, 2016.
- [29] ROUABHI Riyadh, «Contrôle des puissancesgénérées par un systèmeéolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée», Thèse de doctorat, option : CommandeElectrique, UNIV de Batna2, Algérie, 2016.
- [30] MayoufMessaoud, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateursynchrone à aimants permanents », Mémoire de magister, option : Energierenouvelables, UNIV de Batna, Algérie, 2008.
- [31] LATRECHE Mohammed Tahar, «CommandeFloue de la Machine Synchrone à AimantPermanant (MSAP) utiliséedans un systèmeéolien», Mémoire de magister, option : CommandeElectrique, UniversitéFerhat Abbas de Setif, Algérie, 2012.

Bibliographie

- [32] K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [33] A. Abdelli, <<Optimisation Multicritères d'une chaîne éolienne passive >>, Thèse de Doctorat en Electrotechniques, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [34] Dr. Gary L. Johnson, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.
- [35] Guy Cuntz, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aix-en-Provence, 2001, www.edisud.com.
- [36] Maghuel S, «Contribution à l'amélioration et la commande d'une turbine éolienne» mémoire de magistère, option : Électrotechnique, UNIV du 20 août 1955 – Skikda, Algérie.2012
- [37] Nicolas LAVERDURE, «l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Électrique, Institut national polytechnique de Grenoble, décembre 2005.
- [38] Mokrane S, «Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération», Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [39] Heier S.: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. 1998.
- [40] Tarak.Ghennam«' Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique. Apports des convertisseurs Multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de la machine asynchrone à double alimentation.»' Thèse de doctorat. Ecole militaire polytechnique Alger. Ecole centrale de Lille - 2011.
- [41] LOUAR.F, «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent», Thèse de doctorat, option : Gestion et Qualité de l'Énergie Électrique, Université Baji- Mokhtar Annaba, Algérie, 2016.

[42] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri, 2010.

[43] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada «“Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions»”, IEE Proc. Generation Transmission Disturb. 142 (1) (1995), pp. 59–64.

[44] ROUMILA ZOUBIR« commande d'un système hybride (photovoltaïques-éolien – diesel)», mémoire de magister de l'université de béjaia.2009.

[45] H. Maker « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile a combustible et super condensateurs », thèse de doctorat de l'université de technologie Belfort Montbéliard, 2008.

1. Parametre de generateureolien[37]

Vitesse du vent moyenne $V_{moy}=8$ m/s ;

Masse volumique de l'air : $\rho= 1.225$ (Kg/m).

- Paramètres de la turbine**

Puissance nominale : $P_n =1$ kW ;

Rayon de la turbine : $R_t =1.05$ m ;

Vitesse du vent maximale: $V_{vmax} =12$ tr /mn ;

Vitesse du vent minimal: $V_{vmin} =3$ tr /mn ;

Moment d'inertie : $J=0.021$ Kg.m²;

Frottement : $f=0$;

Le gain de multiplicateur $G=1$;

- Caractéristique de la génératrice synchrone à aiment permanent [37]**

R_s	0.5Ω
L	0.016 H
Flux	0.148 Wb
P	17

2. Paramètres de la batterie plomb-acide [21]

Capacité de batterie : $C_{bat}= 260$ Ah

Tension au borne de la batterie : $V_{bat} = 12$ V;

La résistance interne de la batterie : $R_s = 4$ m Ω .

Résumé :

L'utilisation d'énergies renouvelables pour produire de l'électricité est une option énergétique prometteuse qui peut répondre à la demande mondiale croissante d'énergie, mais en raison de son caractère aléatoire, elle ne peut garantir un approvisionnement continu. La combinaison de plusieurs types d'énergies renouvelables (éoliennes, cellules photovoltaïques) et de batteries de stockage semble être la solution idéale. Pour résoudre ce problème, ce travail part de deux aspects: choisir la configuration la plus adaptée pour maximiser l'utilisation de l'énergie.

Dans ce cas, les différents éléments du système hybride seront modélisés et simulés. Maximiser l'utilisation des deux ressources renouvelables nécessite un algorithme MPPT pour atteindre une efficacité énergétique maximale. L'efficacité d'un système hybride dépend fondamentalement de la maîtrise des différentes tailles de composants. Nous postulons pour la charge du système.

Mots clés: système électrique hybride, photovoltaïque, énergie éolienne, batterie, MPPT, gestion de l'énergie, charge.

Abstract :

The use of renewable energy to generate electricity is a promising energy option that can meet the growing global demand for energy, but because of its random nature, it cannot guarantee a continuous supply. The combination of several types of renewable energy (wind turbines, photovoltaic cells) and storage batteries seems to be the ideal solution. To solve this problem, this work starts from two aspects: choosing the most suitable configuration to maximize the use of energy.

In this case, the different elements of the hybrid system will be modeled and simulated. Maximizing the use of both renewable resources requires an MPPT algorithm to achieve maximum energy efficiency. The effectiveness of a hybrid system depends fundamentally on controlling the different sizes of components. We postulate for the load of the system.

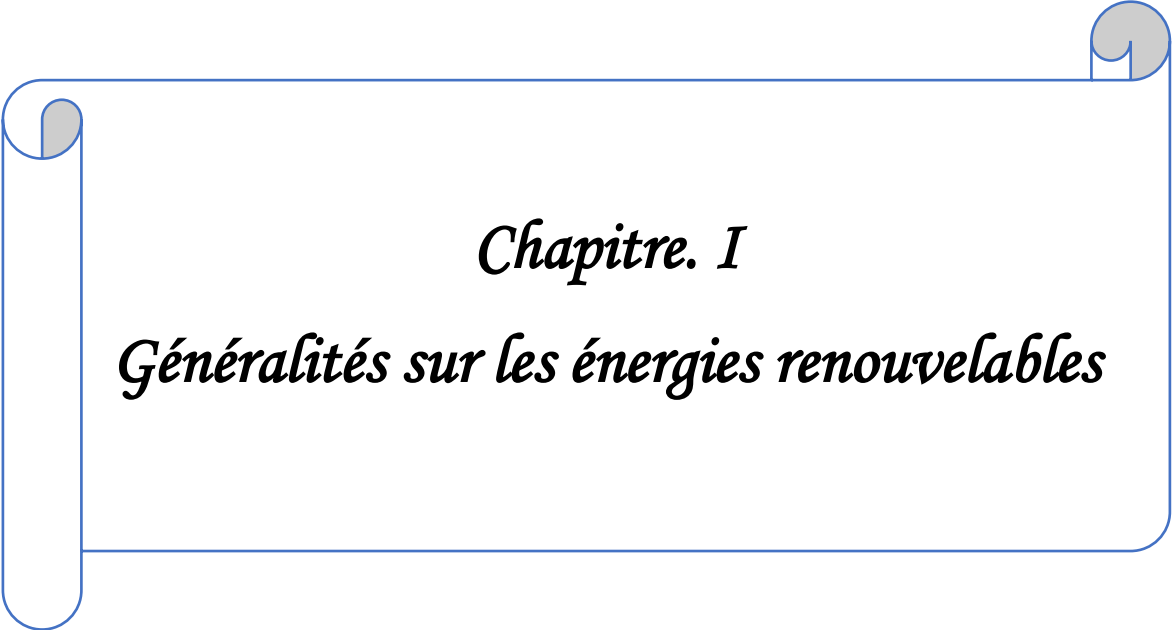
Keywords: hybrid electric system, photovoltaic, wind power, battery, MPPT, energy management, charge.

المخلص:

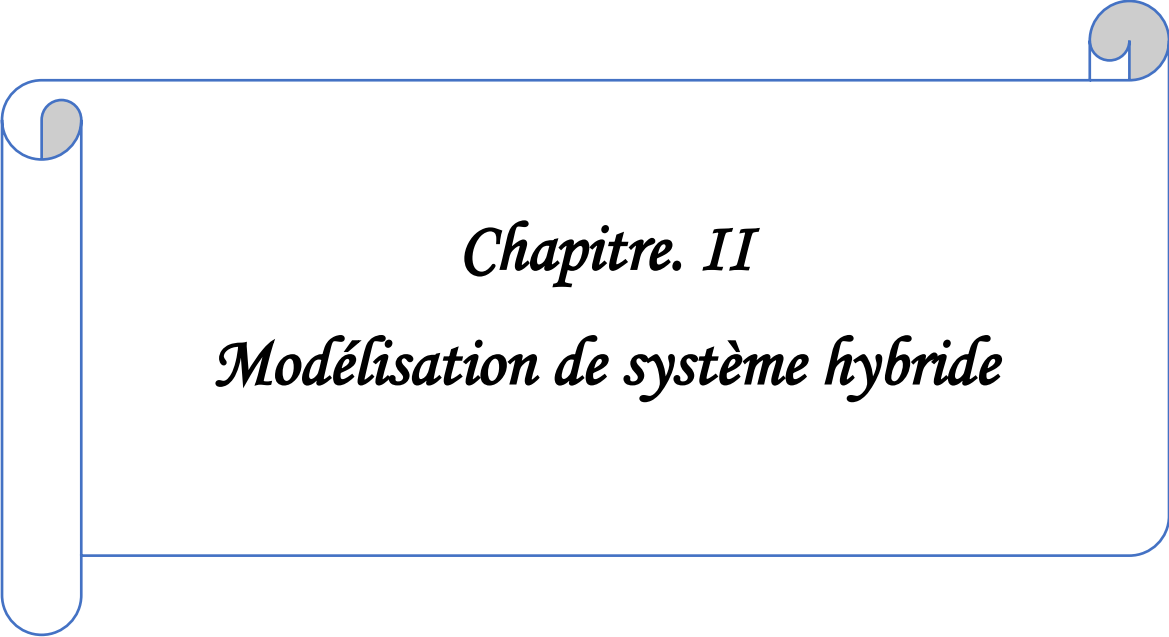
إن استخدام الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء هو خيار واعد للطاقة يمكن أن يلبي الطلب العالمي المتزايد على الطاقة، ولكن بسبب طبيعته العشوائية، فإنه لا يمكن أن يضمن إمدادات مستمرة. ويبدو أن الجمع بين عدة أنواع من الطاقة المتجددة (توربينات الرياح والخلايا الكهروضوئية) وبطاريات التخزين هو الحل المثالي. لحل هذه المشكلة، يبدأ هذا العمل من جانبين: اختيار التكوين الأكثر ملاءمة لتعظيم استخدام الطاقة.

في هذه الحالة، سيتم تصميم العناصر المختلفة للنظام المختلط ومحاكاة. ويتطلب تعظيم استخدام كل من الموارد المتجددة خوارزمية لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة في استخدام الطاقة. تعتمد فعالية النظام المختلط بشكل أساسي على التحكم في أحجام MPPT المكونات المختلفة. نحن نفترض لتحميل النظام.

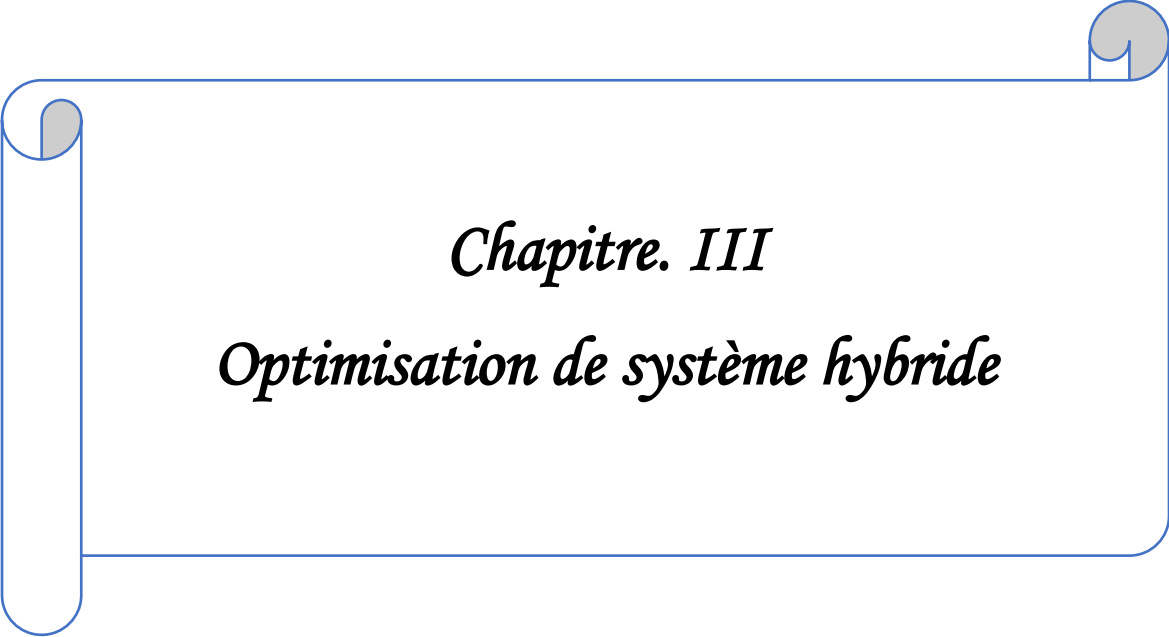
الكلمات الرئيسية: نظام هجين كهربائية، كهروضوئية، طاقة الرياح، البطارية، وإدارة الطاقة، شحنة.

A decorative graphic of a scroll with a blue outline and grey shading on the rolled-up ends, framing the chapter title.

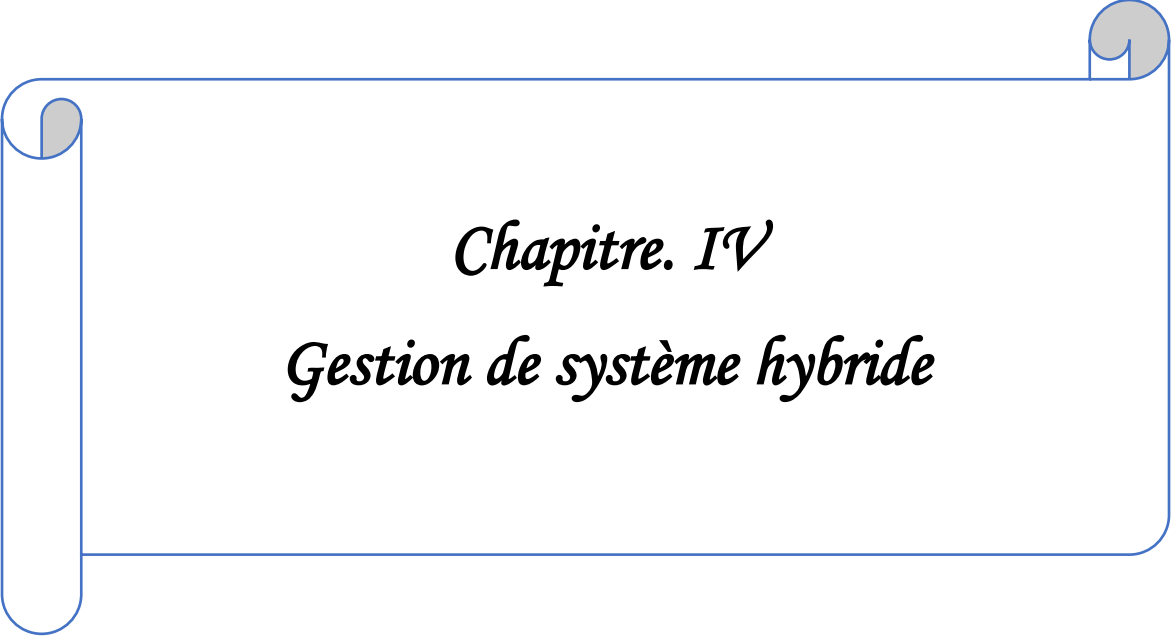
Chapitre. I
Généralités sur les énergies renouvelables



Chapitre. II
Modélisation de système hybride



Chapitre. III
Optimisation de système hybride



Chapitre. IV
Gestion de système hybride



Liste des figures



Liste des tableaux



Sommaire



Annexe



Bibliographie



Conclusion générale



Introduction générale



Nomenclature