



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Ahmed Ben محمد بن أحمد 2 جامعة وهران

Université d'Oran 2 Mohamed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité :

Ingénierie de la maintenance en instrumentation

Thème

Commande Intelligente d'un système hybride pour la production d'énergie électrique

Présenté et soutenu publiquement par :

BELKAOUSSA AMEL & MAMOUN KHADRA

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
NEKROUF Djillali	MAA	IMSI	Président
BELKACEM Belkacem	MCA	IMSI	Encadreur
BOUHAMRI Nouredine	MCA	IMSI	Examineur

Année 2023/2024

REMERCIEMENT

Mes remerciements vont premièrement à Allah le tout puissant pour la volanter, lapatiente la santé qu'il me donne durant tout d'étude.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadrant de mémoire, Mon-sieur BELKACEM, Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les chercheurs et spécialistes, trop nombreux pour les citer, qui ont pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ces échanges m'a aidé à faire avancer mon analyse.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté à ce travail.

Enfin nous remercions toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toutes ces années d'étude.

Dédicaces

A mes très chers parents mon papa, ma maman, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte, papa tu es une vraie école de la vie, je ne cesse d'apprendre tous les jours avec toi, maman, prunelle de mes yeux, mon puits de tendresse, d'amour et de sécurité, vous êtes tous les deux la source de ma force, ma muse et mon espoir que dieu vous garde

A ma grand-mère ACHOURA, à ma tante MOKHTARIA à qui leur souhaitent longue vie.

A mon frère ABDELKHALEK, mes sœurs KHADIDJA, ASSIA, IKHLAS. A ma binôme KHADRA.

A ma cousine KHEIRA.

A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études et toute ma vie.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chère parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

À mes très chers frères

À ma chère amie Amel

À tous mes amis, chaque en son nom

À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce mémoire À tous ceux qui sont chers.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	
CHAPITRE 01. PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE	
I.1. Définition et missions des systèmes hybrides multi-sources.....	1
I.2. Architectures d'un système hybride	2
2.1. Architecture série	2
2.1.1. Configuration à bus à courant continu	2
2.1.2. Configuration à bus à courant alternatif AC	3
2.1.3. Configuration mixte à bus à CC/CA.....	3
2.2. Architecture parallèle	4
II.3. Composants essentiels d'un système hybride.....	4
3.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle	4
3.1.1. Système photovoltaïque / source conventionnelle	5/6/7/8
3.2. Systèmes hybrides sans source d'énergie conventionnelle	9
I.4 Générateur éolien	10
I.5. Source d'énergie photovoltaïque	11
I.6. Convertisseurs	12
I.7. Système de stockage	13
I.8. Le système de supervision.....	13
I.9. Conclusion	14
CHAPITRE 02. ETUDE ET MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE	
II.1. Introduction	15
II.2. Définition de l'énergie éolienne	16
II.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	16/17
II.4. Différents types d'éoliennes.....	18
4.1. Eoliennes à axe vertical	18
4.2. Eoliennes à axe horizontal	19
II.5. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	20
5.1. La tour (ou le mât).....	21
5.2. La nacelle.....	22
5.3. Le rotor.....	22
5.4. Le multiplicateur.....	23
5.5. La génératrice.....	24
5.6. Le système de contrôle-commande (Le contrôleur électronique)	24
5.7. La cabine de dispersion	24
II.6. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne	24
6.1. Les systèmes à vitesse constante	24
6.2. Les systèmes à vitesse variable	25
II.7 Modèle aérodynamique	26
7.1. Modèle du vent	26
7.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	26/27/28/29/30
II.8 Stratégies de MPPT pour une éolienne	31
8.1. Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique Cp.....	31
8.2. Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp	32

II.9	Modélisation du système éolien	32
9.1	Modèle de la turbine.....	33
9.2	Modèle du multiplicateur.....	34
9.3	Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	34
II.10	Présentation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents MSAP	35
10.1	Principe de fonctionnement des MSAP	36
10.2	Modélisation de la MSAP	37
10.3	Hypothèses simplificatrices	37
10.4	Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc.....	38
10.4.1	Equations électriques	38
10.4.2	Equations magnétiques	38
10.4.3	Equations mécaniques	39
10.4.4	Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q).....	39
10.4.5	Expressions des tensions.....	41
10.4.6	Expressions des flux	42
10.4.7	Expressions de la puissance et du couple	42
10.5	Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG	43
II.11	État de l'art du système photovoltaïque	43
II.12	Notion d'effet photovoltaïque.....	44
II.12	Principe de la génération photovoltaïque	45/46
II.13	Modélisation d'une cellule photovoltaïque	47
13.1	Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque	48
13.2	Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	49
13.2.1	Courant de court-circuit	49
13.2.2	Tension à vide	50
13.2.3	Notion de Facteur de forme	50
13.2.3	Rendement	50
II.14	Module photovoltaïque	51
14.1	Mise en série.....	51
14.2	Mise en parallèle	52
II.15	Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.....	52
II.16	Conclusion	55

CHAPITRE 03. RESULTATS DE SIMULATION

II.1	Introduction.....	57
III.2	Simulation de la chaine globale.....	57
2.1	Présentation de la chaine de conversion éolienne.....	58
2.2	Présentation de la chaine de conversion photovoltaïque	59
III.3	Stratégie de contrôle du système par la logique floue	60
3.1	Principe et éléments de la logique floue.....	61
3.2	Structure interne d'un système floue	63
III.4	Application de la logique floue pour la commande du hacheur	65
III.5	Résultats et interprétations	66
III.6	Conclusion.....	73
	CONCLUSION GENERALE.....	76

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Une grande partie de la consommation mondiale d'énergie est assurée par les énergies d'origines fossiles (pétrole, gaz, ...). La consommation excessive de ces ressources énergétiques limitées, conduit à l'épuisement progressif de ces réserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre et donc la pollution de l'atmosphère qui cause un changement climatique. Face à ces conséquences, il est nécessaire de prendre en considération le développement des énergies alternatives dites sources d'énergies renouvelables. Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont des ressources naturelles accessibles et exploitées pour générer de l'énergie électrique. Leur flexibilité, leur simplicité d'utilisations et la multiplicité des domaines d'activités les ont rendues des énergies indispensables.

La plus grande part des gisements énergétiques mondiaux est consacrée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. En revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [Lop 08]. En troisième place nous trouvons le nucléaire. Certains pays produisent l'essentiel de leur électricité à partir des barrages et aux cours d'eau. Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle nous le trouvons avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie [Ben 12].

Dans le monde entier les chercheurs incitent à changer la vision ancienne pour la production d'électricité, ils appellent aux ressources d'énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Dans ce contexte, ces énergies sont appelées à remplacer les autres ressources fossiles et le nucléaire afin de répondre aux exigences actuelles [Bor 96]. En effet, leur utilisation est une solution inépuisable, non polluante et bien adaptée à la production décentralisée.

Cependant les énergies solaire et éolienne présentent un inconvénient commun défini par leur caractère aléatoire et leur dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps [Yan 08]. Afin de pallier à cet inconvénient, les chercheurs approuvent l'utilisation des systèmes hybrides dans le but de combiner plusieurs sources

d'énergies renouvelables pour assurer une alimentation continue quelques soient les conditions climatiques et météorologiques.

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est un système multi-sources qui combine différents types de sources d'énergie distribuées (PV, éolienne, piles à combustibles, générateur diesel, etc.) et/ou des dispositifs de stockage d'énergie. Ce type de système peut opérer en mode connecté au réseau ou en mode autonome selon le type d'application. Les systèmes de production hybrides permettent alors de s'affranchir de la limitation du caractère aléatoire des SERs tout en améliorant l'efficacité énergétique [1-3].

Dans ce mémoire nous proposons d'améliorer la gestion des flux énergétiques et d'optimiser les performances des schémas de commande des SEHs en utilisant la logique floue

La logique floue suscite actuellement un intérêt général auprès des chercheurs et des industriels, et plus généralement auprès de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, des généraliser des modes de raisonnements naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine, de construire des systèmes artificiels effectuant des tâches habituellement prises en charge par les humaines. En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles. [1],[2]

Ces techniques ont fait leurs preuves dans d'autres applications et nous voulons à travers notre travail montrer la possibilité d'optimiser le fonctionnement des SEHs pour différents scénarios.

Pour cela, notre travail, sera structuré comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire commence par une présentation de la définition et de la mission du système multi-sources. Nous nous penchons sur la définition et l'énoncé de mission de ces systèmes, avant de passer à un examen de leur état actuel de progression qui est le sujet principal de cette étude. Différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources renouvelables en site isolé sont également présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre expose la modélisation de l'ensemble des composants du système multi-sources dans le but d'analyser la dynamique du comportement global du système.

Ensuite un dimensionnement des différents sous-systèmes a été fait afin de concevoir une configuration optimale. Toutes les simulations ont été effectuées par le logiciel

Matlab/Simulink nous permettant de prédire les comportements dynamiques de chaque sous-système hybride ; de la modélisation et la simulation des caractéristiques de base du générateur PV, de l'éolien, des convertisseurs et des batteries-charge continue pour une charge isolée.

Enfin, on termine notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives d'études développées de notre système de génération d'énergie.

CHAPITRE I
PRESENTATION DU SYSTEME
HYBRIDE

I.1. Définition et missions des systèmes hybrides multi-sources :

Un système hybride est donc une installation qui combine différentes sources d'énergie, conventionnelles et renouvelables, pour produire de l'électricité de manière continue tout en maximisant l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelable ont une production d'énergie variable, donc leur association avec des sources conventionnelles permet d'assurer une production d'électricité constante.

Les systèmes hybrides offrent un niveau élevé de sécurité énergétique grâce à la combinaison de méthodes de production et intègrent souvent un système de stockage (batterie, pile à combustible) ou un petit générateur combustible fossile pour assurer une fiabilité et une sécurité maximales de l'approvisionnement. Les systèmes hybrides d'énergie renouvelable deviennent populaires en tant que systèmes d'alimentation autonomes pour fournir de l'électricité dans les régions éloignées en raison des progrès des technologies d'énergie renouvelable et de la hausse subséquente des prix des produits pétroliers.

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. La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. [3]

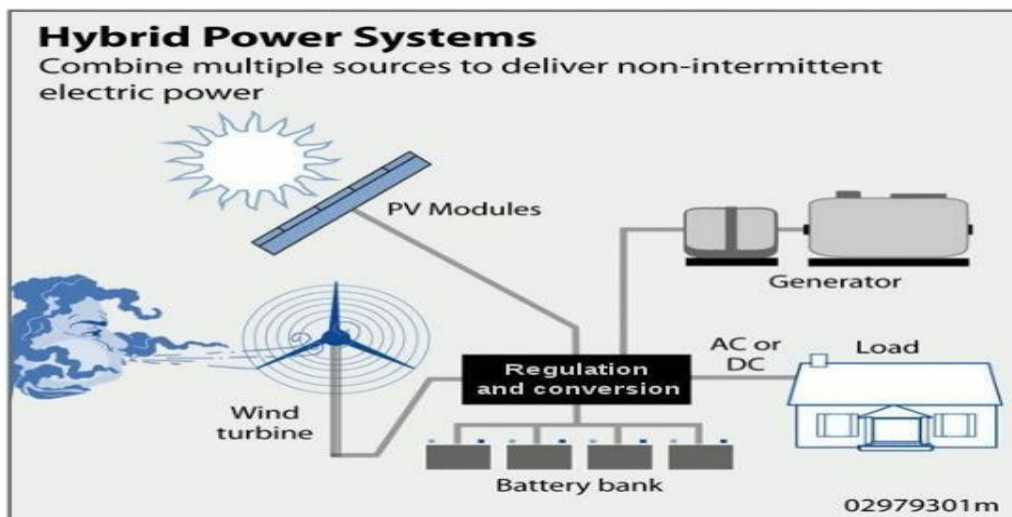


Figure I.1. Système d'alimentation hybride

I.2. Architectures d'un système hybride :

Les systèmes hybrides peuvent être classés en deux groupes :

- Les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, ils sont connectés au réseau.
- Les systèmes hybrides fonctionnant en régime isolé ou en mode autonome. Ils alimentent des clients situés dans des régions isolées ou sites éloignés du réseau électrique.

2.1. Architecture série :

On rencontre trois types d'architectures, Il existe différentes structures pour un système hybride, nous considérons dans ce travail un système composé d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne et de batteries de stockage : [4]

2.1.1. Configuration à bus à courant continu :

Dans le cas d'une architecture série, toutes les sources sont connectées à un même bus à courant continu (CC) comme l'indique la figure (I.2). Pour cette architecture, les tensions délivrées par les modules à courant alternatif (générateur éolien et groupe Diesel) sont redressées en tension continue grâce à des convertisseurs AC/DC. La charge est alors alimentée par un onduleur (convertisseur DC/AC). [5]

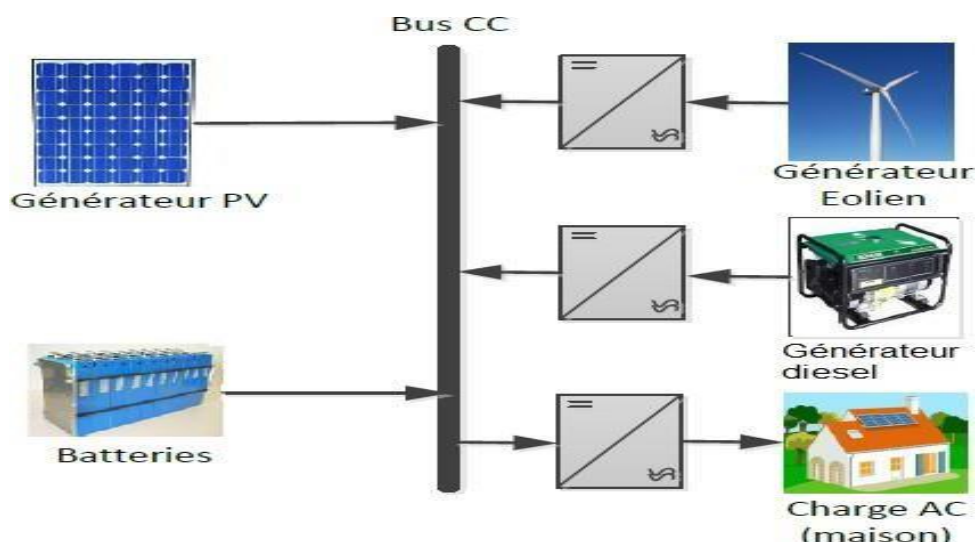


Figure I.2. Configuration d'un système hybride à bus CC.

2.1.2. Configuration à bus à courant alternatif AC :

Cette structure contient un vecteur AC afin que toutes les unités du système hybride y soient connectées, et c'est un bon choix en raison de son abondance de tension alternative continue et continue, en plus de l'émergence de transformateurs plus efficaces. Dès qu'il y a une coupure de courant dans le bus, il démarre automatiquement le groupe électrogène, mais son seul point négatif est la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus. [6]

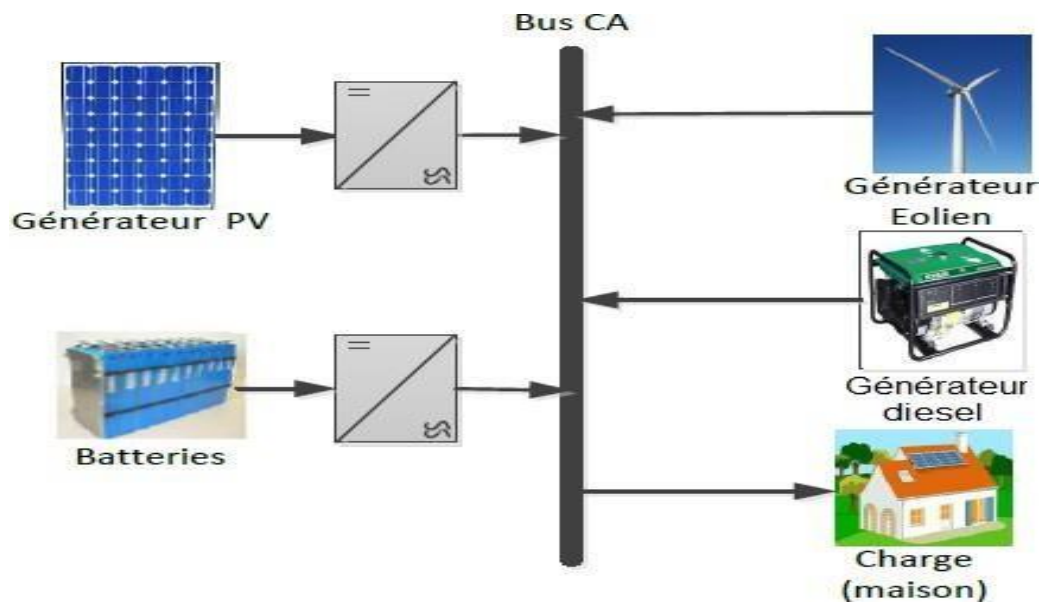


Figure I.3. Configuration d'un système hybride à bus CA.

2.1.3. Configuration mixte à bus à CC/CA :

Un bus DC connectant la source d'alimentation DC (batterie et panneaux photovoltaïques) et le bus AC connectant l'éolienne, le générateur diesel et la charge (maison). Les deux bus sont connectés à l'aide d'adaptateurs bidirectionnels. Lorsque le générateur diesel répond à la demande de l'ensemble de la charge et participe à la charge de la batterie, le convertisseur bidirectionnel fonctionne en mode redresseur, ou en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par le panneau et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être exploitée par les deux bus en même temps. [7]

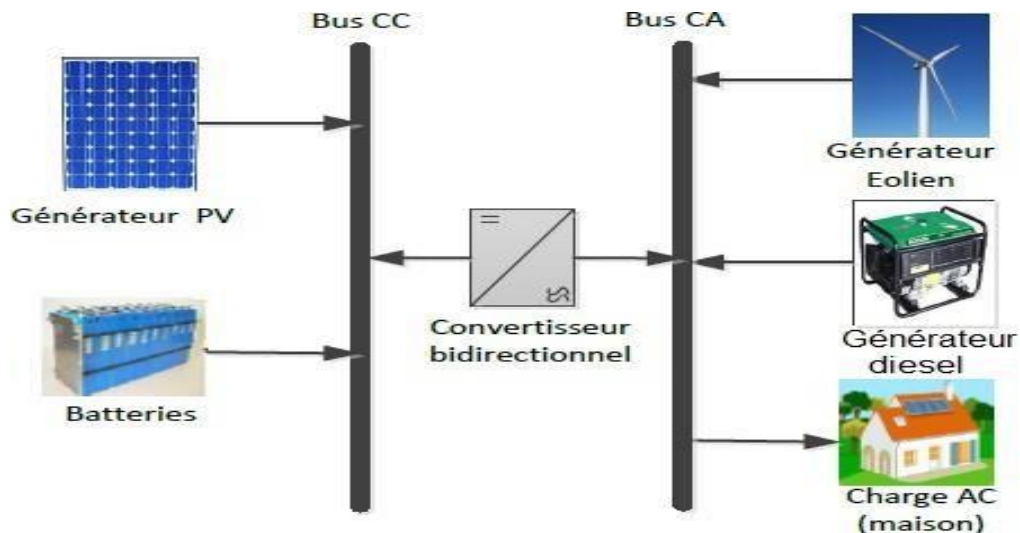


Figure I.4. Configuration d'un système hybride à connexion parallèle.

2.2. Architecture parallèle :

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus CC où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux PV), et un bus CA sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe diesel et la charge (maison). Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel. Le convertisseur bidirectionnel travaille soit en mode redresseur lorsque le générateur diesel couvre complètement la demande de la charge et participe à charger la batterie, soit en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par les panneaux et/ou les batteries. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. L'architecture d'un tel système est représentée par la figure (I.4). [8]

I.3. Composants essentiels d'un système hybride :

L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ainsi que l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables souvent utilisées dans les systèmes hybrides. Ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs, les batteries pour le stockage de l'énergie, les charges principales et les charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour avoir un système équilibré qui permet d'atteindre un but précis.

3.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle :

C'est une structure dotée d'une source d'énergie conventionnelle définie généralement par un générateur diesel et une autre source d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne,...etc.). [9]

3.1.1. Système photovoltaïque / source conventionnelle :

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud comme par exemple l'Arabie saoudite, Adrar, le Maroc, les Maldives, la Corse etc., où le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison, un bâtiment de logements ou administratif ou un village. D'autres systèmes alimentent des centres de recherche ou sont également connectés au réseau électrique.

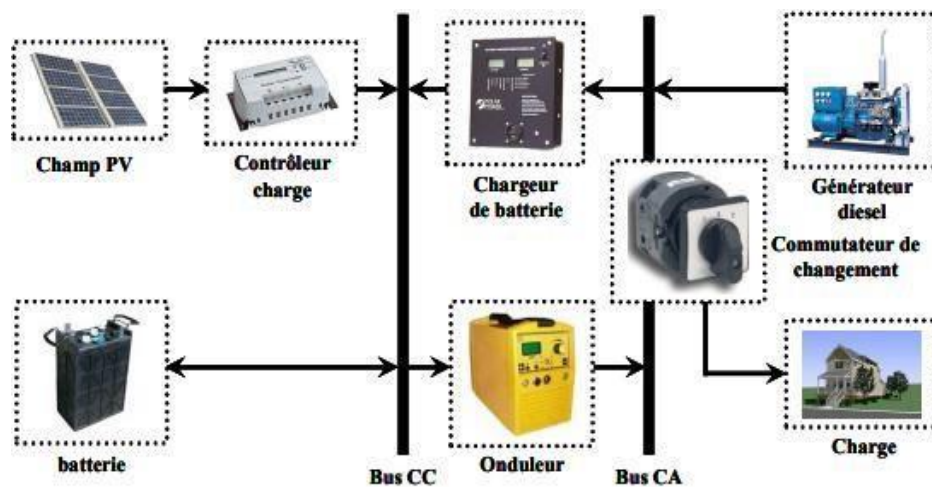


Figure I.5. Système hybride avec connexion en série

Un dimensionnement facile du générateur diesel ; Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ; La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique ; Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur et la fréquence sont convenables. Les inconvénients sont : L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel.

C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible. La batterie doit avoir une grande capacité. Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur, Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques désavantages. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur. L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur diesel peut charger la batterie par l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride. Le schéma du système est présenté sur la (Figure I.6).

Les avantages de cette configuration sont :

Le système possède un rendement plus haut, parce que le générateur diesel peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de fuel ; L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur ; Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel. Les inconvénients sont :

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation ressources
- Le générateur et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors les périodes de faible charge ;
- Une construction complexes

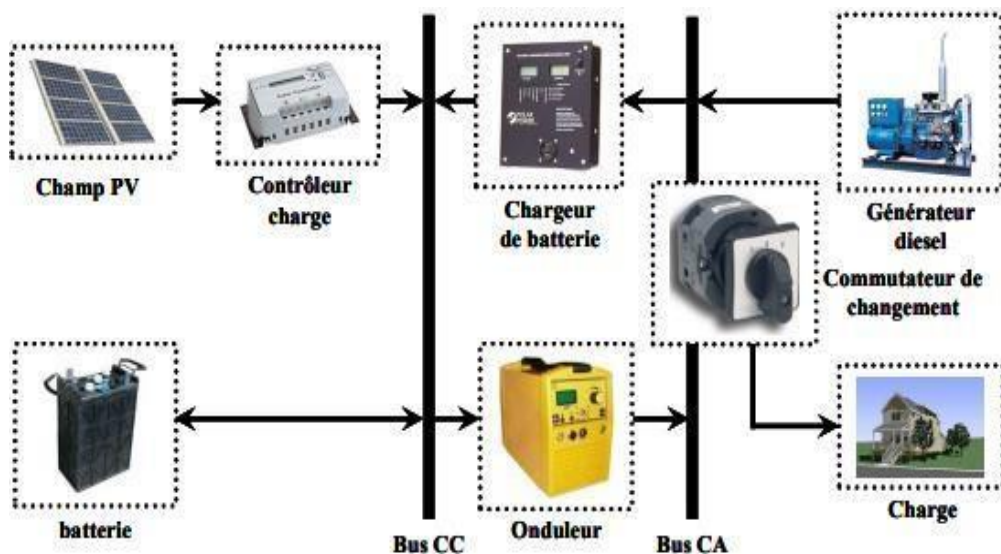


Figure I.6. Système hybride à commutation.

La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus – de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure (I.7). [10]

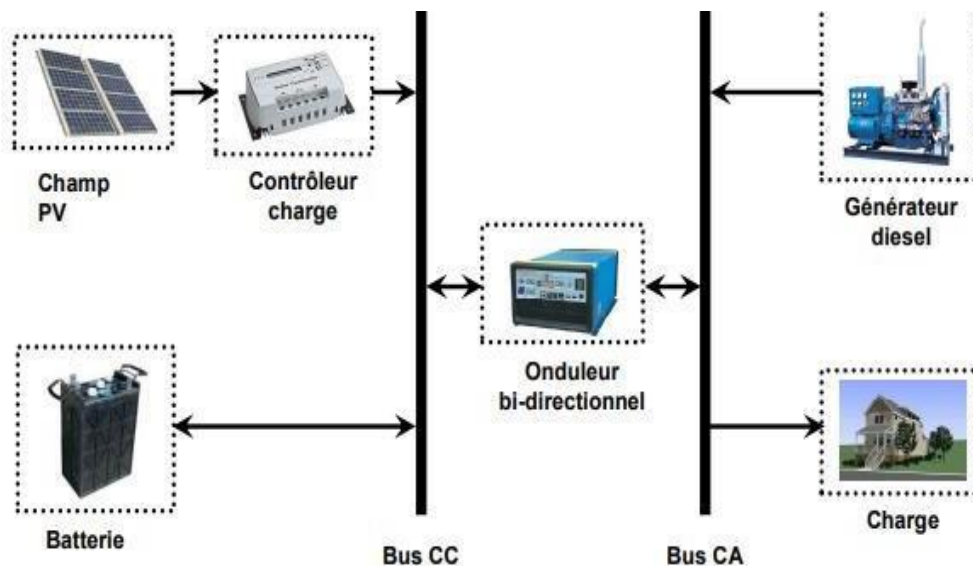


Figure I.7. Système hybride à connexion parallèle.

Les avantages de cette configuration sont :

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel ;

- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride ;
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge ;

Les inconvénients de la configuration sont :

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible ;
- Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié ;
- Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur) ;
- Le bus continu est plus difficile à contrôler.

Systèmes éolien/source conventionnelle :

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel. De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride. Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles – petites comme les îles Canari.

Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel :

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie. Une partie des travaux est orientée vers des systèmes installés.

On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York ou en Arabie saoudite. D'autres auteurs optimisent la configuration du système

selon divers critères : probabilité de perte de charge, combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles auxquels s'ajoute la charge non satisfaite minimale. Pour trouver le système optimal on utilise des algorithmes de Pareto, des algorithmes génétiques et évolutifs ou de la logique floue.

3.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle :

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe sont présentées quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage. [11]

Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage :

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux.

Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse), d'autres de dimensionnement optimisé des composants du système. Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation. Présentent des résultats de 6 systèmes d'une puissance totale de 86,3 kW. Présentent des résultats de systèmes hybrides implantés dans des centres de recherche.

Le stockage est parfois idéal, un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie ou électrolyseur et super condensateur. L'utilisation de super condensateurs est de conception très récente et sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en termes de quantité stockée mais plus lent.

Système hybride éolien/stockage :

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, cas des Etats-Unis, ou de faible taille

Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage :

L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs désavantages comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie.

Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage :

Ce type de système hybride s'utilisent très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation – il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares. On a pu trouver des travaux sur un système existant utilisé dans un but éducatif en Noether Iowa, Etats-Unis; un projet de système hybride pour le réseau électrique d'une île Croate, une estimation des performances se base sur l'hypothèse d'une complémentarité des énergies du vent et soleil.

De cette façon, le système fournira toujours de puissance dans le réseau électrique 15 insulaire. Son argumentation est d'ordre économique.

I.4. Générateur éolien :

Un générateur d'air ou une éolienne, est un appareil qui capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie électrique. Le vent fait tourner les pales rotatives d'une éolienne connectée à un générateur, pouvant ainsi produire de l'électricité. Ils sont soit stockés dans des batteries, soit envoyés directement sur le réseau.

Différentes topologies de connexion d'éolienne aux systèmes hybrides isolés sont proposées dans la littérature. Le choix du convertisseur se fait selon l'architecture du système hybride et le bus sur lequel l'éolienne est connectée, mais aussi selon les objectifs que l'on souhaite réaliser. Néanmoins, deux configurations figurent parmi les plus utilisées dans les systèmes hybrides isolés. L'architecture de ces deux topologies est illustrée par la figure (I.8).

Ces architectures permettent d'adapter la forme de l'onde produite par la génératrice éolienne au bus auquel elle est connectée. Ici en l'occurrence pour une connexion au bus CC deux solutions sont possibles: l'association d'un redresseur à diodes et un hacheur (architecture (a)) permettant d'avoir une seule variable de commande à gérer, ou le redresseur MLI permettant d'utiliser un seul convertisseur. [12]

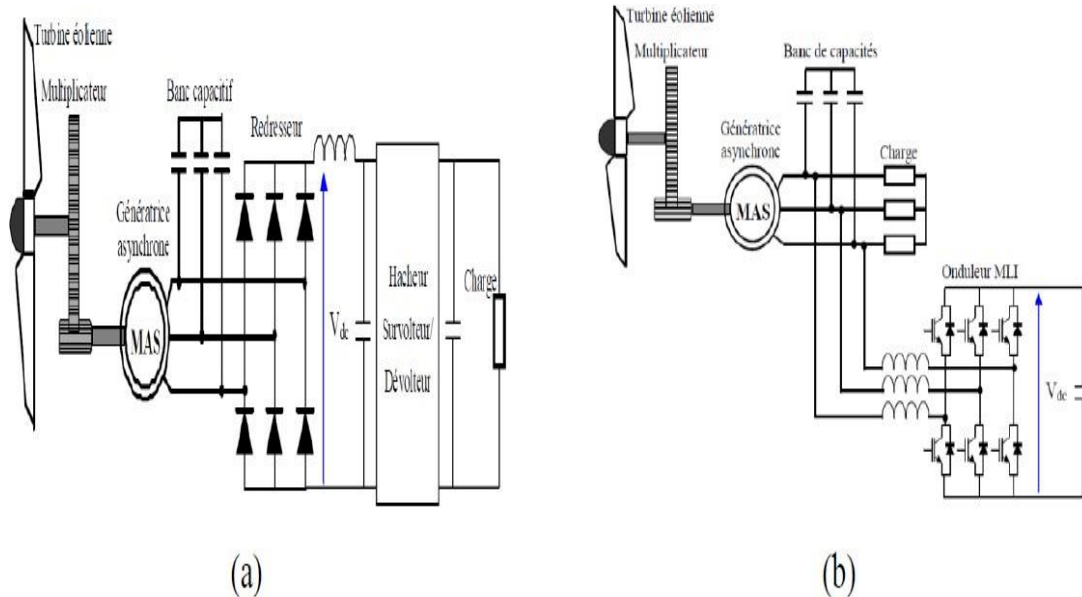


Figure I.8. Convertisseurs utilisés en étage d'adaptation : (a) Redresseur à diodes + hacheur, (b) Redresseur MLI.

I.5. Source d'énergie photovoltaïque :

Une cellule galvanique constituée d'un matériau semi-conducteur peut convertir l'énergie photonique reçue à sa surface en une différence de potentiel, qui est créée en délocalisant les électrons dans le matériau. Le spin de l'électron dans le circuit à l'extérieur de la cellule photovoltaïque lui permet de jouer le rôle de générateur. Les cellules photovoltaïques sont fusionnées pour former des modules photovoltaïques, qui peuvent produire une certaine quantité d'énergie dans différentes conditions d'éclairage et de température. Ensuite, les modules PV peuvent être assemblés séquentiellement pour former un générateur PV. Elle est mesurée en fonction de la puissance requise pour une installation particulière. [13]

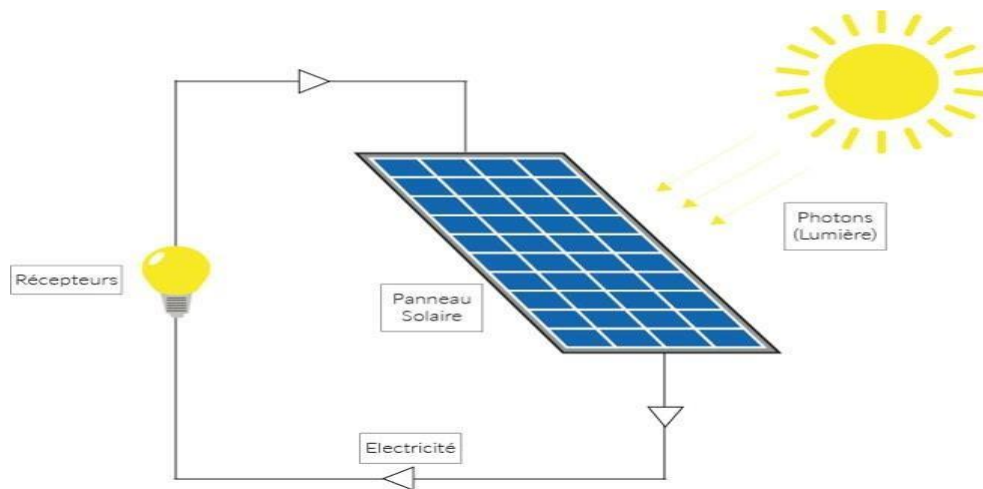


Figure I.9. Principe du fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque .

I.6. Convertisseurs :

Les convertisseurs servent en premier lieu à charger les batteries de stockages et faire la conversion électrique en deuxième lieu (CA/CC ou inversement). Dans la structure des systèmes hybrides, on trouve trois types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs.

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. 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 sont des convertisseurs CC/CA. Ils sont souvent utilisés pour alimenter des charges à CA.
- Les hacheurs sont des convertisseurs qui permettent de réaliser la conversion CC /CC pour adapter la tension entre deux sources. [13]

I.7. Système de stockage :

Le dispositif de stockage est un élément essentiel dans un système hybride, car il stocke l'énergie excédentaire produite par les sources (énergie électro-photovoltaïque, énergie éolienne) pour être exploité à un autre moment lorsque la production d'énergie est faible, car il joue un rôle important rôle dans la continuité de la présence des forces à tout instant, avant tout Cela nécessite que l'énergie produite par les sources soit compatible avec le groupe d'énergie consommée par l'utilisateur et absorbée par le système lui-même .

Comme il ne garantit pas une production d'énergie importante à tout moment, il se peut qu'un faible pourcentage dans certains cas de l'énergie produite ne corresponde pas à la consommation. La seule solution à ce problème est d'utiliser le système de stockage. [14]

I.8. Le système de supervision :

Le contrôle du système hybride nécessite l'application d'un système de contrôle. Le système de supervision est une entité intelligente qui lui permet de gérer efficacement l'interaction entre les différents éléments du système hybride. Il représente le cerveau d'un système d'alimentation hybride, qui identifie l'entité à alimenter (générateur PV, énergie éolienne, charge ou décharge de batterie, générateur diesel) en fonction de la demande de charge et de la disponibilité d'énergie renouvelable. Plusieurs stratégies de gestion et de supervision ont été proposées dans la littérature pour traiter les différents problèmes des différents systèmes multi-sources.

le système considéré est un système multi-sources composé de panneaux photovoltaïques, de packs de batteries et de piles à combustible, montés sur un bus DC via un onduleur approprié. Le principe de fonctionnement du système est de charger la batterie lorsque la puissance du panneau photovoltaïque est supérieure à la consommation de la charge. Au contraire, lorsque la consommation est supérieure à la sortie, la batterie se décharge pour pallier le manque de puissance.

Dans le cadre d'applications isolées, un autre algorithme de gestion et de supervision d'un système hybride éolien/PV a été proposé. Dans ce travail, l'auteur a identifié trois principaux modes de fonctionnement, qui permettent d'inclure toutes les situations et scénarios auxquels un système hybride peut être confronté. Le premier mode consiste à utiliser une seule source pour satisfaire la demande de charge, dans ce cas la source éolienne. Le deuxième mode est l'utilisation d'énergie optique en plus du premier mode. Ce dernier mode maximise l'utilisation de deux sources d'alimentation et l'utilisation de batteries lorsque cela est nécessaire. Par conséquent, l'auteur n'a pas fourni de source d'urgence pour compenser une éventuelle défaillance de la source ou des conditions météorologiques extrêmement défavorables. [16]

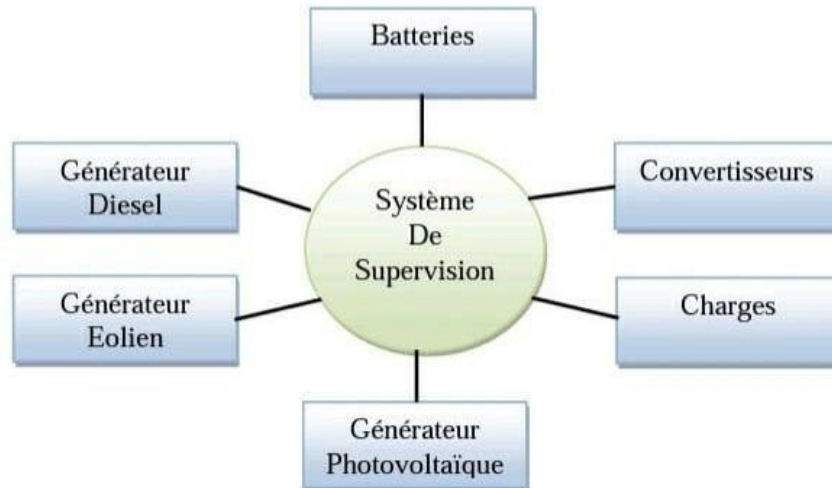


Figure I.10. Système de supervision.

I.9. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens.

Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les S.E.H ont été données. Notre travail portant sur un S.E.H composé d'une éolienne, des panneaux photovoltaïques.

Dans le chapitre suivant, on présentera une étude sur la Modélisation des composants du système hybride.

CHAPITRE II:
ETUDE ET MODELISATION DU
DSYSTEME HYBRIDE

II.1 Introduction :

La libéralisation du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée induisent de nombreux problèmes scientifiques et techniques. Ces problèmes sont liés évidemment aux nouveaux types de sources, distribuées géographiquement et se développant rapidement, mais ils concerneront également, d'ici quelques années, la gestion, voire la structure des réseaux d'énergie. Le problème majeur associé aux sources d'énergie décentralisées est qu'elles ne participent pas aujourd'hui aux services système (réglage de la tension, de la fréquence, possibilité de fonctionner en îlotage,). Ceci est particulièrement vrai pour les énergies renouvelables dont la source primaire est difficilement prévisible et très fluctuante. Actuellement, ces types de source se comportent comme des générateurs passifs du point de vue électrique. Le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques [17]. Le taux de pénétration de la production décentralisée doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables. L'aspect aléatoire et très fluctuant de la production éolienne sur le réseau a des répercussions sur la fréquence : d'une part les variations brutales de puissance entraînent des variations de fréquence et d'autre part la difficulté de prédiction de la puissance complique la tâche des gestionnaires de réseau [18],[19],[20]. Pour contrer ces inconvénients, il peut être intéressant d'associer aux générateurs éoliens à d'autres sources mieux contrôlables. Certains lieux géographiques permettent l'apport des centrales de petit hydraulique, comme par exemple la petite île de l'archipel des Canaries, El Hierro en Espagne, qui va devenir la première île au monde à être entièrement alimentée en électricité par une combinaison d'éoliennes et d'hydroélectricité. En effet, le débit d'eau ne change généralement pas aussi vite que la vitesse du vent sauf lors d'événements météorologiques exceptionnels mais souvent prévisible. Dès lors, le petit hydraulique à vitesse variable [21, 22, 23] a la capacité de compléter utilement l'éolien. Elle peut compenser des fluctuations du vent et soutenir des générateurs éoliens. L'association de l'unité de production hybride à un ou à plusieurs systèmes de stockage peut augmenter les possibilités de gestion d'énergie [24].

Ce troisième chapitre a pour but de présenter les générateurs éoliens et les générateurs photovoltaïque (GPV), avec les éléments de stockage d'énergie (batteries) et les convertisseurs statiques. La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique, elle consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement.

II.2 Définition de l'énergie éolienne :

Le principe de production de l'énergie éolienne est assez simple. L'énergie cinétique générée par la force du vent est transmise à une turbine (aérogénérateur) ; cette force fait tourner les pales d'un rotor ; L'énergie mécanique produite est ainsi transformée en énergie électrique. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) [25]. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable aux autres énergies sans pour autant prétendre les remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes Offshore) où la présence du vent est plus régulière.

On peut classer ces éoliennes selon leur puissance nominale :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1MW.

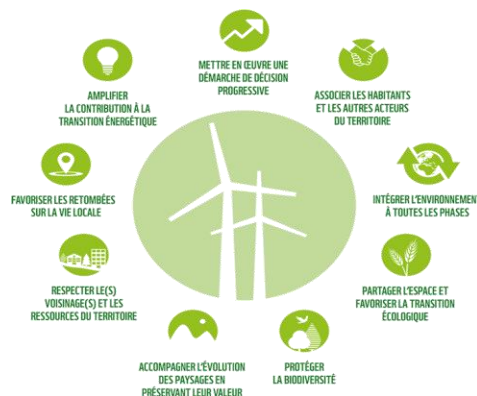


Figure II.1. Représentation de l'énergie éolienne.

II.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est conçue pour transformer l'énergie du vent en une énergie électrique. Plusieurs étapes sont nécessaires pour cette transformation [26] :

- Les pales sont fixées sur un moyeu, portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical, elles fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique fera tourner le rotor.
- La vitesse de rotation des pales est relativement lente (5 à 15 tr/min), d'autant plus lente que l'éolienne est grande. Pour pouvoir produire de l'électricité, les générateurs ont besoin d'une vitesse (de 1000 à environ 3000 tr/min). Ce problème est réglé par l'installation d'un multiplicateur pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par. Quelques modèles d'éoliennes n'ont pas besoin du multiplicateur, elles sont équipées de machines synchrones (génératrices annulaires).
- Le rotor d'un générateur reçoit l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur, une énergie électrique est par conséquent produite. Dans les grandes éoliennes, la tension générée est d'environ 690 V.
- L'ensemble est fixé sur une nacelle. Un système d'orientation permet de guider la nacelle pour que les pâles soient toujours face au vent.
- L'électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis grâce à un transformateur sa tension est élevée à 20000 V. L'électricité est alors acheminée à travers un câble souterrain jusqu'au poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique.

Pour produire de l'électricité par une éolienne, plusieurs paramètres sont à considérer :

- La longueur des pales : la puissance produite par une éolienne augmente avec le carré de la longueur des pales, une éolienne produira quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande.
- La vitesse du vent : la puissance générée croît avec le cube de la vitesse du vent. Lorsque la vitesse du vent double, la production sera multipliée par 8.
- La densité de l'air : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est 10 degrés plus froid.
- Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent (à hauteur de nacelle) généralement comprises entre 14 et 90 km / h. Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h (2,8 m/s), l'éolienne est arrêtée car la rentabilité est à un très bas niveau. Cela n'arrive que 15 à 20 % du temps. Entre 10 et 36 km/h (2,8 et 10 m/s), la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement. A partir de 36 km/h

(10 m/s), l'éolienne approche de sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production. A 45 km/h (12,5 m/s), l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h (25 m/s) ; à partir de cette vitesse, l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. La probabilité d'apparition de vents violents reste néanmoins faible, pour cette raison on ne peut fabriquer ses machines pour produire à des vitesses de vents supérieures à 25 m/s, faute de rentabilité économique.

- Une éolienne est équipée d'un système de freinage afin d'assurer l'arrêt rapide de la machine et son immobilisation lors de la maintenance [27].

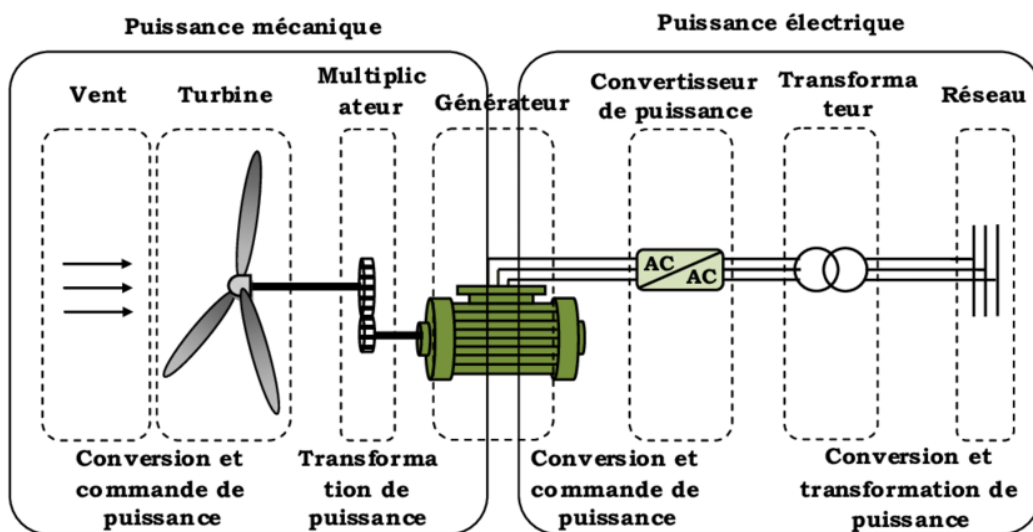


Figure II.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

II.4 Différents types d'éoliennes :

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

4.1. Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles, en revanche, l'efficacité globale de ces éoliennes

n'est pas impressionnante, ainsi que certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage [28], ce qui rend ce type d'éoliennes très peu répandu et assez mal connu. Il existe principalement trois technologies VAWT : les turbines Darrieus classiques, les turbines Darrieus à pales droites (H-type), et la turbine de type Savonius [80]. Le fonctionnement des éoliennes de type Savonius voir Figure (II.4) est basé sur le principe de la traînée différentielle et celui de type Darrieus repose sur le principe de la variation cyclique d'incidence.



Figure II.3 : Eolienne de Darrieus



Figure II.4 : Eolienne de Savonius

4.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les turbines à axe horizontal sont les plus largement utilisées de nos jours par rapport aux turbines à axe vertical, en raison de leur coût plus abordable et de leur exposition réduite aux contraintes mécaniques. Elles sont composées de plusieurs pales qui génèrent un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales varie de 1 à 3, et les turbines tripales sont les plus couramment utilisées, offrant un compromis optimal entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du dispositif éolien. [29]

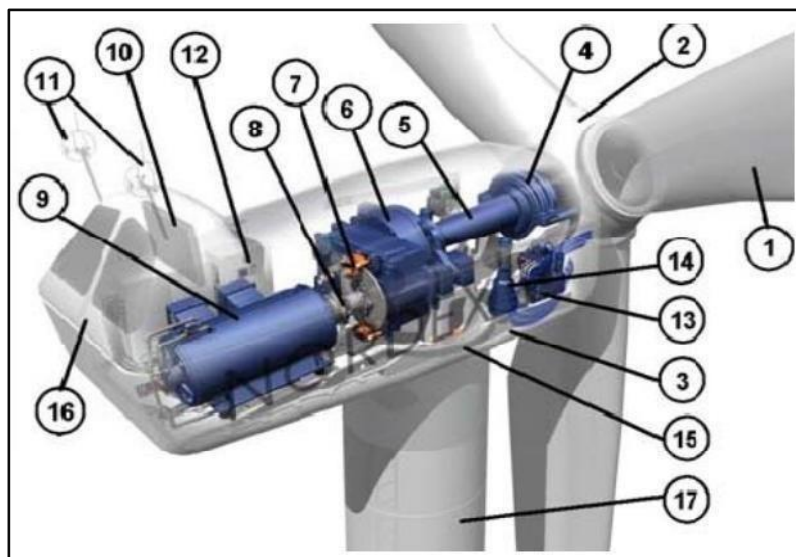
Les turbines à axe horizontal sont généralement positionnées face au vent grâce à un mécanisme d'orientation asservi ou grâce à un équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine située du côté du vent.



Figure II.5. Éolienne à axe horizontal.

II.5 .Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :

Il existe plusieurs configurations possibles d'Eoliennes qui peuvent avoir des différences importantes.



- 1 : pales, 2 : moyeu rotor,
- 3 : nacelle, 4 : cardan,
- 5 : transmission,
- 6 : multiplicateur de vitesse,
- 7 : frein à disque,
- 8 : accouplement,
- 9 : génératrice,
- 10 : radiateur de refroidissement,
- 11 : centrale de mesures du vent,
- 12 : contrôle,
- 13 : centrale hydraulique,
- 14 : mécanisme d'orientation face au vent,
- 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque,
- 16 : capot, 17 : mât.

Figure II.6. Composantes principales d'une Eolienne.

- **5.1 La tour (ou le mât) :**

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle. [30]



Figure II.7. Tour en treillis.



Figure II.8. Tour tubulaire.

- **5.2 La nacelle :**

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants : arbre ; multiplicateur ; roulements ; le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, Le générateur qui est dans le cas de ce travail est une MADA, Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent). [31]

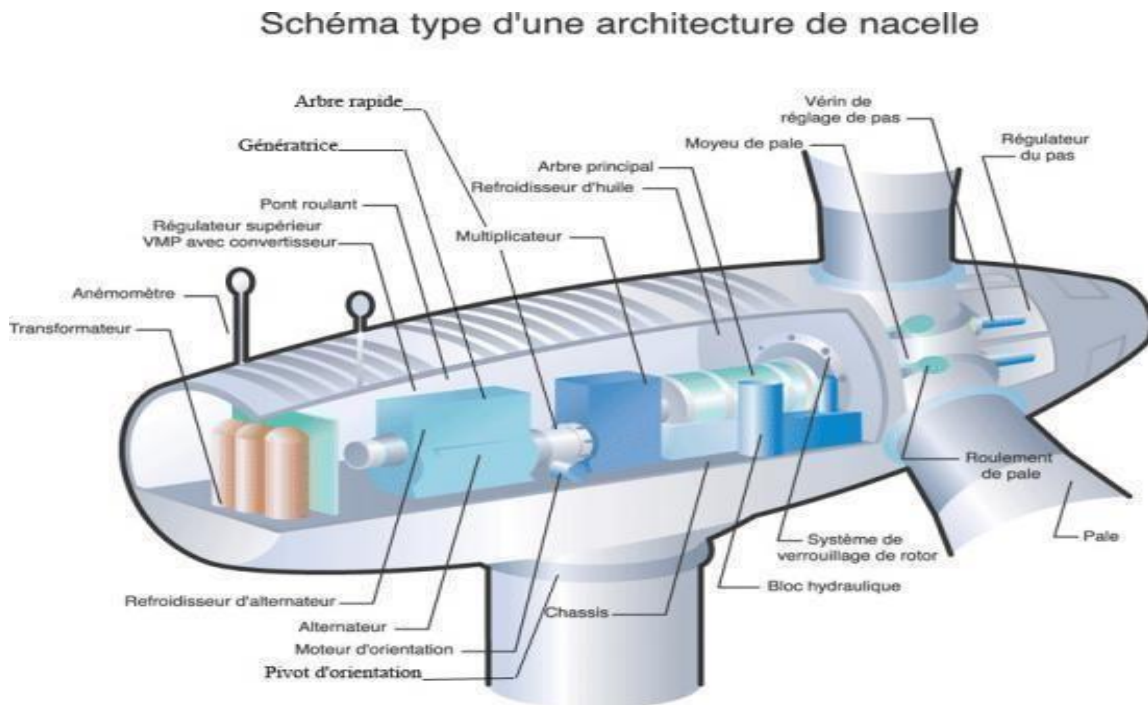


Figure II.9. Constituants principaux d'une nacelle.

- **5.3 Le rotor :**

Le rotor : composé de pales assemblées dans un moyeu, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3 pour les éoliennes destinées à la production d'électricité. Le rotor tripale est le plus courant en raison de son bon équilibre entre coût, comportement vibratoire, pollution visuelle et bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent équipés d'un système d'orientation des pales pour permettre à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner près du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif électronique de puissance. Les rotors à vitesse variable sont généralement moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié ou supprimé, mais ils nécessitent une interface électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge. Les pales se distinguent principalement par leur géométrie, qui détermine les performances aérodynamiques, ainsi que par les matériaux utilisés, tels que les composites à base de fibre de verre ou de carbone, offrant légèreté et résistance mécanique. [32]

5.4 Le multiplicateur :

Les vitesses de rotation des rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m sont trop faibles pour pouvoir entraîner directement un générateur ; un multiplicateur (boîte à vitesses) serait indispensable pour pouvoir accroître la vitesse entre l'aéromoteur et l'alternateur.

Il existe plusieurs types de multiplicateurs pouvant être utilisés :

- Un multiplicateur à engrenages ayant un ou plusieurs trains de roues cylindriques dentées ; cette réalisation étant économique mais tout de même encombrante pour un rapport de multiplication élevé.
- Un multiplicateur à trains planétaires, celui-ci permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Un réducteur à couple conique où l'arbre de sortie est perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

L'arbre rapide est muni d'un frein à disque, utilisé uniquement qu'en cas d'extrême urgence. La génératrice reçoit l'arbre rapide afin de transformer son énergie mécanique en énergie électrique. [33]

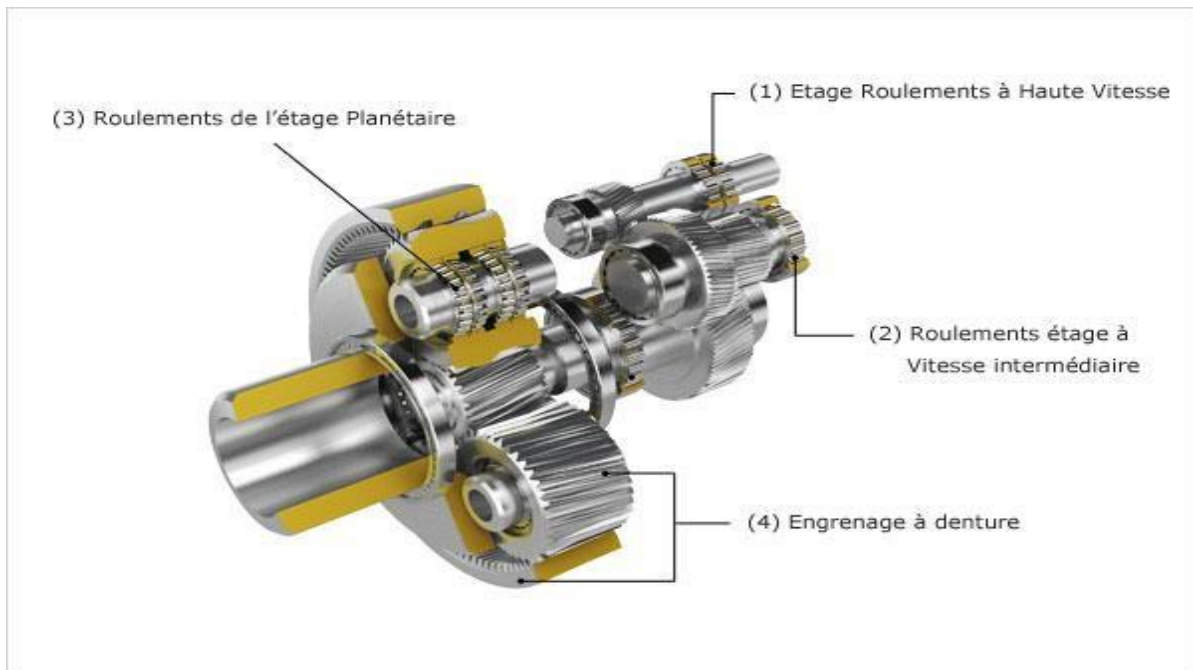


Figure II.10. Le multiplicateur.

- **5.5 La génératrice :**

Les génératrices utilisées dans les éoliennes, permettent de transformer l'énergie mécanique présente dans l'arbre rapide qui est accouplé au rotor, en énergie électrique. Différentes technologies des générateurs peuvent être utilisées :

- Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil « GAS »,
- Les générateurs synchrones à rotor bobiné « GSRB »,
- Les générateurs synchrones à aimants permanents « GSAP »,
- Les générateurs asynchrones à rotor bobiné à double alimentation « GADA ». [34]

- **5.6 Système de contrôle-commande (Le contrôleur électronique) :**

Le contrôleur électronique est considéré comme le cerveau de l'éolienne, il gère tous les paramètres (de 100 à 500) ; un ordinateur surveille en permanence l'état de l'éolienne et enregistre chaque changement. Si un défaut surgit, le système stoppe immédiatement l'éolienne, un signal de défaut est transmis à l'opérateur. Le contrôleur électronique est aussi chargé de gérer [39] :

- Le système d'orientation des pales, et de la nacelle qui à travers une couronne dentée entraînée par des moteurs électriques permet de l'orienter face au vent, et de la verrouiller en cas d'un vent très fort grâce à un frein.
- Le système de refroidissement qui comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile ou à eau froide pour le multiplicateur.
- Une armoire de commande qui comporte tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle ; ainsi que les appareils de protection et de mesure.
- Le système de mesure (anémomètre, girouette), ces deux capteurs mesurent successivement la vitesse et la direction du vent ; les signaux mesurés sont aussitôt envoyés au système de contrôle, qui arrête l'éolienne aux limites d'un vent trop faible ou quand il est très fort.

- **5.7 La cabine de dispersion :**

Elle est située au pied du mat ; cette cabine abrite un transformateur BT/HT pour connecter l'éolienne au réseau. Pour les grandes éoliennes l'armoire de commande peut se situer sur la cabine de dispersion.

II .6 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne :

6.1 Eolienne à vitesse constante :

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écurueil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers d'un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%.

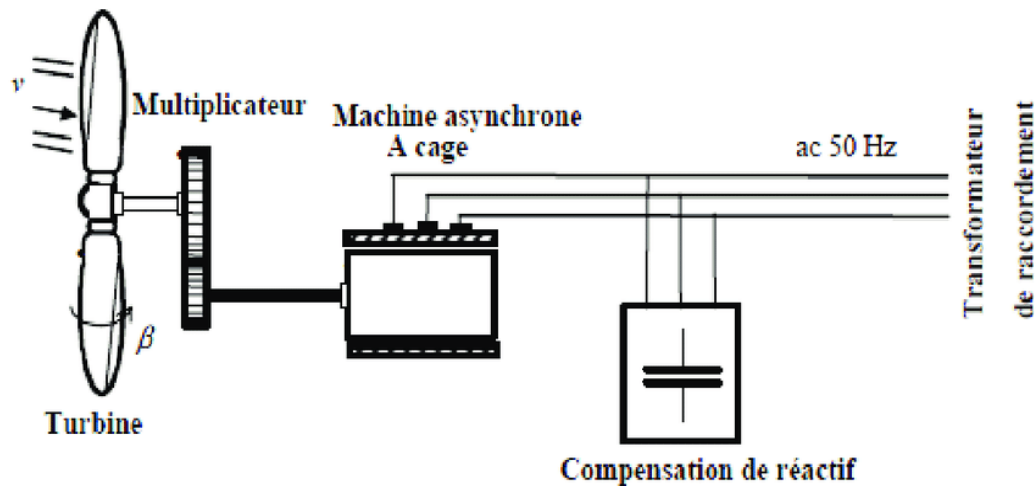


Figure II.11. Éolienne à vitesse fixe.

6.2 Eolienne à vitesse variable :

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne. Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible. (tout électrique) .

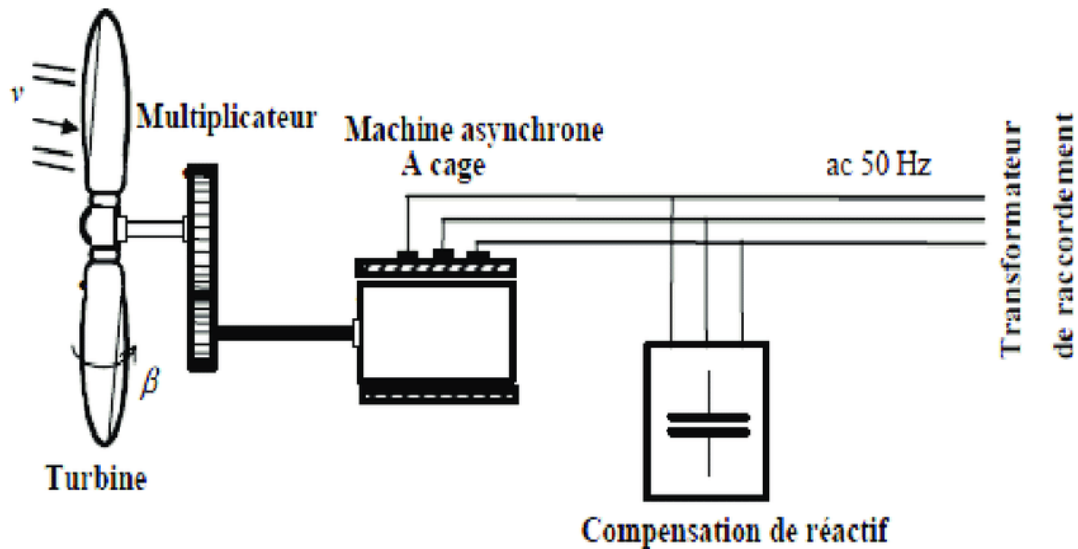


Figure II.12. Éolienne à vitesse variable.

II.7 Modèle aérodynamique :

7.1 Modèle du vent :

Le vent est l'énergie source de l'aérogénérateur, c'est la variable d'entrée du système éolien. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine. Le vecteur de vitesse évolue dans les plans horizontaux, alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [41].

$$V = f(t)$$

II.6

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne et une somme de plusieurs harmoniques [27], [37] :

$$V_v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^i (a_i \sin(w_i t + \varphi_i)) \quad \text{où :}$$

II.7

a_i, w_i, φ_i : sont respectivement l'amplitude, la pulsation et phase initiale de chaque harmonique

7.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté dans la figure (II.14), sur lequel on a représenté respectivement les vitesses du vent v_1 en amont et v_2 en aval de l'aérogénérateur. L'énergie cinétique d'une particule de masse m dans l'air qui se déplace avec une vitesse v

Donnée par :

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

II.8

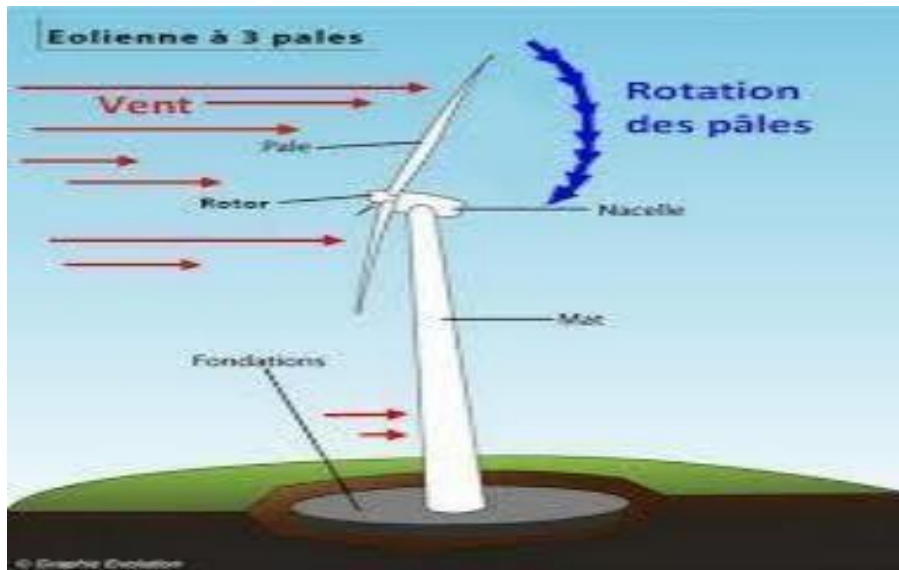


Figure II.13. Schéma simplifié d'une éolienne.

A partir de la définition mécanique d'une masse ; on sait que la densité d'un tel matériel est multipliée par son volume ce qui donne :

$$m = \rho \cdot V \text{ avec } \rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ masse volumique de l'air} \quad \text{II.9}$$

On dérive par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot S \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot S \cdot v \quad \text{II.10}$$

Sachant que le volume est obtenu en multipliant la surface par la longueur x , et en considérant seulement une seule dimension car la quantité d'air varie le long d'un seul axe, on aura :

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \quad \text{II.11}$$

Si on suppose que la vitesse du vent est constante, la puissance du mouvement d'air sera donnée par :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2)}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \quad \text{II.12}$$

On remplace \dot{m} par sa valeur dans l'équation (II.11), la puissance du vent sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{II.13}$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = P_{vent1} - P_{vent2} = \frac{1}{2} (\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1^3 - \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2^3) \quad \text{II.14}$$

Selon la loi de conservation de la masse, la quantité de masse d'air avant et après contact avec la turbine reste constante :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \quad \text{II.15}$$

La masse volumique de l'air étant constante, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ on trouve donc :

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

II.16

L'équation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur sera donnée par :

$$P_t \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho (S_1 \cdot v_1^3 - S_2 \cdot v_2^3) = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{II.17}$$

Et selon la deuxième loi de Newton :

$$F = \frac{d}{dt} (m \cdot v) = \frac{dm}{dt} \cdot v + m \cdot \frac{dv}{dt} \quad \text{(I.18)}$$

Lorsqu'on considère la vitesse constante, on obtient la relation suivante de la force exercée :

$$F = \dot{m} \cdot v \quad \text{II.19}$$

On remplace (\dot{m}) de l'équation (II.11) on trouve :

$$F = \rho \cdot S \cdot v^2 \quad \text{II.20}$$

La variation de la force entre les deux côtés de l'aérogénérateur est exprimée par la relation suivante :

$$P_{aero} = \Delta F \cdot v = (\dot{m}_1 v_1 - \dot{m}_2 v_2) \cdot v \quad \text{II.21}$$

On remplace \dot{m} par sa valeur, on obtient la relation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 (v_1 - v_2) \cdot v \quad \text{II.22}$$

On remarque que la relation de la puissance est définie par la vitesse du vent avant et après la turbine et une vitesse du vent v au bord de l'hélice. Pour déterminer la valeur de cette dernière, on compare entre les deux relations de la puissance absorbée par l'aérogénérateur c'est-à-dire (II.22) et (II.17), on trouve :

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad \text{II.23}$$

On considère le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.15) sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval ; v est la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, S_1 et S_2 sont les sections en amont et en aval du

tube d'air et S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$P_t \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{II.24}$$

En remplaçant l'expression de v (II.23) dans la relation (II.24) ; on obtient :

$$P_t \cong P_{aero} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{II.25}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit la vitesse v_1 , la puissance P_{vent} correspondante serait alors :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad \text{II.26}$$

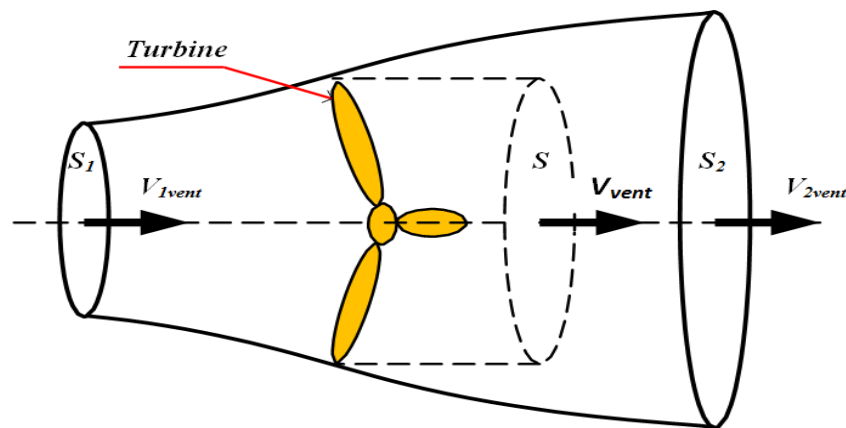


Figure II.14. Tube de courant autour d'une éolienne.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est défini comme étant le coefficient de puissance, il a pour valeur :

$$C_p = \frac{P_t}{P_{vent}} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad \text{II.27)$$

λ est définie comme étant la vitesse spécifique relative tel que :

$$\lambda = \frac{v_2}{v_1} = \frac{r \cdot \Omega_t}{v_1} \quad \text{II.28}$$

Avec : r : rayon de la turbine, et Ω_t : vitesse angulaire de rotation de la turbine, Alors :

$$P_t = C_p \cdot P_{vent} \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{II.29}$$

C'est exactement la puissance absorbée par l'aérogénérateur. Le couple mécanique est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} C_p = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho S v^3}{\Omega_t} \quad \text{II.30}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, qui n'est jamais atteinte en pratique ; en effet la vitesse des masses d'air derrière l'aéromoteur n'est pas nulle, une turbine éolienne extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_e . L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , défini par la relation (II.27). A partir de l'équation (I.24), et en définissant la puissance disponible maximale P_{e-max} ; on montre que :

$$P_{e-max} \leftrightarrow \frac{dP_e}{dv_2} = 0 \rightarrow v_1 = 3 \cdot v_2 \rightarrow P_{emax} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad \text{II.31}$$

Cette relation constitue la formule de Betz. La valeur maximale du coefficient de puissance est:

$$C_{p-max} = \frac{P_{e-max}}{P_e} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad \text{II.32}$$

59% au maximum de la puissance reçue sera disponible ; Le maximum de prélèvement d'énergie, dépendra des caractéristiques aérodynamiques et des réglages de la chaîne de conversion, ne dépassera jamais cette limite.

Chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique relative λ qui représente les performances aérodynamiques de cette éolienne [42].

Le rendement aérodynamique η_a traduit la qualité aérodynamique de l'éolienne dans les meilleures conditions de réglage, on l'exprime par :

$$\eta_a = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{C_{p-max}} \quad \text{II.33}$$

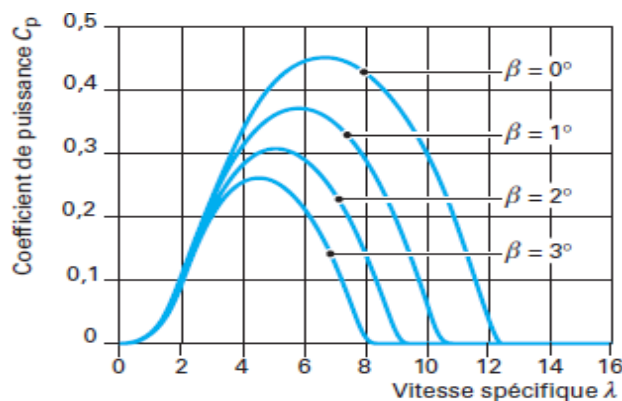


Figure II.15. Paramétrage une éolienne tripale pour différentes valeurs β .

II.8 Stratégies de MPPT pour une éolienne

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche. La puissance capturée par une turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p , qui dépend fortement de la vitesse de la génératrice.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice.

Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) peut être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles [43], [44], [45] :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue ;
- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

1.1 8.1 Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique C_p

En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance et de vitesse.

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Le système doit trouver pour chaque vitesse de vent, la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure (II.16) illustre les courbes caractéristiques de la puissance l'éolienne en fonction de différentes vitesses de rotation de la turbine.

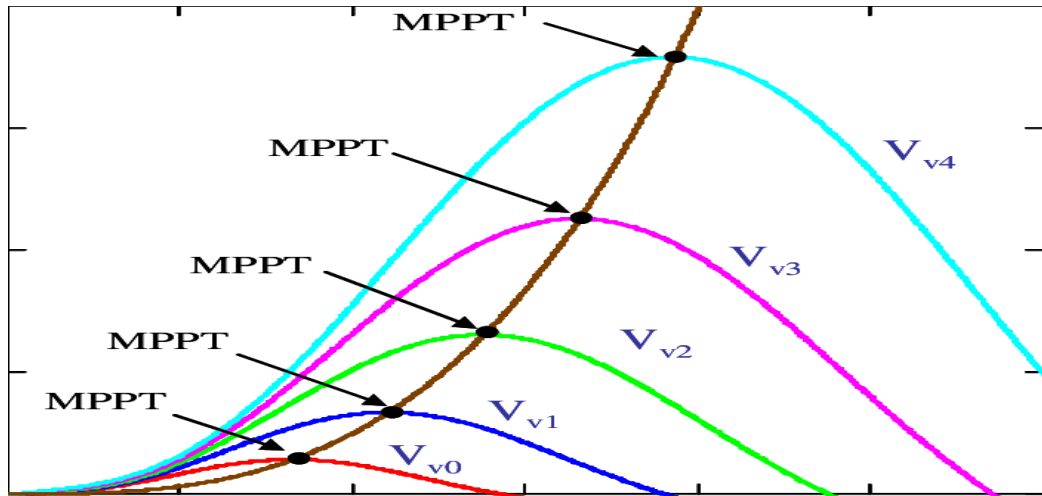


Figure II.16. Caractéristiques d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques qui sont les points optimaux recherchés, conduisent à une courbe (en pointillé) dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt} (\lambda_{opt}) \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{II.34}$$

8.2 Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe C_p

Une autre façon de procéder consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique C_p . Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples de vitesse de rotation, sans (ou avec) l'obligation d'utilisation des capteurs de vitesse du vent [47], [48]. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de référence :

- Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.
- Contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.

II.9 Modélisation du système éolien :

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Les facteurs déterminant la puissance mécanique, sont la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. Ce système peut être représenté sur la figure (II.17), il comporte :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :
 - La même inertie J_{pales}
 - La même élasticité K_b

➤ Le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement f_{pale} par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées

$\beta_{b1}, \beta_{b2}, \beta_{b3}$. Chaque pale reçoit une force

Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [41].

- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par : son inertie (J_h), son élasticité (K_h) et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur (D_h). Le rotor de la génératrice possède aussi son inertie (J_g), et son coefficient de frottement par rapport à l'air (d_g) ; ce rotor transmet un couple (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

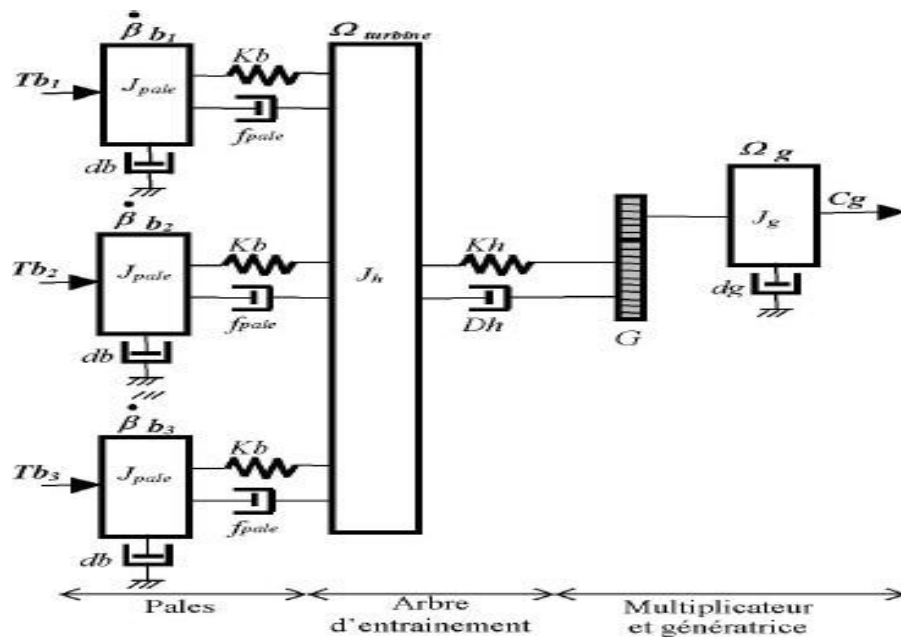


Figure II.17. Représentation du système mécanique de l'éolienne.

9.1 Modèle de la turbine :

On peut simplifier le schéma de la figure (II.18), si l'on considère les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$), puisque qu'on a une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales. L'ensemble des trois pales peut être simplifié comme un seul système.

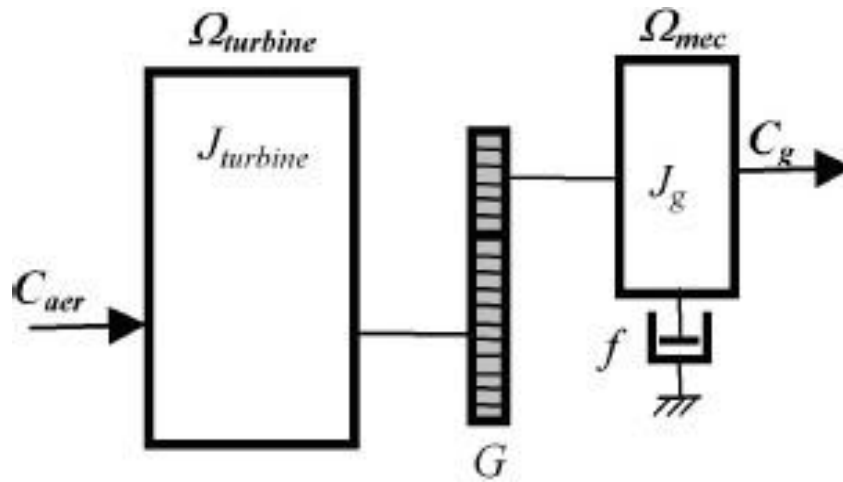


Figure II.18. Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Le coefficient de frottement des pales, (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique simplifiée (figure [42]).

9.2. Modèle du multiplicateur :

L'aérogénérateur tourne généralement à une vitesse nominale. Le multiplicateur a pour rôle d'ajuster cette vitesse à celle du générateur électrique à travers un coefficient appelé le gain G [51].

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad \text{II.45}$$

Ω_{mec} Représente vitesse angulaire de rotation du générateur, toutefois le gain peut s'exprimer en fonction de :

$$G = \frac{C_{mec}}{C_t} \quad \text{II.46}$$

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

9.3. Equation dynamique de l'arbre de transmission :

D'après la figure (II.18), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique du générateur (modèle de l'arbre) par [43] :

$$J \frac{d\omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_T$$

Transformée de Laplace $\rightarrow \Omega_{mec}(s) = J \frac{1}{Js+f} + G(s)$

I.47

Où :

- C_T étant le couple total de l'éolienne (N. m), donné par :

$$C_T = C_{mec} - C_{em} \quad \text{II.48}$$

- J : Inertie totale des parties tournantes ($kg.m^2$) : qui est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad \text{II.49}$$

Le schéma bloc de la figure (II.19) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne [44]. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation mécanique Ω_{mec} qui entraîne le générateur, peut être contrôlée de deux manières différentes : soit par la variation de l'angle de calage des pales, soit par contrôle du couple électromagnétique C_{em} .

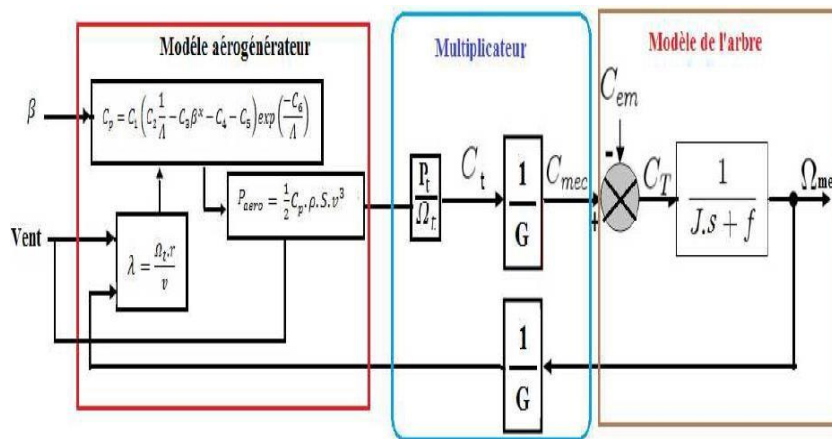


Figure II.19. Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.

II.10 Présentation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

MSAP :

La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus

grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif [19]

10.1 Principe de fonctionnement des MSAP

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor qui tourne autour de l'axe de symétrie de la machine. Les trois enroulements identiques, à p paires de pôles sont logés sur des encoches régulièrement réparties sur la surface interne du stator ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à : $\frac{2}{3p}$ [45].

La structure du rotor est réalisée par un enroulement monophasé excité en courant continu, ou par un aimant permanent. La roue est conçue soit à pôles lisses ou à pôles saillants. Il sera admis que pour cette dernière structure, la machine pourrait être munie d'enroulements amortisseurs qui ont pour rôle de permettre à la machine de s'opposer à des régimes de déséquilibres ; et d'augmenter le couple électromagnétique.

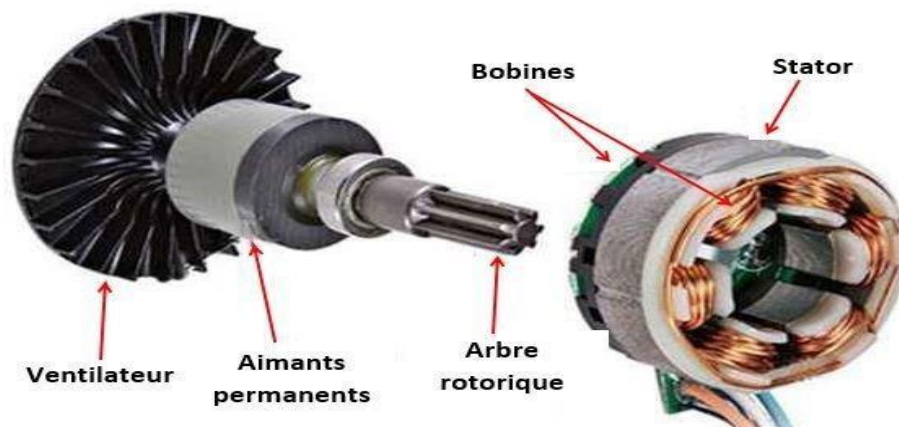


Figure II.20. Structure générale d'une machine synchrone à aimants.

Le nombre de pôles d'un MSAP est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire, cette dernière est donnée par $f = \frac{p\Omega_t}{120}$; [46] ; Avec :

Ω_t : Vitesse mécanique (rad/s).

La GSAP, est une machine synchrone fonctionnant en mode générateur, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique alternative, et dans laquelle les champs magnétiques statorique et rotorique sont en rotation synchrone, c'est-à-dire à la même vitesse, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance.

L'excitation de la GSAP est faite par des aimants permanents liés au rotor (inducteur). Il y a des structures de génératrices à aimants permanents à rotor interne et stator externe d'une part, et des structures d'alternateurs à stator interne et rotor externe, d'autre part, figure (II.21).

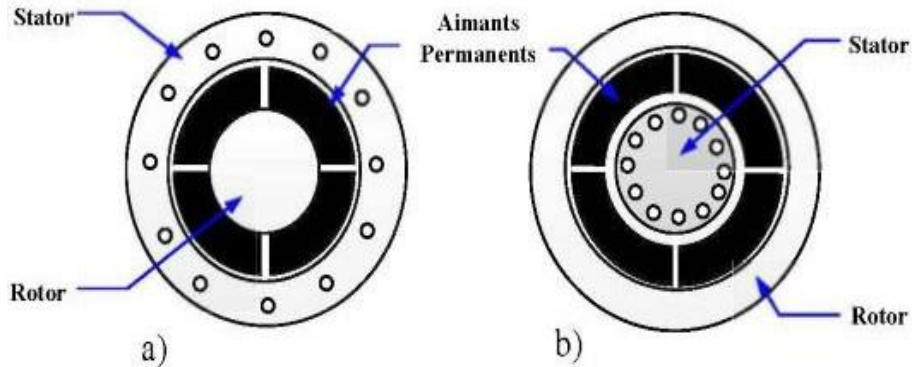


Figure II.21 : Structure à rotor interne a) Structure à rotor externe b)

10.2 Modélisation de la MSAP

Dans la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants permanents. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte trois enroulements statoriques triphasés (a, b, c) décalées entre eux par un angle de $(2\pi/3)$. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ils sont modélisés par un enroulement alimenté par une source du courant continu ' i_f ' qui produit un champ magnétique constant, figure (II.22).

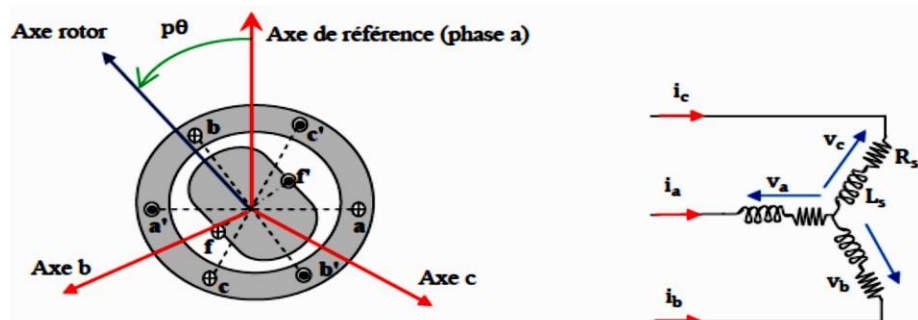


Figure II.22. Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.

10.3. Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [47] :

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements ;
- Les forces magnétomotrices (fmm) sont à répartition sinusoïdale dans l'entrefer de la machine, ce qui induit une symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements ;
- L'effet d'encochage est négligé ;
- On ne tient pas compte de l'hystérésis, des courants de Foucault et de l'effet de peau dans les parties magnétiques.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

10.4 Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc

10.4.1 Equations électriques

Les équations électriques qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone dans un repère fixe lié au stator (a, b, c) s'énoncent sous la forme suivante [48] :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad \text{II.51}$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur des tensions statoriques.}$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur des courants statoriques.}$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur des flux totaux statoriques.}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{Matrice des résistances statoriques.}$$

10.4.2. Equations magnétiques :

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale des fmm, Le vecteur des flux totalisés des phases statoriques s'écrit dans le repère lié au stator (a, b, c) par la relation :

$$[\Phi_s] = [L][i] + [\Phi_{sr}] \quad \text{Où :}$$

II.52

- $[\Phi_{sr}] = [\Phi_{sra} \quad \Phi_{srb} \quad \Phi_{src}]^T$

II.53

- $[L]$ étant la matrice inductance statorique (propre et mutuelle).
- Φ_{sr} : Flux de l'aimant permanent.

$$[\Phi_{sr}] = \Phi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \text{ où :} \tag{II.54}$$

- $\theta_r = p\theta_m$: Position angulaire électrique ;
- p : Nombre de paires de pôles ;
- θ_m : Position angulaire mécanique ;
- Φ_m : Flux maximum produit par l'aimant dans les enroulements statoriques.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \tag{II.55}$$

On remplace dans l'équation II.1, on obtient alors :

$$[V]_s = [R]_s [I]_s + [L] \frac{d}{dt} [I]_s + [\Phi]_{sr} \tag{II.56}$$

10.4.3. Equations mécaniques :

A travers la dynamique du rotor, on définit l'équation électromécanique comme étant :

$$C_{em} - C_r - C_f = J \frac{d}{dt} \Omega \Rightarrow C_{em} - C_r - f\Omega = J \frac{d}{dt} \Omega \text{ où :} \tag{II.57}$$

- C_{em} : Couple électromagnétique [N.m];
- C_r : Couple résistant [N.m] ;
- J : Moment d'Inertie de la partie tournante de la machine ;
- f : Coefficient de frottement visqueux ;
- Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor.

10.4.4. Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q) :

La mise en équation des moteurs synchrones triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. La résolution analytique dans ce repère reste très difficile. Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère ; on utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à

l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. On obtient un système équivalent formé de trois enroulements orthogonaux, deux de ces enroulements sont situés dans le même plan que les enroulements a, b, et c. Le troisième enroulement est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes de phases a, b, et c et représente la composante homopolaire, en se basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de Park au rotor, [49]. Cette transformation mathématique, transforme ainsi les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor Figure (II.23).

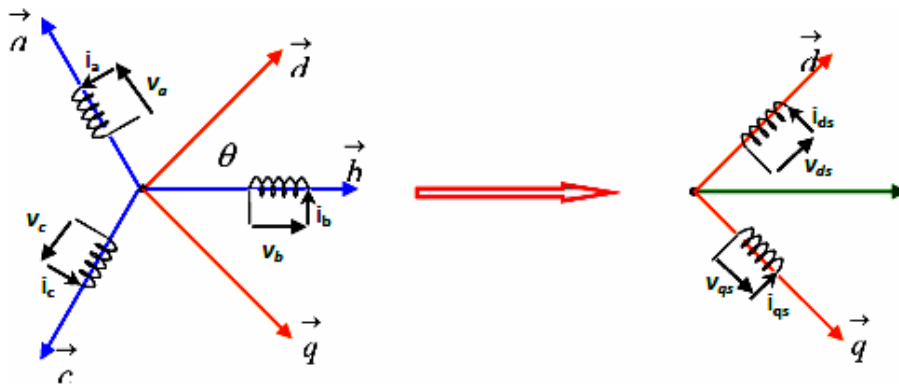


Figure II.23. Représentation de la MSAP dans le repère d-q

Pour passer d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (dq) (ou vice versa), on utilise les relations par la transformation de Park qui est définie comme suit :

$$\begin{cases} [X_{dqo}] = [P(\theta)][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dqo}] \end{cases} \quad \text{II.58}$$

$[P(\theta)]$ est définie comme étant la matrice de transformation de Park, sa valeur vaut :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La matrice inverse de Park, vaut :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Dans le cas particulier où : ($\theta = 0$) ceci nous mène à la matrice appelé de Concordia qui va permettre le passage entre les deux référentiels abc et $\alpha\beta$ qui est un repère biphasé orthogonal fixe :

$$\begin{cases} [X_{\alpha\beta o}] = [T][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [T]^{-1}[X_{\alpha\beta o}] \end{cases} \quad \text{II.59}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & 0 \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} -\frac{1}{2} \\ \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{matrix}$$

$$[T]^{-1} = [P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} 0 \\ \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \end{matrix}$$

Le passage de la transformation $\alpha\beta$ à la transformation dq est assuré par la matrice de rotation $[R(\theta)]$ définie par :

$$\begin{cases} [X_{dq}] = [R(\theta)][X_{\alpha\beta}] \\ [X_{\alpha\beta}] = [R(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \end{cases} \quad \text{II.60}$$

$$\begin{cases} [R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ [R(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{II.61}$$

En se basant sur les hypothèses simplificatrices, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans le repère de Park (d, q, o) qui est à priori quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire [64].

10.4.5 Expressions des tensions :

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (II.51), on aboutit à :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][v_s] = [P(\theta)][R_s][I_s] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad \text{II.62}$$

De la même façon, On peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle :

$$\begin{aligned}
[V_{dq0}] &= [P(\theta)][v_s] \\
&= [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1}[i_{dq0}] + [P(\theta)][P(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq0}] \\
&+ [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) [\Phi_{dq0}] \quad] \quad \text{II.63}
\end{aligned}$$

En remarquant que la matrice $[R_s]$ est diagonale, donc :

$$\begin{aligned}
[P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1} &= [R_s] \\
\left\{ [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) \right. &= \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{II.64}
\end{aligned}$$

Après toutes ces transformations, et en posant : $\frac{d\theta}{dt} = \omega$; on obtient les équations statoriques de la GSAP exprimées dans le référentiel de Park lié au rotor :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega \Phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega \Phi_d \end{cases} \quad \text{II.65}$$

10.4.6. Expressions des flux :

$$[\Phi_{dq0}] = [P(\theta)][\Phi_s] = [P(\theta)][L] \cdot [P(\theta)]^{-1}[i_{dq0}] + [\Phi_{sr}] \quad \text{II.66}$$

On obtient donc les équations des flux statoriques de la GSAP, exprimées dans le référentiel de Park :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad \text{Où :} \quad \text{II.67}$$

- (L_d, L_q) Sont les inductances d'axes directs et en quadrature.

La machine étant supposée à pôles lisses, ce qui signifie que $(L_d = L_q)$

Le modèle de la MSAP est enfin donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \Phi_{sr}) \end{cases} \quad \text{II.68}$$

10.4.7. Expressions de la puissance et du couple :

La puissance électrique absorbée par la machine est exprimée dans le référentiel triphasé et celui de Park par :

$$\begin{cases} P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ P(t) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad \text{II.69}$$

Le système étant équilibré, alors :

$$\begin{cases} i_0 = 0 \\ V_0 = 0 \end{cases}$$

En remplaçant les valeurs des tensions et des courants par leurs similaires dans l'équation II.69, la puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} [R_s \cdot (i_d^2 + i_q^2) + \left\{ i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right\} + (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega] \quad \text{où :} \quad \text{II.70}$$

Les pertes par effet Joule étant négligeables du fait de la faible valeur de la résistance statorique ; en régime permanent le flux étant constant, il en résulte :

$$\begin{cases} P(t) = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega = \omega C_{em} \\ P(t) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad \text{II.71}$$

L'expression du couple en fonction des courant statoriques (i_d i_q) et du flux d'induction maximum des aimants permanents (ψ_{md}) de la MSAP est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [i_q \Phi_{sr} + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad \text{II.72}$$

Pour une MSAP bipolaire ($p=1$), à rotor lisse ($L_d = L_q$) on aura le couple suivant :

$$C_{em} = \frac{3}{2} i_q \Phi_{sr} = \frac{3}{2} i_d \Phi_{sr} \quad \text{II.73}$$

10.5. Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG :

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents est donné par les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.74}$$

En appliquant les transformations de Park, comme auparavant :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d\Phi_d}{dt} + \omega \Phi_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega \Phi_d \end{cases} ; \begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} ; \frac{d\Omega}{dt} - C_f = C_m - C_{em} \quad \text{II.75}$$

II.11. État de l'art du système photovoltaïque :

Le soleil émet des photons dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm). La notion AM pour Air Mass est utilisée pour décrire le spectre solaire en

fonction de l'énergie émise. Le rayonnement solaire peut transporter une énergie totale d'environ 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors de l'atmosphère terrestre (voir figure III.1). Lorsqu'il traverse l'atmosphère, le rayonnement solaire est atténué et modifié dans son spectre par des phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Par conséquent, la couche d'ozone capte une partie du rayonnement solaire, notamment une partie des ultraviolets nocifs pour la santé. En raison de l'absorption dans l'atmosphère (AM1), le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m². L'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol entraîne une variation de cette valeur. À mesure que l'angle de pénétration θ diminue, l'épaisseur atmosphérique que les rayons devront traverser augmentera, ce qui entraînera une perte d'énergie importante. Par exemple, la puissance directe du rayonnement solaire qui atteint le sol avec un angle de 48° est d'environ 833 W/m² (AM1.5). [50]

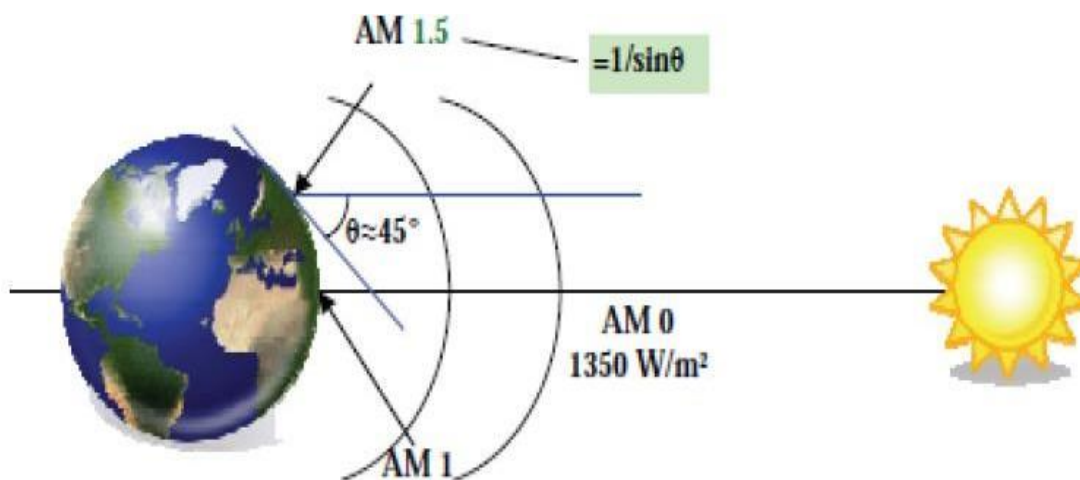


Figure II.24. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.

II.12. Notion d'effet photovoltaïque :

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation (II.75) :

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda_0}$$

II.75

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et C la vitesse de la lumière. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde appropriée, l'effet photovoltaïque se traduit par une variation de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs. En utilisant ce phénomène physique optoélectronique, une cellule photovoltaïque peut transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Dans l'industrie, les matériaux les plus couramment employés sont constitués de silicium. Les cellules fabriquées à partir de silicium monocristallin obtiennent des performances de rendement énergétique de 13 à 14 %, de 11 à 12% avec du silicium polycristallin et de 7 à 8% avec du silicium amorphe. Un module est transféré à un panneau en ajoutant deux diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, appelée diode by-pass. Elle n'intervient pas. [51]

II.13. Principe de la génération photovoltaïque :

On peut comparer une cellule photovoltaïque à une diode photosensible, car son fonctionnement repose sur les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs. La cellule solaire photovoltaïque offre la possibilité de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité. Son fonctionnement repose sur l'utilisation de l'énergie solaire. Les deux couches minces d'un semi-conducteur forment une cellule. Ces deux niveaux sont dotés de manière différente. Dans la couche N, il y a une contribution d'électrons périphériques, tandis que dans la couche P, il y a un manque d'électrons. Les deux niveaux ont donc une disparité de potentiel. Les électrons périphériques (couche N) captent l'énergie des photons lumineux, ce qui leur permet de traverser la barrière de potentiel et de générer un courant électrique continu. Afin de recueillir ce courant, on dépose des électrodes par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur figure (II.25).

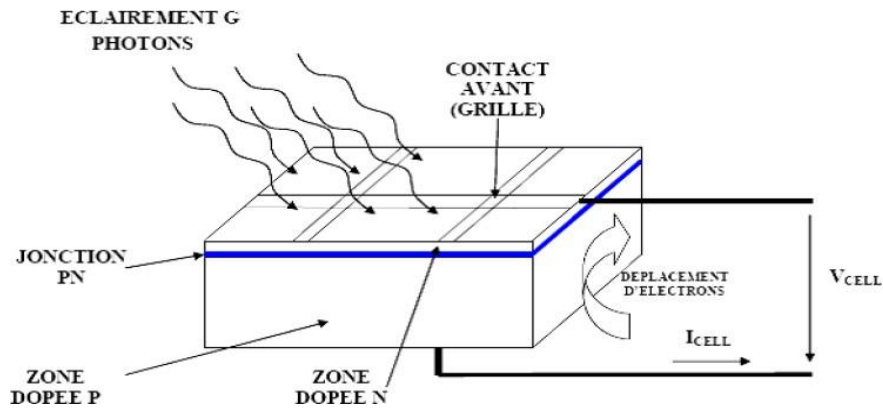


Figure II.25. Schéma d'une cellule photovoltaïque élémentaire.

Le haut de l'électrode est une grille qui permet le passage des rayons de lumière. Ensuite, on applique une couche antireflet sur cette électrode pour augmenter la quantité de lumière absorbée. Dans l'industrie, les matériaux les plus couramment employés sont constitués de silicium. Le rendement énergétique obtenu dans les usines varie de 13 à 14 % pour les cellules en silicium monocristallin, de 11 à 12 % pour les cellules en silicium polycristallin et de 7 à 8 % pour les cellules en silicium amorphe en films minces. Les propriétés obtenues sont similaires à celles d'une photodiode, mais en utilisant une approche génératrice [52] (voir figure (II.26)).

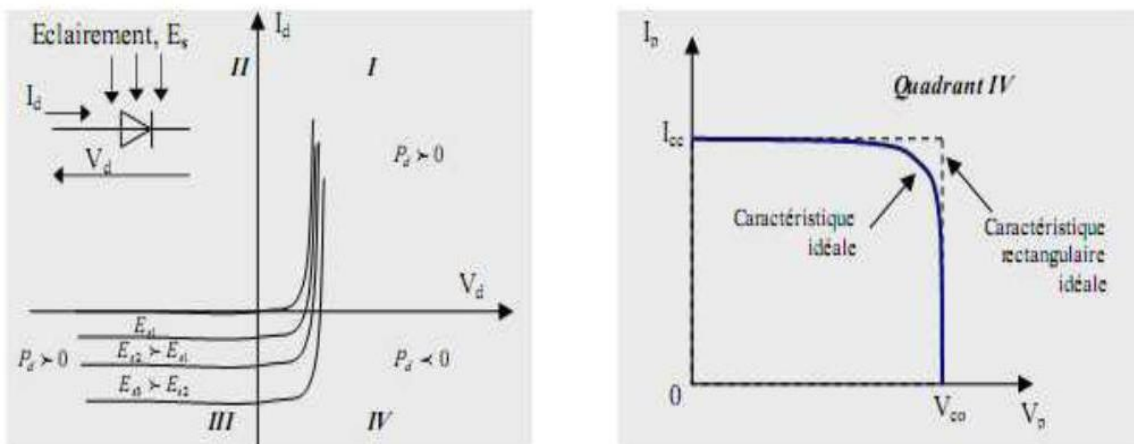


Figure II.26. A : caractéristique d'une photodiode. B : caractéristique d'une cellule Photovoltaïque.

En général, une cellule solaire photovoltaïque génère moins de 2 watts à une tension d'environ 0,5 Volt. Donc, alors. Afin d'augmenter la puissance, les cellules sont regroupées afin de créer un module. Une combinaison de plusieurs cellules crée un module, tandis qu'une combinaison série et/ou parallèle de plusieurs modules permet la création d'un panneau photovoltaïque Figure (II.27) [52].

Le passage d'un module à un panneau est effectué en intégrant des diodes de protection, dont une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, appelée diode by-pass, qui intervient uniquement en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules afin de limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et réduire la perte de production associée.

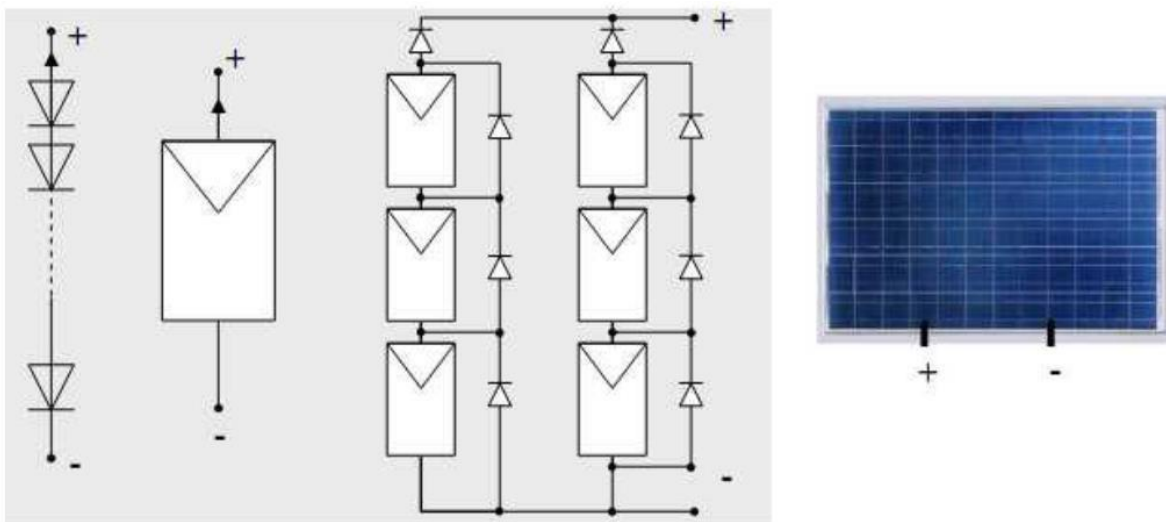


Figure III.27. Cellules, module et panneau photovoltaïques.

II.14. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Différents modèles de générateurs photovoltaïques (à une, à deux ou à trois diodes) sont présents dans la littérature technique. Ils diffèrent les uns des autres en raison du nombre de paramètres qui sont utilisés pour calculer la tension et le courant final du générateur solaire.

Le modèle à diode unique est le plus mentionné dans les écrits. Son schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (II.28). Il comprend une source de courant qui représente la transformation du flux lumineux en énergie électrique, ainsi qu'une résistance shunt R_{sh} qui représente le courant de fuite à la surface de la cellule en raison de la non-conformité de la jonction PN et des impuretés à proximité de celle-ci. Les différentes résistances de contact et de connexion sont représentées par une résistance série R_s [53].

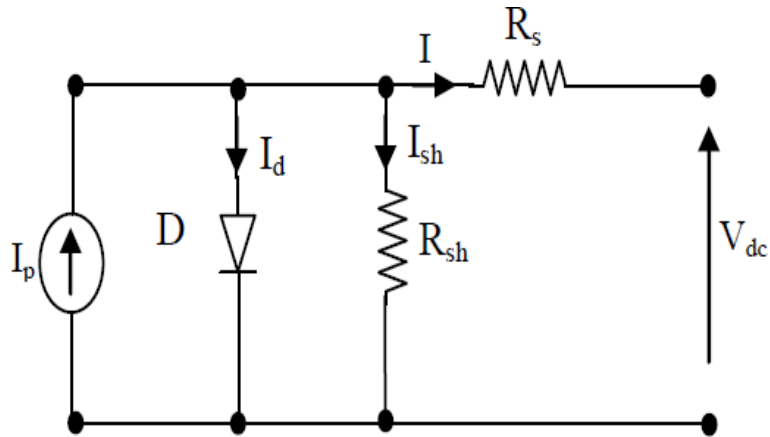


Figure II.28. Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

14.1. Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque :

En appliquant la première loi de Kirchhoff (loi des nœuds), on peut écrire :

$$I_p = I + I_d + I_{sh} \tag{II.76}$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right] \tag{II.77}$$

Le courant dans la résistance R_{sh} vaut :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{II.78}$$

Si on combine ces relations, on trouve ;

$$I = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \tag{II.79}$$

Où :

I : Le courant de cellule [A].

V : La tension de cellule [V].

I_p : Le photo-courant de la cellule [A].

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

R_{sh} : La résistance shunt de la cellule [Ω].

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge de l'électron $e = 1.6 * 10^{-19}$ [C].

I_0 : Le courant de saturation [A].

K : Constante de Boltzmann ($1.3854 * 10^{-2}$ [JK⁻¹]).

n : Le facteur de non idéalité de la diode.

14.2. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

On peut calculer ces paramètres en utilisant les courbes courant-tension ou l'équation caractéristique (II.79). Les plus courantes sont celles-ci :

14.2.1. Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul.

Dans le cas idéal (R_s est nulle et R_{sh} est infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_p .

Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.5), on obtient ;

$$I_{cc} = I_p - I_0 \left[\exp\left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT}\right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right]$$

La plupart des photopiles ont une résistance série qui est faible, on peut négliger le terme :

$I_0 [\exp^{q(\frac{R_s I_{cc}}{nKT})} - 1] \ll I_p$, donc le courant de court-circuit aura pour valeur :

$$I_{cc} = \frac{I_p}{(1 - \frac{R_s}{R_{sh}})} \quad \text{Avec } I_{cc} \text{ intensité de court-circuit.} \quad \text{II.80}$$

14.2.2. Tension à vide :

C'est la tension V_{c0} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (circuit ouvert). On la définit comme étant la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.

$$0 = I_p - I_0 [\exp^{q(\frac{V_{c0}}{nKT})} - 1] - \frac{V_{c0}}{R_{sh}} \Rightarrow \quad V_{c0} = \left(\frac{q}{nKT}\right) \text{Ln}\left(\frac{I_p}{I_0} + 1\right)$$

II.81

Avec : V_{c0} tension à vide (circuit ouvert).

14.2.3. Notion de Facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{pm} \cdot I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ($I_{cc} \cdot V_{c0}$).

$$FF = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{I_{cc} \cdot V_{c0}} \quad \text{II.82}$$

14.2.4. Rendement :

Le rendement (η), d'une cellule photovoltaïque est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \left(\frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{c0}}{P_{in}}\right) \quad \text{II.83}$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à vide [35].

II.15. Module photovoltaïque :

En associant les cellules photovoltaïques en série ou en parallèle, on peut construire un module (générateur) photovoltaïque selon le besoin des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. La puissance disponible en sortie du module photovoltaïque est donnée par [54] :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

II.84

Où :

N_s : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série. N_p : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle.

15.1. Mise en série :

Une association de N_s cellules permet d'accroître la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules étant en série seront traversées par la même intensité de courant. La caractéristique de ce groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule figure (II.30). L'équation (II.29) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules [55].

$$\begin{cases} I_{cc,ns} = I_{cc} \\ V_{c0,ns} = N_s \cdot V_{c0} \end{cases}$$

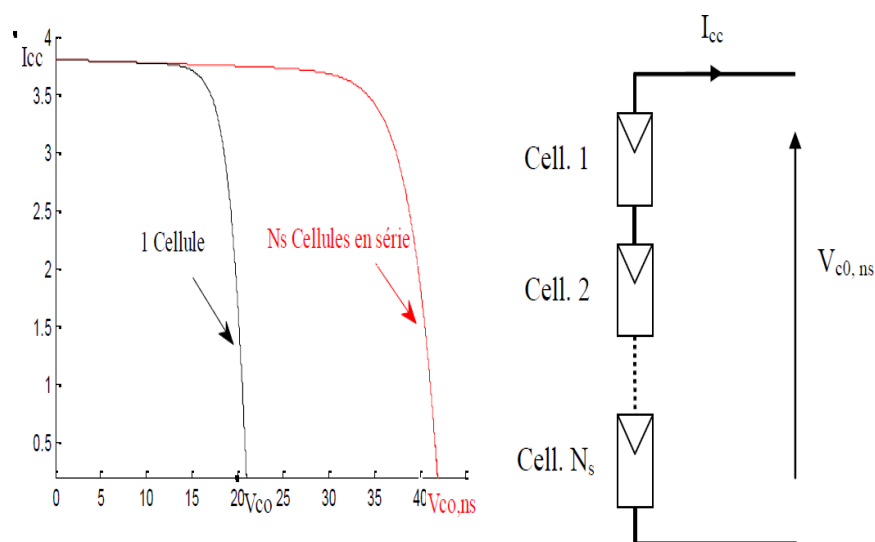


Figure II.29. Caractéristiques de N_s cellules groupées en série.

$$\begin{cases} I_{cc,ns} = I_{cc} \\ V_{c0,ns} = N_s \cdot V_{c0} \end{cases}$$

III.12

15.2. Mise en parallèle :

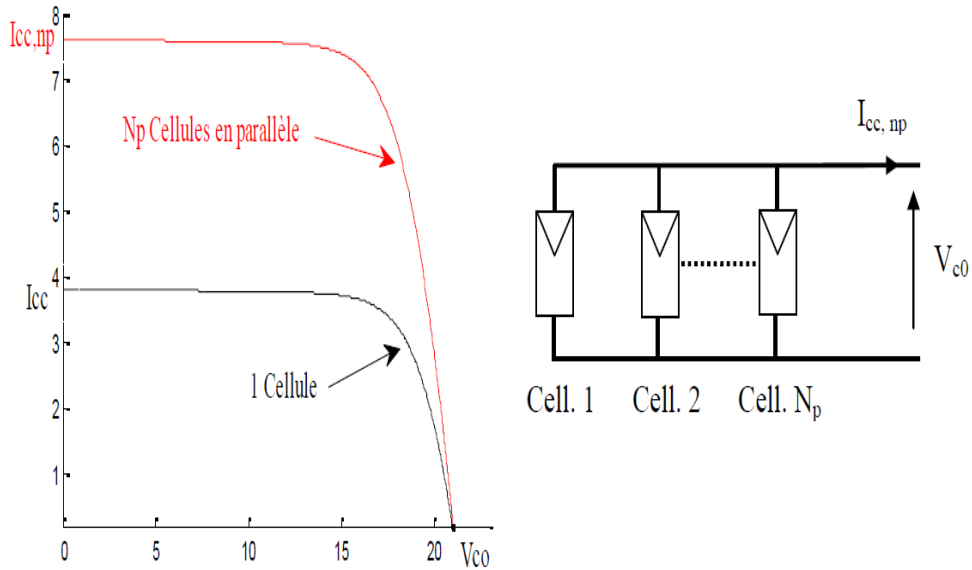


Figure II.30. Caractéristiques de Np cellules groupées en parallèle.

D'autre part, on peut assembler Np cellules en parallèle ; ce qui permettra d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique de ce groupement est obtenue par addition des courants Figure (II. 31). L'équation (III.13) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de Np cellules [55].

$$\begin{cases} I_{cc,np} = N_p \cdot I_{cc} \\ V_{c0,np} = V_{c0} \end{cases}$$

III.13

2 Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque

Les figures ci-dessous montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement et de la température.

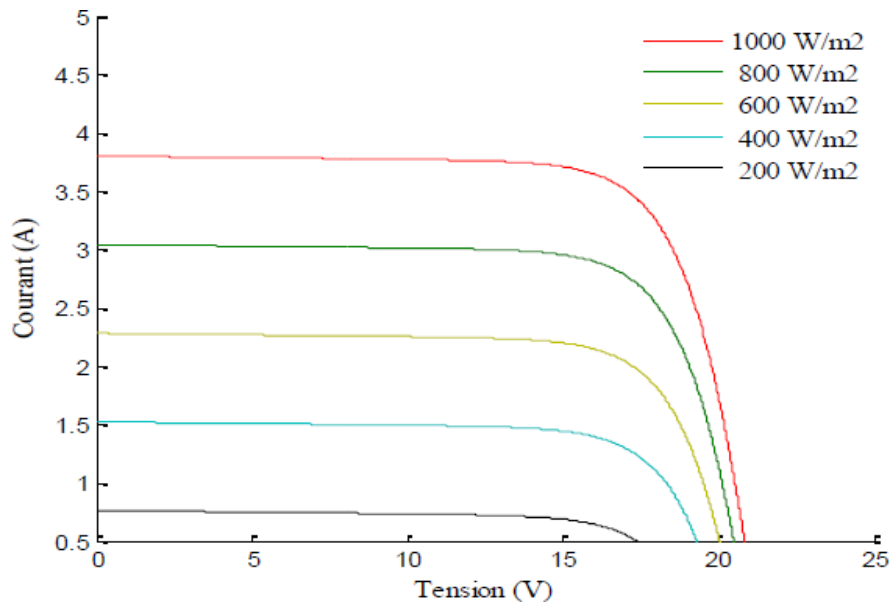


Figure III.10. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairiments à température constante 25°C [56]

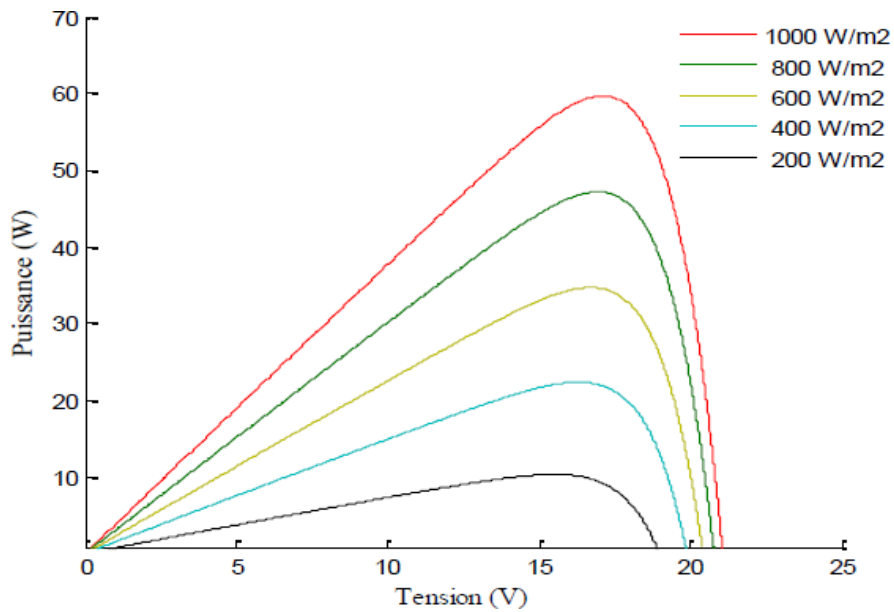


Figure III.11. Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairiments à température constante 25°C [56]

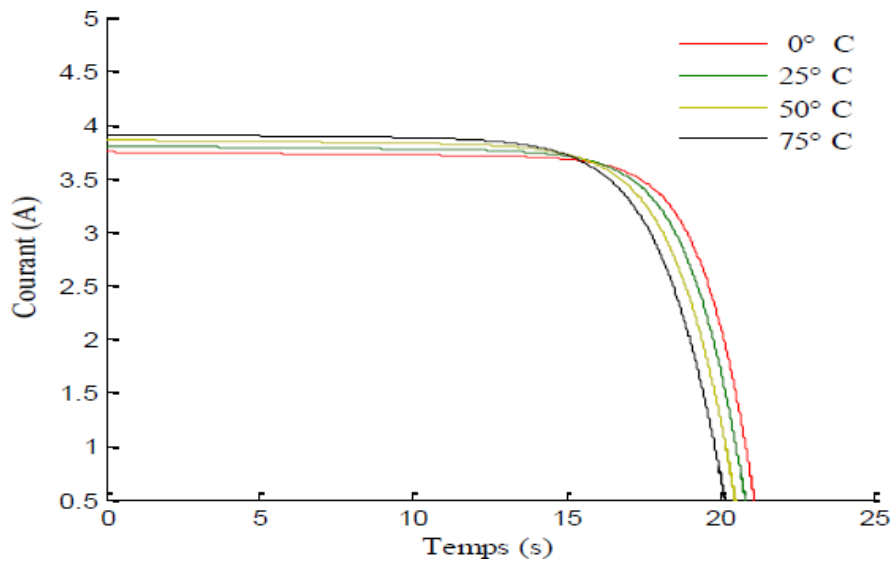


Figure III.12. Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures à éclairment constant 1000 W/m^2 [56]

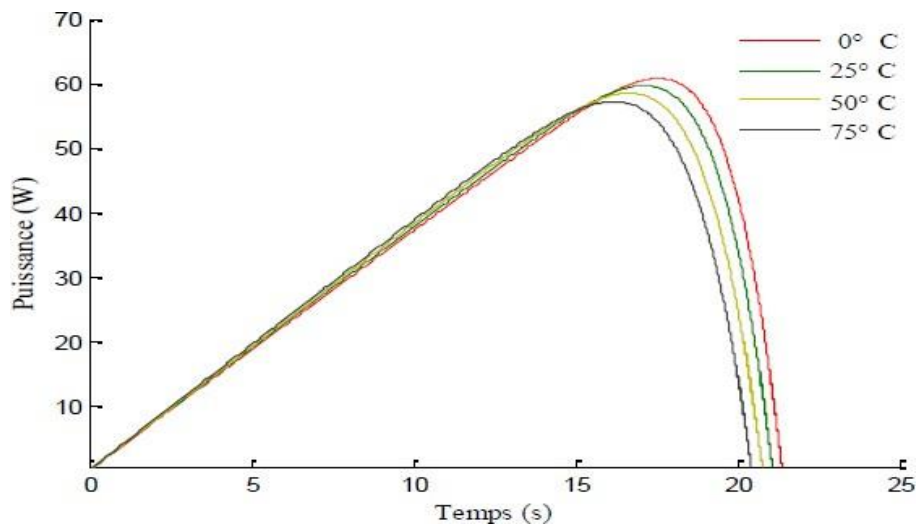


Figure III.13. Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de températures à éclairment constant 1000 W/m^2 [56]

Nous observons que l'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant I_{pv} du générateur que la tension V_{pv} . La température quant à elle, influe beaucoup plus sur la tension que sur le courant.

L'ensoleillement augmente la puissance fournie par le module, alors que la température l'abaisse.

II.16. Conclusion :

Dans ce chapitre, on présentera une étude sur la Modélisation des composants du système hybride. Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système électrique hybride (éolien-photovoltaïque) avec batterie de stockage. Cette modélisation nous permettra de simuler les performances du système global étudié. Dans le chapitre suivant, on présentera une étude sur la simulation et leur performance du système hybride.

CHAPITRE III: RESULTAS DU SIMULATION

III.1. Introduction:

Pour superviser ou améliorer un processus en utilisant des méthodes traditionnelles, il est nécessaire de connaître les divers paramètres qui peuvent avoir un impact sur celui-ci et d'agir en conséquence pour contraindre le système à atteindre l'objectif fixé. Cependant, ce savoir est souvent marqué par des erreurs et des imprécisions qui accompagnent toute représentation du processus. En outre, la connexion entre les différentes variables du système rend la gestion de l'optimisation plus complexe. Ce problème peut être résolu à l'aide de méthodes dites robustes comme la logique floue. Les chercheurs et les industriels, et plus largement tous ceux qui ressentent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur entreprise, sont intéressés par la logique floue.

Au cours de ce chapitre, nous allons commencer à combiner les deux sources d'énergie renouvelable simulées précédemment, qui seront associées à une batterie de stockage qui servira de source de secours. En combinant ces diverses sources, nous créerons notre système hybride qui sera la seule source de production d'énergie électrique pour la charge. Par la suite, le modèle global sera simulé en utilisant le logiciel Matlab Simulink, mettant en évidence l'impact des paramètres du panneau solaire (température et ensoleillement) et de la turbine éolienne (variation de la vitesse du vent).

III.2. Simulation de la chaîne globale

L'objectif de notre contribution est de développer un système hybride combinant les deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. Ce système hybride éolien-photovoltaïque sera autonome, il servira de source électrique pour les zones isolées dont le raccordement au réseau n'est économiquement pas avantageux. Les batteries de stockage auront le rôle de secours en cas d'absence de soleil et de vent. Ces deux sources d'énergie sont connectées vers un bus continu via des convertisseurs. Ce système global est illustré dans la figure suivante:

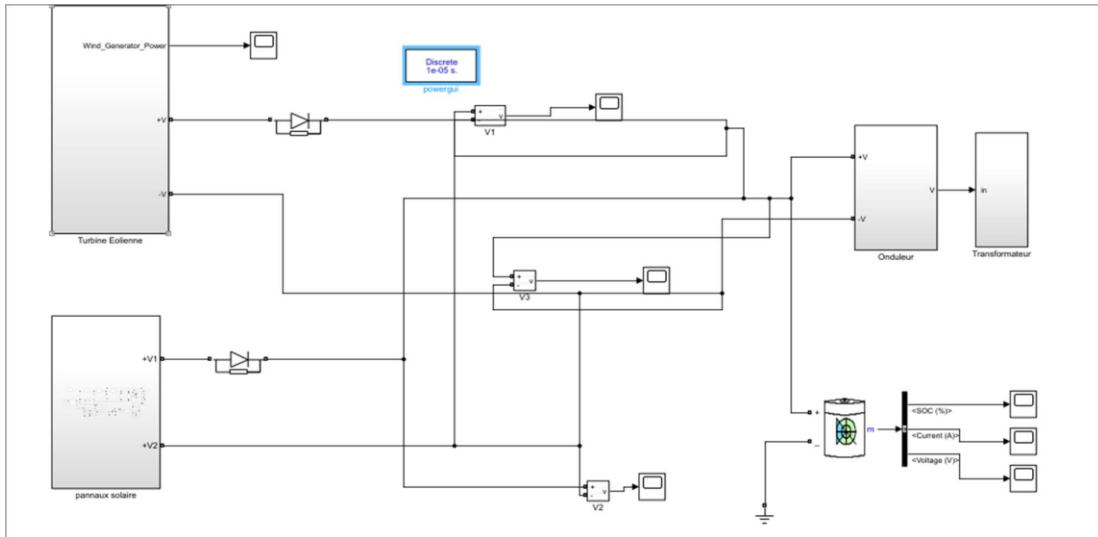


Figure III.1. Présentation de la chaîne de production

On présentera dans ce qui suit, et de manière séparée les trois chaînes du système hybride.

2.1. Présentation de la chaîne de la conversion éolienne:

La première chaîne est celle qui permet de produire de l'énergie à travers une turbine éolienne soumise à un profil de vent variable.

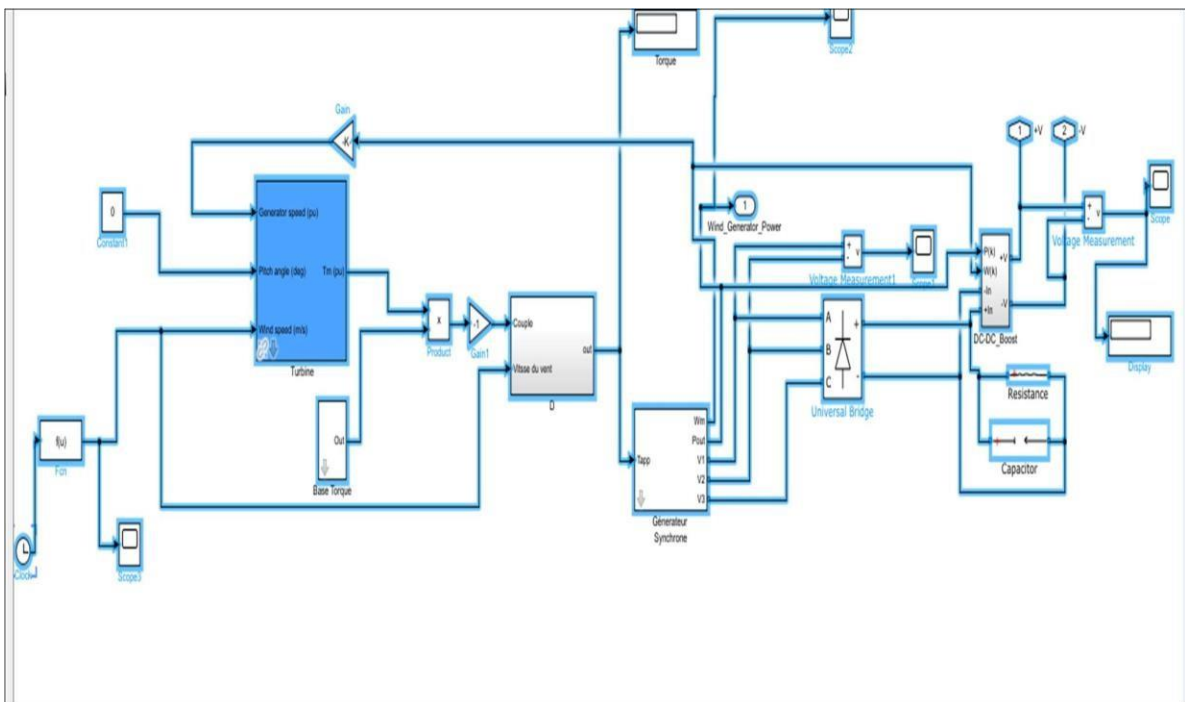


Figure III.2. Schéma bloc du système éolien.

La chaîne de conversion éolienne illustrée dans la figure (III.2) est composée de:

- Une turbine éolienne soumise à un profil de vent où la vitesse est variable de façon aléatoire.
 - Un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) qui transforme l'énergie mécanique issue de la turbine éolienne en énergie électrique.
 - Un redresseur (pont triphasé de diodes), qui joue le rôle d'un convertisseur AC/DC
 - Un hacheur survolteur série DC/DC muni d'une régulation, ce dernier permet de générer la tension désirée pour pouvoir la raccorder au bus continu.
- **2.2 Présentation de la chaîne de conversion photovoltaïque :**

La chaîne de conversion photovoltaïque a été conçue pour générer la même valeur de tension que celle de la chaîne éolienne, nous avons pour cela ajouté un hacheur survolteur série afin d'obtenir la même tension désirée que la chaîne précédente.

Cette chaîne est composée de (figure III.3):

- Un panneau solaire d'une puissance de 80 W, ce dernier permettra de convertir l'énergie solaire en énergie électrique.
- Un convertisseur DC/DC survolteur (BOOST Converter), une commande MPPT est insérée pour pouvoir extraire la puissance maximale présente dans le panneau.

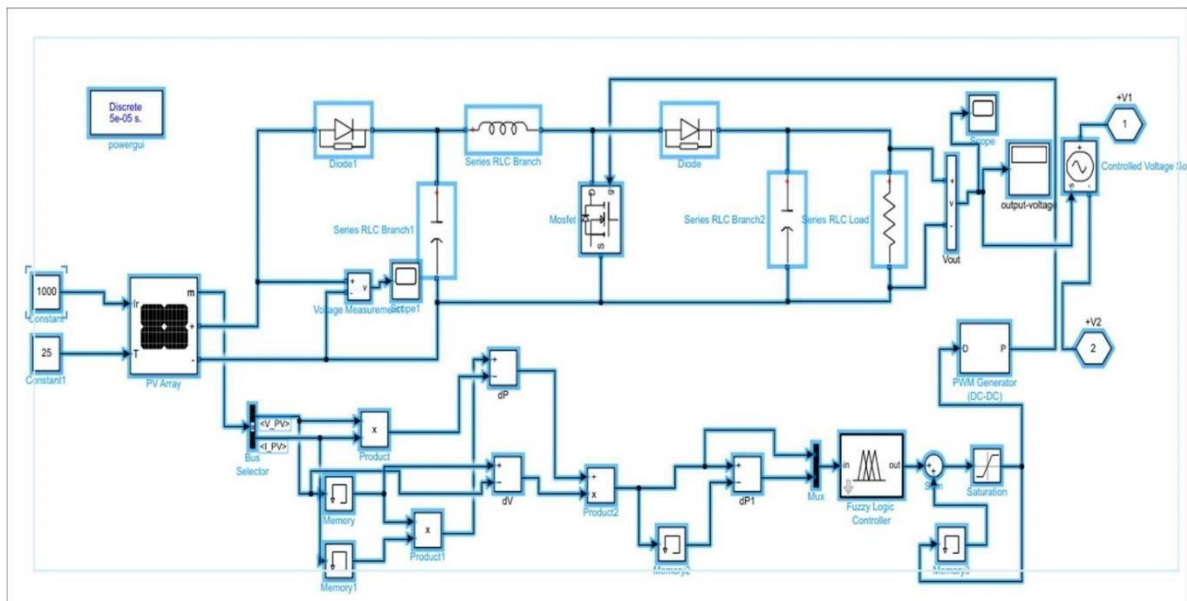


Figure III.3. Schéma bloc chaîne de conversion photovoltaïque.

La chaîne de stockage est visible dans la figure 3.1, il s'agit d'une batterie qui joue aussi le rôle d'une

source d'énergie de secours (absence ou non satisfaction à la demande de la charge de la première et la deuxième chaîne).

III. 3. Stratégie de contrôle du système par la logique floue:

La théorie du flou (Fuzzy theory) est presque devenue une mode pendant les années 90. Beaucoup de chercheurs, dans différents domaines scientifiques, utilisant la théorie formulée par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Berkeley [57]. Les systèmes flous font partie de la catégorie des « systèmes basés sur la connaissance ». Ils ont pour objectif principal de mettre en œuvre un savoir-faire humain, ou des règles heuristiques, sous forme d'un programme informatique. La logique floue offre une structure mathématique pour atteindre cet objectif. Les règles linguistiques "Si...alors" sont utilisées pour représenter l'expérience humaine, tandis qu'un moteur d'inférence calcule les actions de commande pour chaque situation spécifique. Il est très intéressant de considérer les algorithmes basés sur la logique floue comme une solution pour régler des systèmes non linéaires pour lesquels il n'y a pas de modèle mathématique. Cette théorie est extrêmement séduisante, car elle repose sur le raisonnement intuitif et tient compte de la subjectivité et de l'incertitude. Cependant, cette théorie n'est pas floue [58].

Il s'agit d'une théorie mathématique stricte, conçue pour gérer tout ce qui est subjectif et/ou méconnu. Différentes approches peuvent être utilisées pour présenter un régulateur flou, mais en général, la présentation adoptée se divise en trois parties [59]: la fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles qui relient les entrées et les sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent de déterminer la valeur réelle de sortie à partir des ensembles flous initiales. De cette manière, Les trois étapes de la mise en place d'un contrôleur flou sont la fuzzification, l'inférence et la defuzzification, comme illustré dans la figure (III.4.)

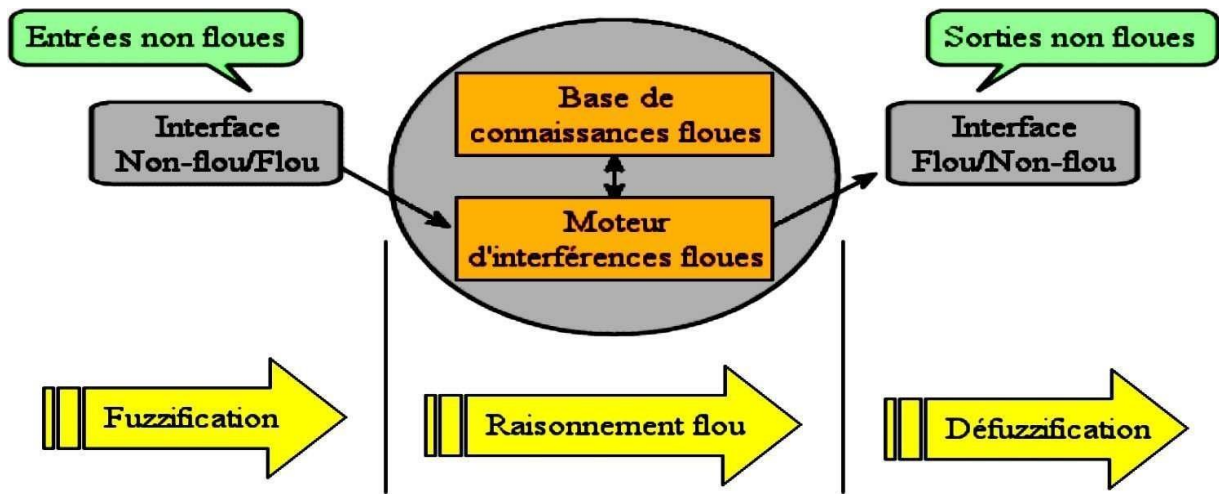


Figure III.4. Schéma de principe de la commande à logique floue

3.1 Principe et éléments de la logique floue:

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$. Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les sont graduels, ou encore flous comme l'illustre la (figure III.5) [60].

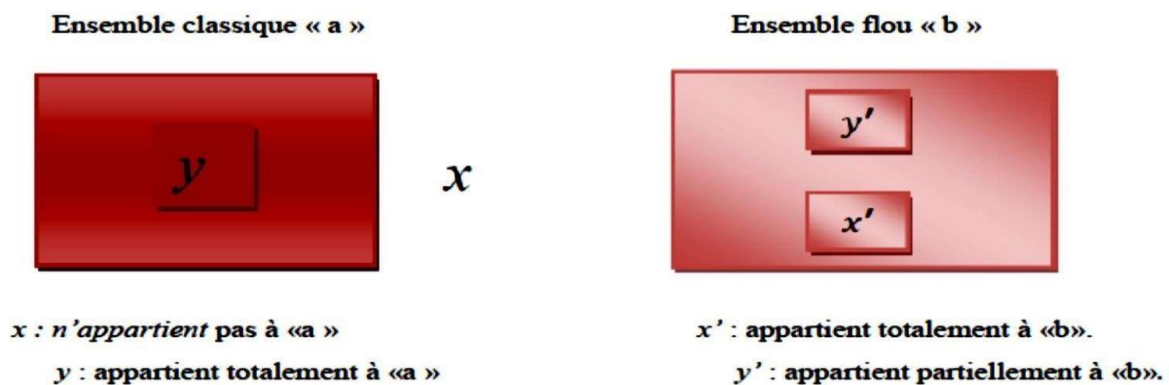


Figure III.5. Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

Dans cette partie, Nous associe aux ensembles classiques la logique binaire dit encore booléenne, et aux ensembles flous la logique floue. Ces deux logiques ne s'opposent pas, au contraire il apparait comme nous le verrons plus loin, que la logique floue est une extension de la logique binaire pour laquelle les niveaux de vérité (degrés d'appartenance que l'on note μ), au lieu d'être vrai ou faux peuvent prendre des valeurs compris entre 0 et 1 [61]. Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, présentons un exemple simple. Un patient atteint d'hépatite présente généralement les symptômes suivants:

- Le patient a une forte fièvre.
- Sa peau présente une coloration jaune.
- Il a des nausées

On peut modéliser l'état : « a une forte fièvre » par une représentation booléenne (figure III.6).

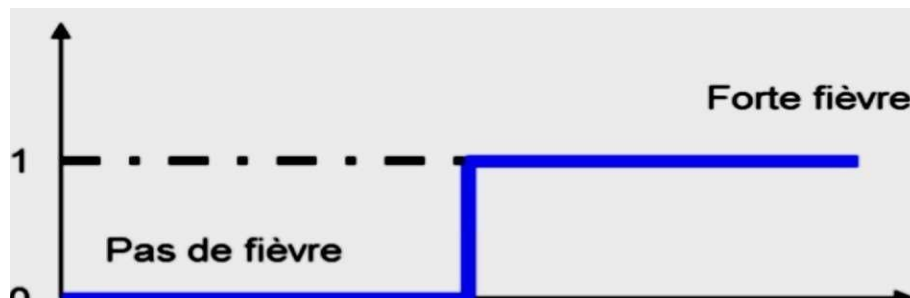


Figure III.6. Représentation des variables booléenne classique [62]

- La variable ci-dessus tente de représenter cet état.
- En deçà de la température T_0 , le patient n'a pas de température.
- Au-delà, il doit consulter.
- On doit quantifier T_0 lorsque le phénomène est complexe, la notion de fièvre est typiquement une notion floue difficilement modélisable avec l'algèbre booléenne classique.
- La variable " a une forte fièvre " manipulée par la logique floue serait la suivante : La transition entre les valeurs faux (codée 0) et vrai (codée 1) est maintenant progressive, comme le montre la figure suivante :

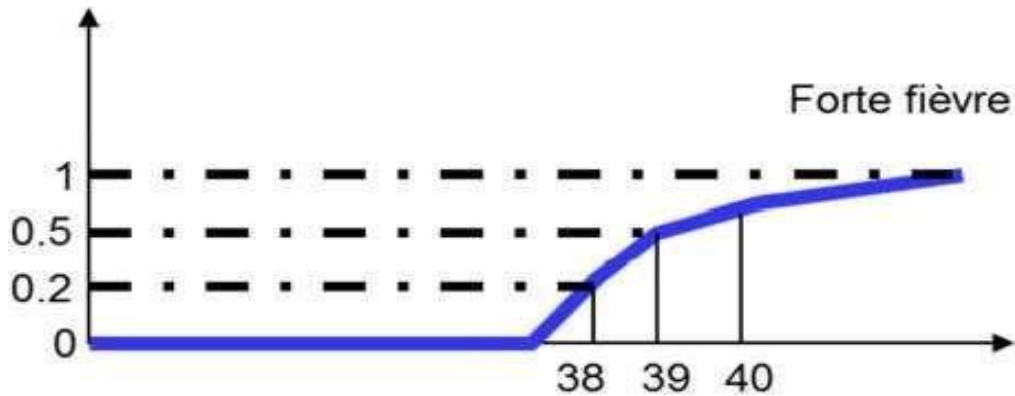


Figure III.7. Représentation des variables floues [63]

- La fonction représentée doit être considérée comme un degré d'appartenance μ à l'état décrit ou comme une probabilité d'appartenir à l'ensemble considéré.
- Ainsi, un patient présentant une température de 38° n'a qu'un faible degré d'appartenance 20% à l'état «à une forte fièvre » alors que celui qui atteint 40 présente un fort degré d'appartenance (80%) à ce même état.
- On voit qu'il est maintenant beaucoup plus aisé de fixer la température de basculement (progressif) d'état. A 39°, on n'appartient qu'à 50% à l'état « à un forte fièvre »

3.2 Structure interne d'un système flou :

Contrairement aux techniques de réglage classiques, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous ET, OU, ALORS, etc., appliquées à des variables linguistiques [64]. On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue

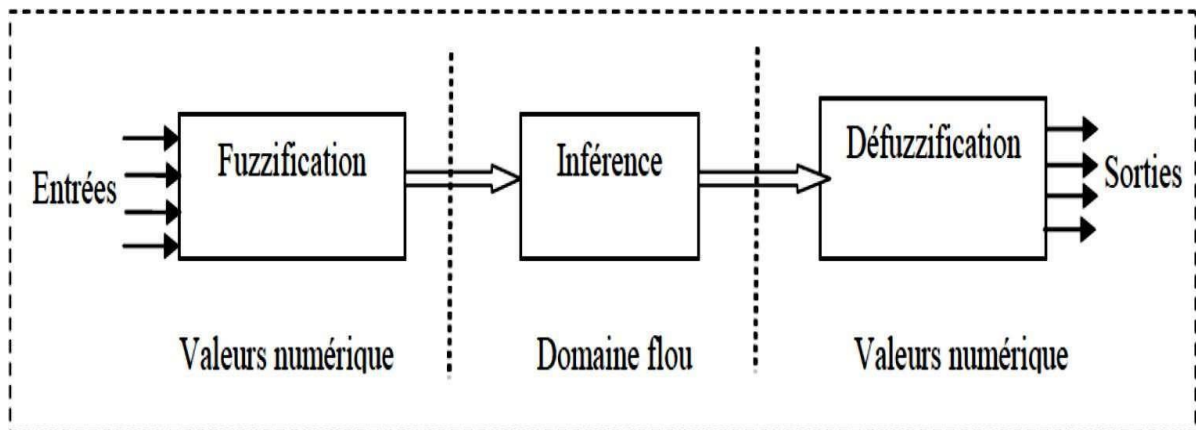


Figure III.8. Structure interne d'un Régulateur de la logique floue [64]

a. Fuzzification:

A cette étape nous les variables physiques sont transformées en variables linguistiques. A chaque variable physique correspond un degré d'appartenance à une variable linguistique. La fuzzification est réalisée dans l'inférence d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques qui peuvent avoir plusieurs formes : triangulaire, trapézoïdale, d'une cloche ou d'autres.

b. Règles d'inférence:

Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou en fonction des signaux d'entrée, elles sont exprimées sous la forme «SI ALORS ». Dans les règles floues interviennent les opérateurs "ET" et "OU". L'opérateur "ET" s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur «OU» lie les différentes règles. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces deux opérateurs. La méthode d'inférence Max-Min réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "ET" par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie, réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur "OU", qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [65].

c. **Défuzzification :**

La Défuzzification permet de convertir les ensembles flous de sortie en variables physiques adaptées à un tel processus. Il existe plusieurs stratégies de Défuzzification; on citera:

- Méthode du centre de gravité (COG): L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivant : $U_{out} = \frac{\int x\mu dx}{\int \mu dx}$
- La méthode des hauteurs : Par la méthode des hauteurs, la valeur résultante U_{out} est la moyenne tous les centres de gravité individuels, divisée par leurs hauteurs (degré d'appartenance) [66]:

III.4. Application de la logique floue pour la commande du hacheur

Le régulateur flou FLC présent dans ce système est conçu pour extraire la puissance maximale du vent (par la technique MPPT). Le FLC est l'un des meilleurs contrôleurs, utilisés pour le suivi du point de puissance maximum. Le MPPT-FLC intégré à notre système admet deux variables d'entrée :

- $Ev(k)$, l'erreur de la tension entre l'instant k et k-1 ;
- $Ep(k)$, l'erreur de la puissance entre l'instant k et k-1. Ces variables sont données par les relations suivantes :

$\{Ev(k) = Vd(k) - Vd(k-1) \quad Ep(k) = P(k) - P(k-1)$ La variable de sortie du régulateur flou D représente le rapport cyclique entrée de hacheur BOOST. En ajustant le rapport cyclique du hacheur survolteur, la puissance maximale sera atteinte [67] (Figure III.9)

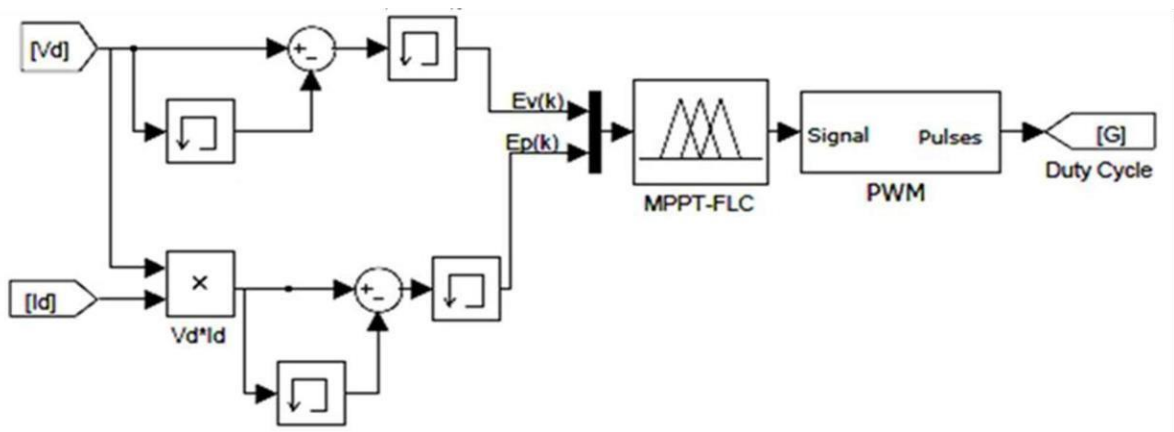


Figure III.9. Schéma du régulateur flou (MPPT-FLC) sous Matlab-Simulink

III.4. Résultats et interprétations

Le travail proposé dans ce mémoire repose globalement sur le développement d'un système hybride composé de deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. Ce système hybride éolien- photovoltaïque sert à alimenter en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très couteux et non rentable. En cas d'absence de soleil et de vent, des batteries de stockage sont prévues pour l'alimentation de secours.

Ces trois sources d'énergie sont connectées vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge.

Ce système global est illustré dans la figure (III.1). Pour réaliser la simulation de notre système hybride, nous avons utilisé le logiciel Matlab-Simulink à l'aide duquel nous avons modélisé toutes les parties du système à savoir le module éolien, le module photovoltaïque et les divers composants nécessaires à la commande. Nous avons soumis le système de production éolienne à un profil aléatoire de la vitesse de vent ; afin d'étudier le comportement de la régulation des tensions et des courants de la machine transmises au réseau.

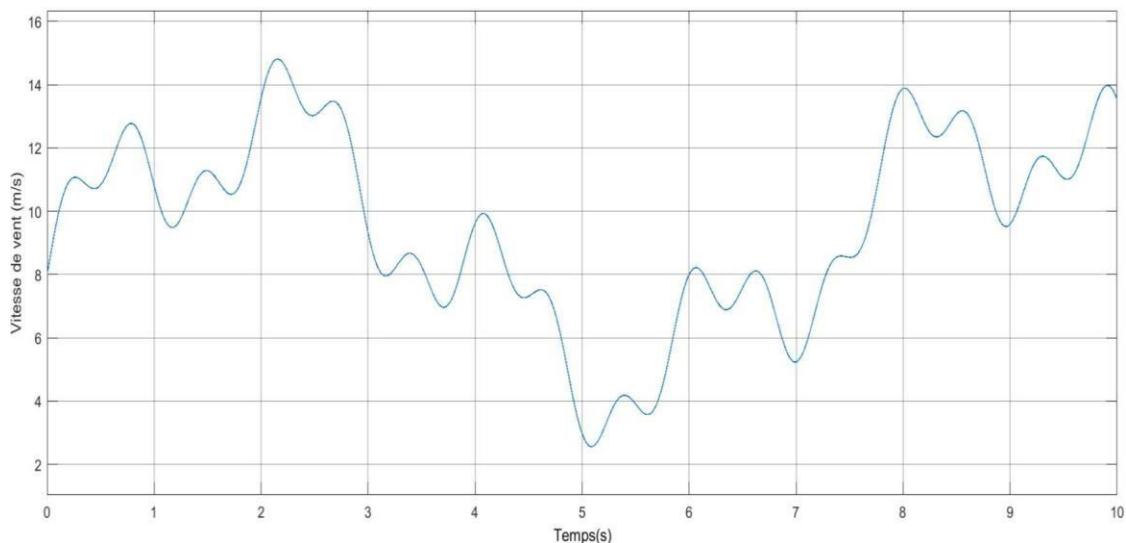


Figure III.10. Profil de la vitesse de vent

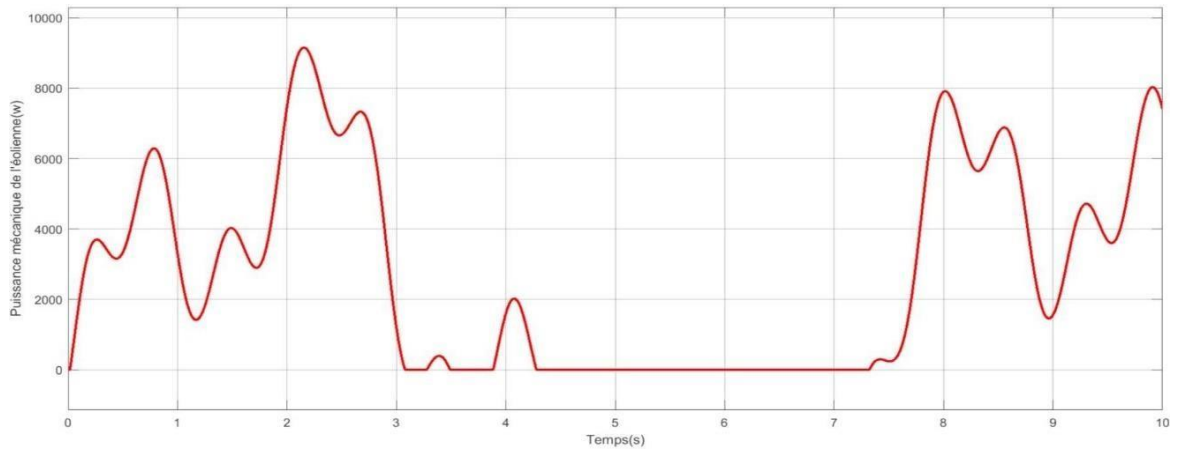


Figure III.11. Vitesse mécanique de l'éolienne

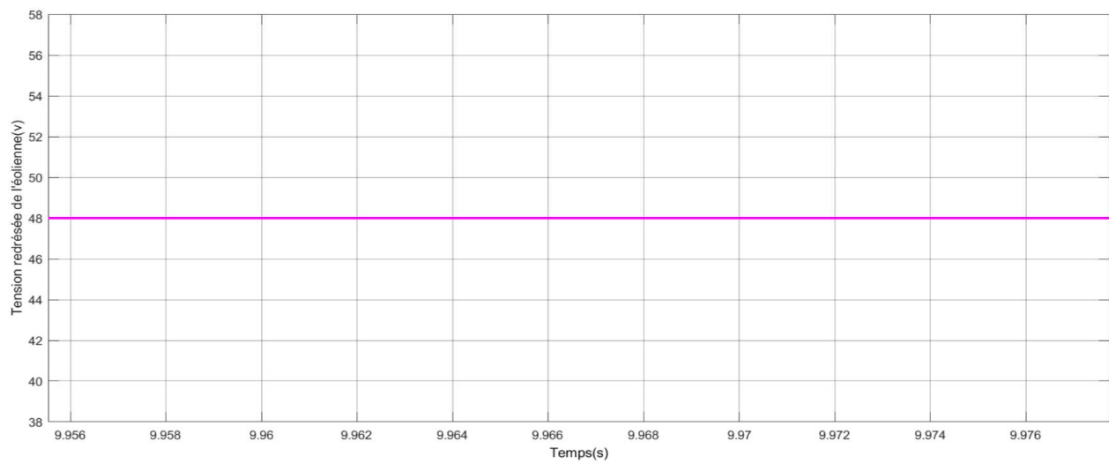


Figure III.12. Tension redressée en sortie du générateur éolienne

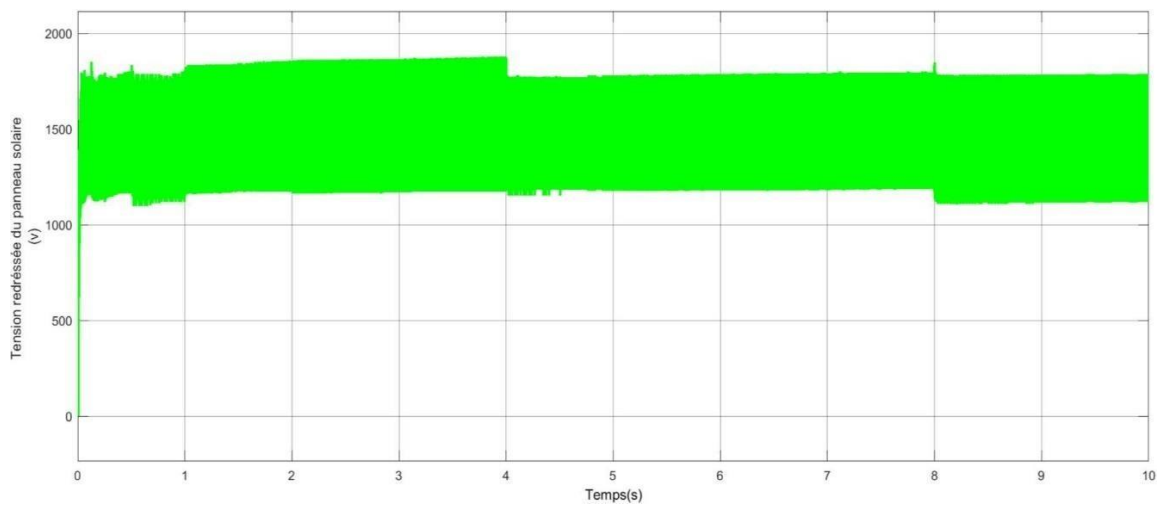


Figure III.13. Tension en sortie du panneau photovoltaïque

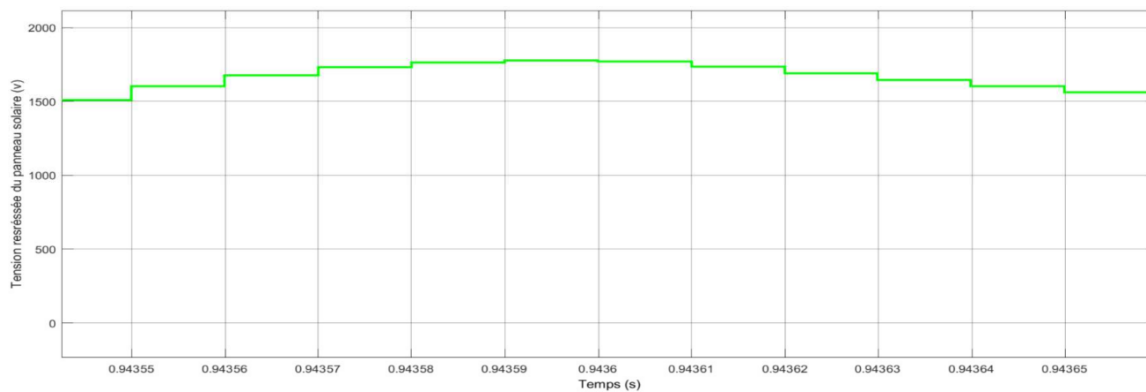


Figure III.14. Zoom de la tension en sortie du panneau photovoltaïque Tension

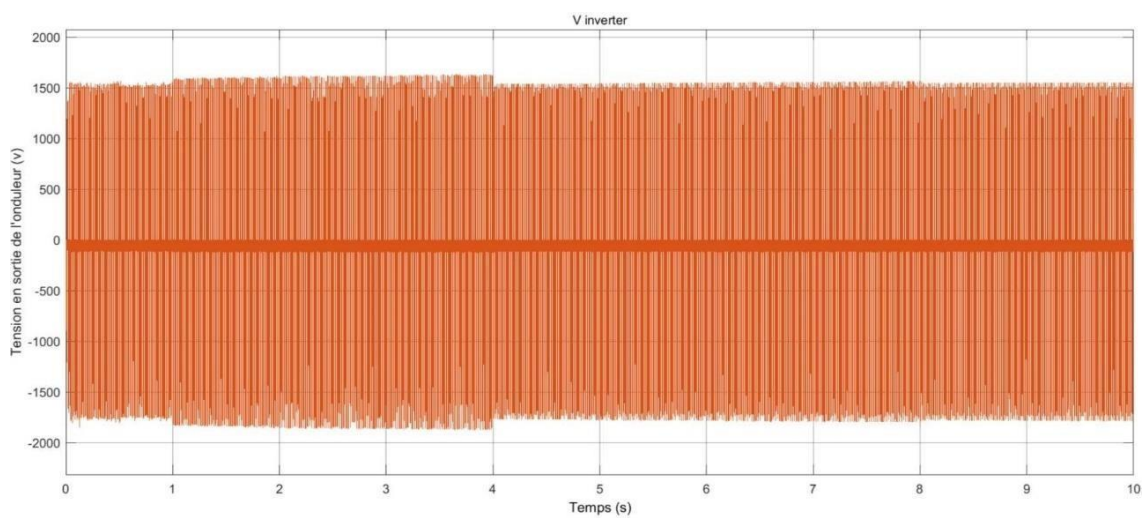


Figure III.15. Tension en sortie de l'onduleur à deux niveaux

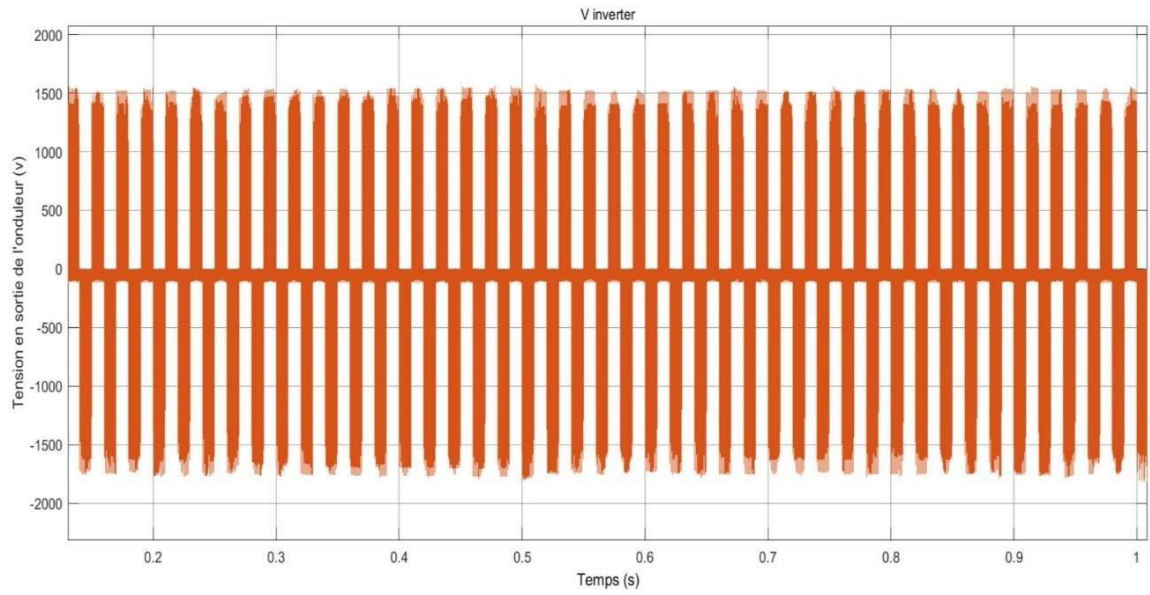


Figure III.16. Zoom de la tension en sortie de l'onduleur à deux niveaux

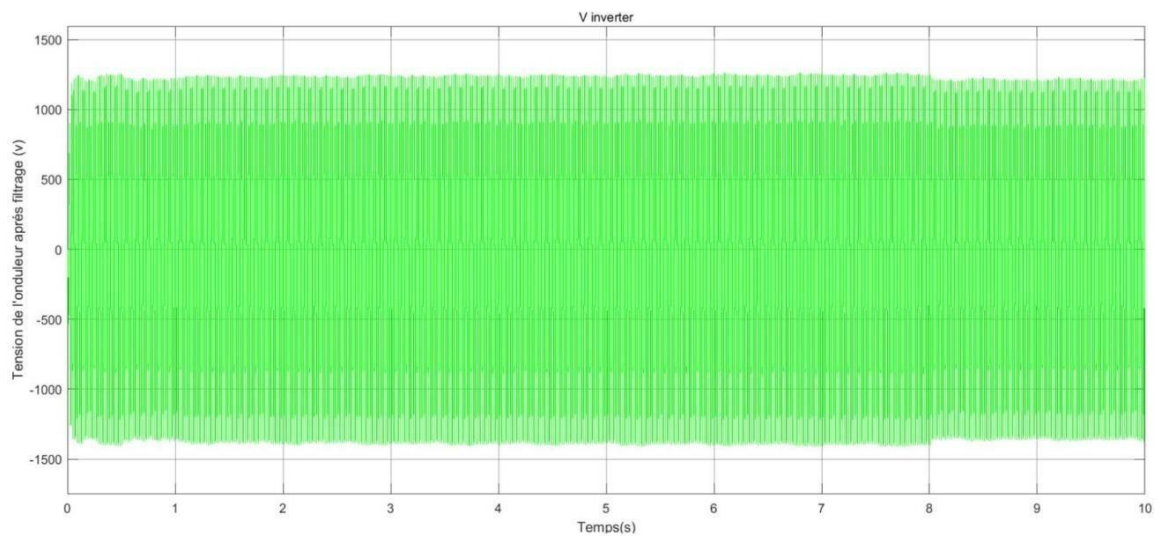


Figure III.17. Tension filtrée de l'onduleur

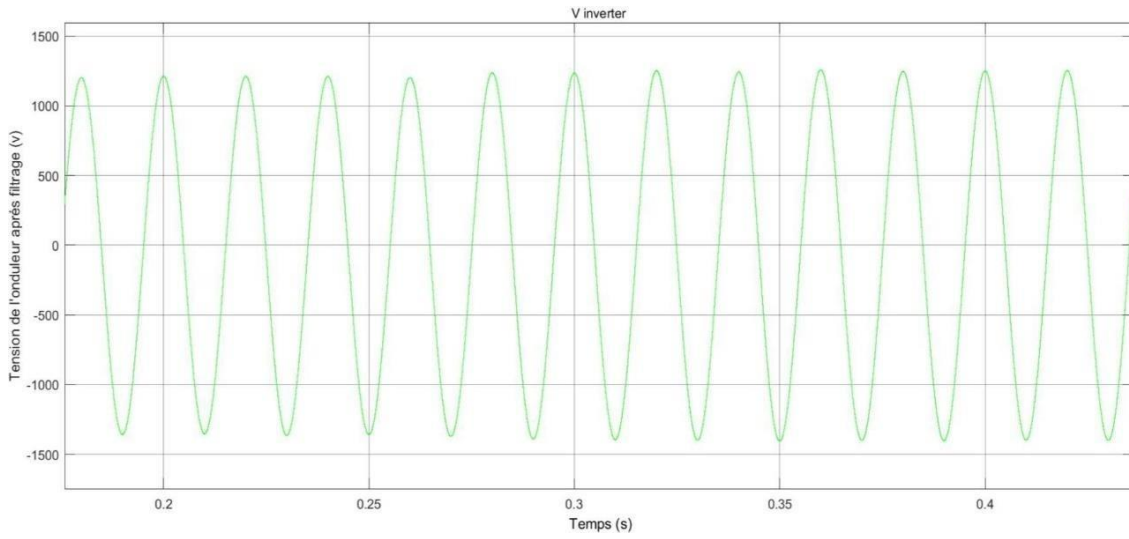


Figure III.18. Zoom de la tension filtrée de l'onduleur

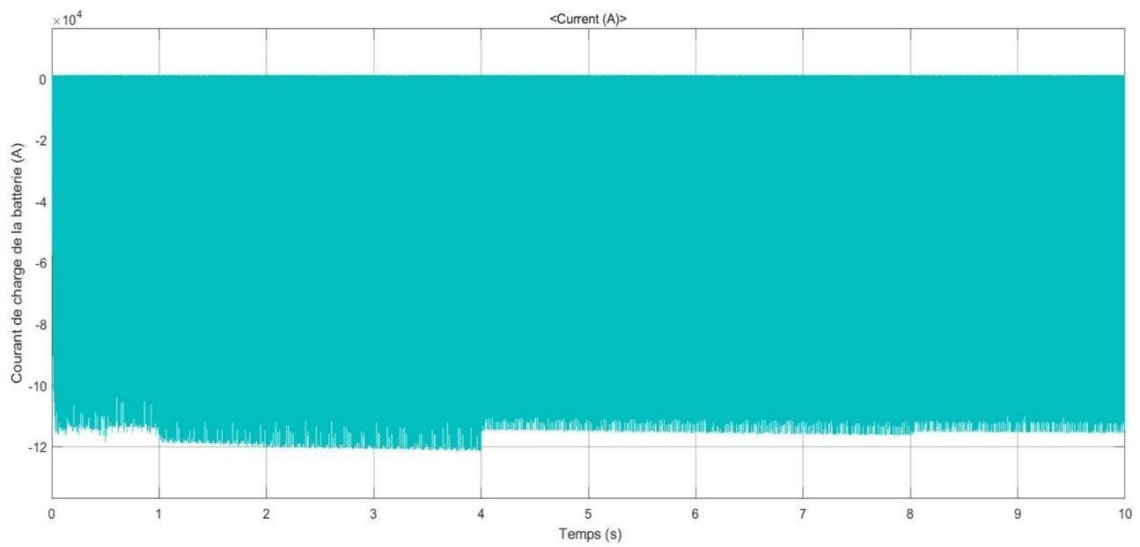


Figure III.19. Allure de courant de charge de la batterie

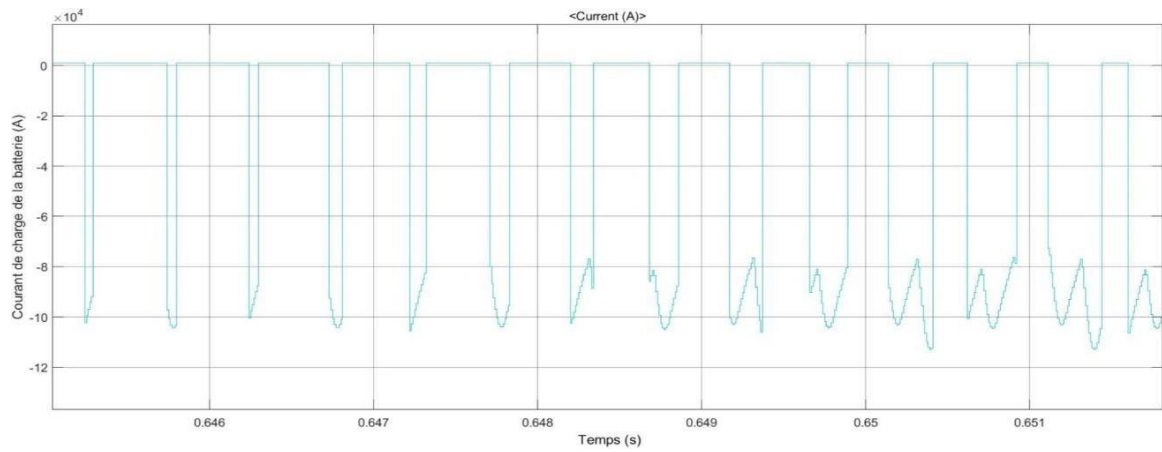


Figure III.20. Zoom du courant de charge de la batterie

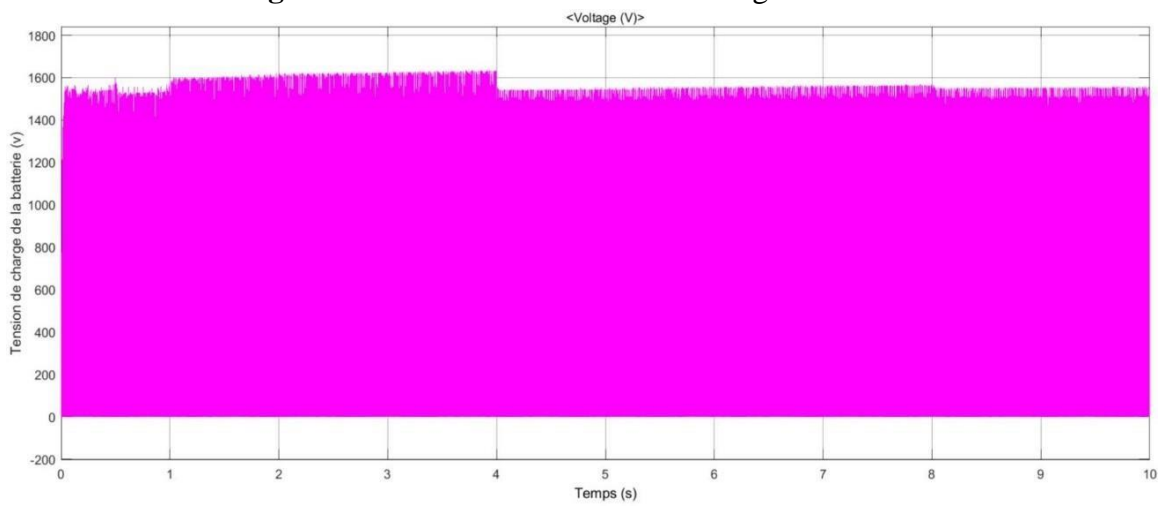


Figure III.21. Allure de tension de charge de la batterie

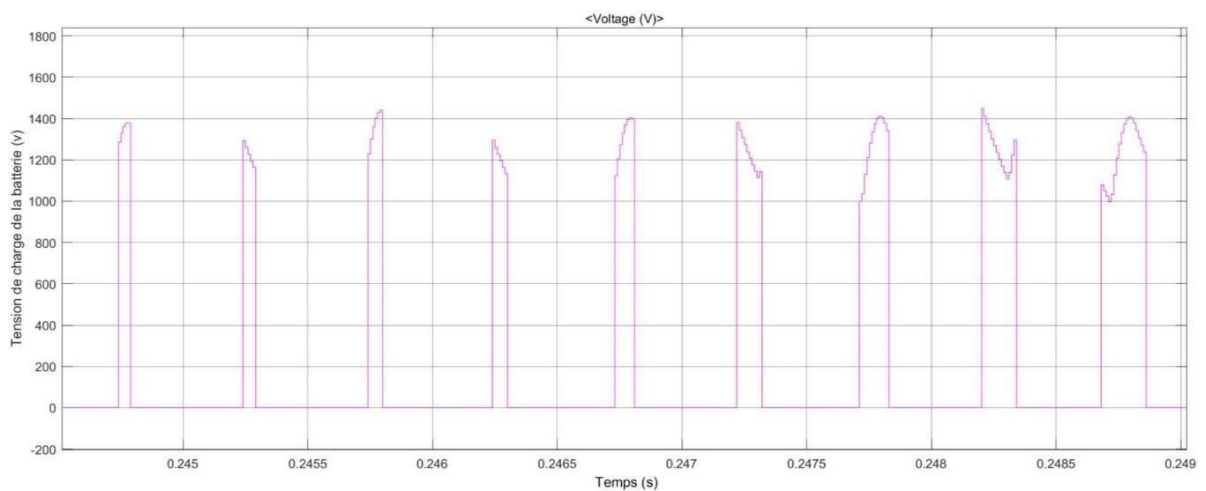


Figure III.22. Zoom de tension de charge de la batterie

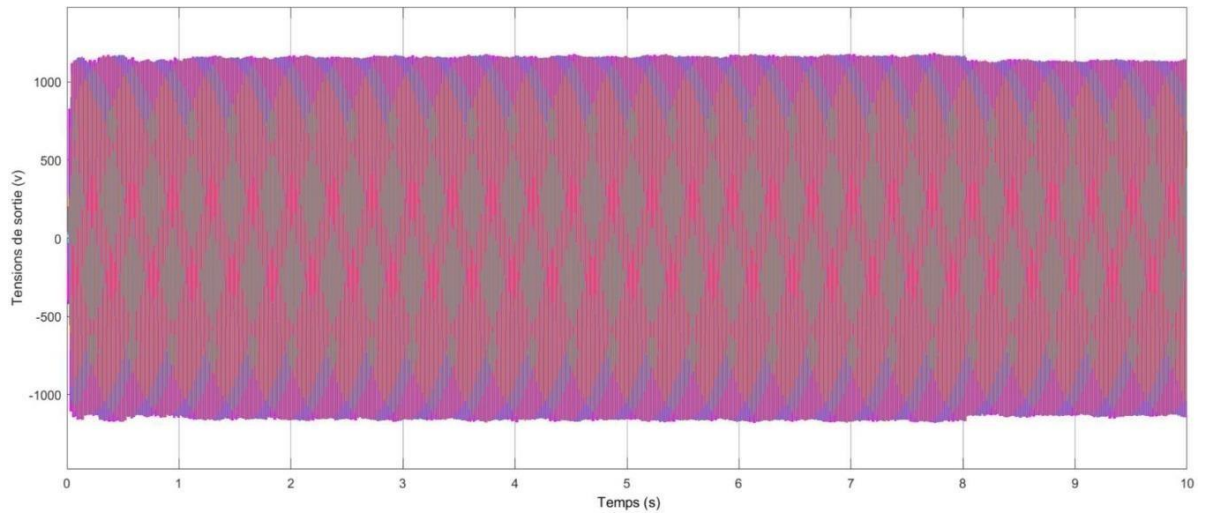


Figure III.23. Système de tensions triphasées

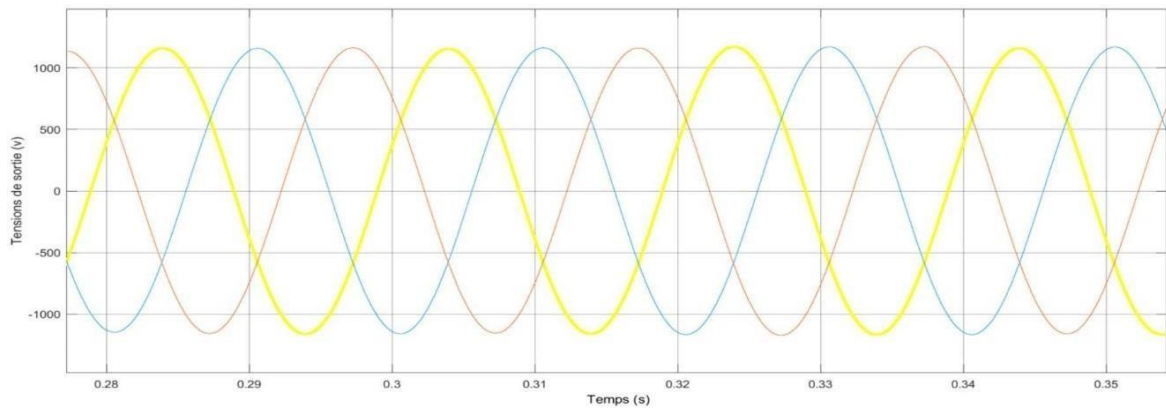


Figure III.24. Zoom du système de tensions triphasées

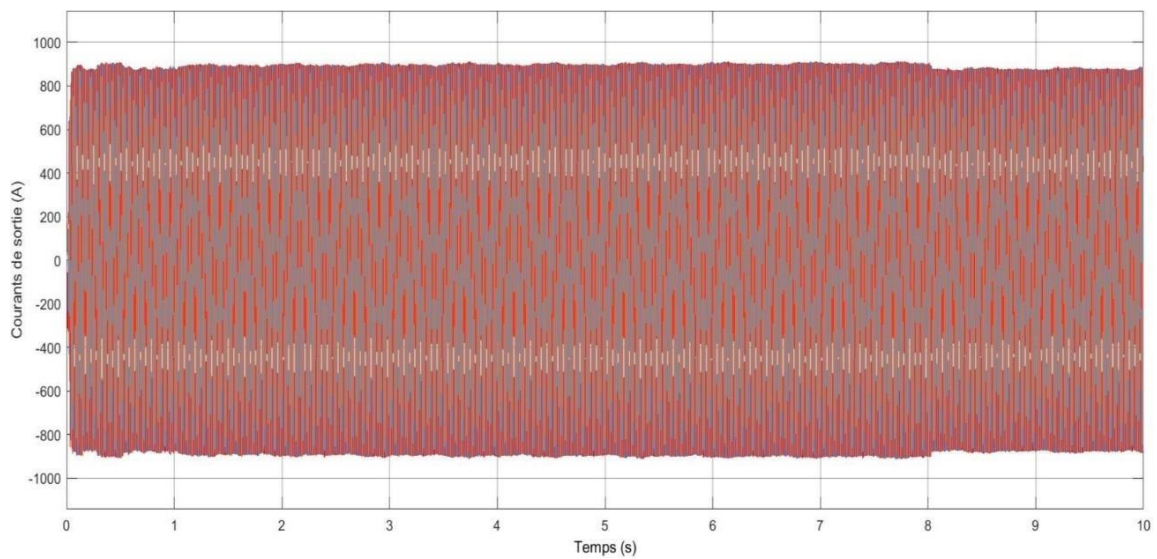


Figure III.25. Système de courants triphasés

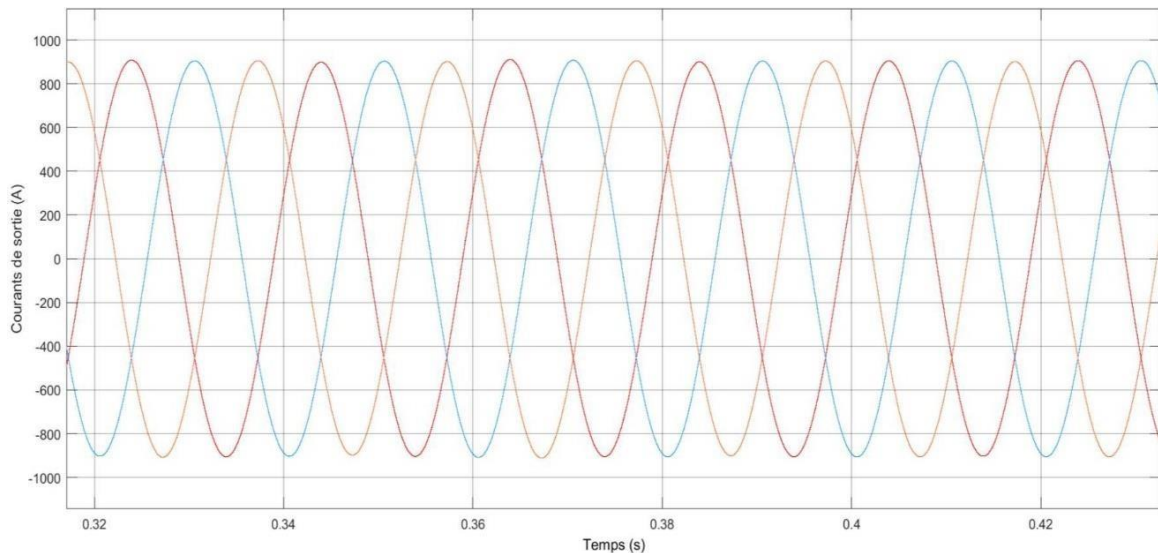


Figure III.26. Zoom du système de courants triphasés

D'après les résultats de simulation, on constate qu'ils contribuent convenablement à la production de l'énergie électrique ; chaque source a conduit tout le système hybride à satisfaire la demande en puissance de la charge.

Tout le système hybride est basé sur les chaînes de conversion d'énergie renouvelable, comme il est illustré sur les figures (III.10, à III.26). La majorité de la puissance de la charge est produite à travers ces sources grâce à la commande hacheurs BOOST.

Les commandes du système de production ne peuvent pas répondre toutes seules aux variations brusques de la demande en puissance. Pour remédier à ce problème, une chaîne de stockage est installée en parallèle du système dans le but de fournir ou d'absorber ce manque de puissance. Le rôle de la batterie de stockage consiste à garantir la continuité pour que la puissance de la charge soit toujours satisfaite quel que soit les conditions climatiques ou la variation de la charge.

III.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation du système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage par batterie. Le système global est présenté dans un premier temps; ensuite, on a dimensionné les trois sources d'énergie pour les connecter vers un même bus continu par

l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge. Les résultats des différents blocs réalisés sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale:

La présente étude visait à présenter un système hybride composé de deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque et une turbine éolienne, qui produisent de l'énergie de manière complémentaire. Effectivement, ce système hybride éolien-photovoltaïque était destiné à alimenter en électricité les zones isolées où le raccordement au réseau est extrêmement coûteux et peu rentable. Dans un premier chapitre, on examine les différentes sources d'énergie renouvelable, puis on présente et définit un système hybride, ainsi que ses différents éléments et structures. Deux sources d'énergie très compétitives et presque à maturité pour leur utilisation ont été sélectionnées, à savoir l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Un système de stockage a été ajouté à ces sources en utilisant des systèmes de stockage.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé la modélisation des divers éléments des deux chaînes de conversion. La première partie a été consacrée aux généralités de l'énergie éolienne, avec un rappel succinct des différents éléments d'un aérogénérateur et de sa modélisation. On poursuit cette étude en examinant le générateur situé en aval de la turbine éolienne. La machine synchrone à aimants permanents, utilisée en mode générateur, a été finalement sélectionnée parmi les différentes architectures. La modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents a été élaborée, puis la transformation de Park a été utilisée pour éviter la complexité des équations différentielles. Cette machine présente de nombreux avantages par rapport à ses concurrentes, en particulier pour un fonctionnement à haute vitesse.

Ensuite, La modélisation des générateurs d'énergie solaire a été développée, équipés d'un dispositif de commande qui leur permet de fonctionner en site isolé dans les conditions optimales pour une exploitation optimale de l'énergie. Des convertisseurs statiques (hacheur boost et redresseur) ont également été développés pour convertir l'énergie solaire en électricité. Au cours de troisième chapitre, nous avons brièvement présenté la logique floue. Une loi d'optimisation floue simple a été proposée pour optimiser la puissance du générateur

photovoltaïque et la turbine éolienne en fonction de la variation de sa puissance par rapport à la variation de son courant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Sugeno, G. T. Kang, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst. Man. Cybern, Vol. 15, pp.116-132, 1985
- [2] L. Zadeh, "Fuzzy sets, Information and Control", Vol.8, pp.338-353, 1965.
- [3] NAAM Abdelahak, Falkou Mostafa etude et optimisation du système (éolien / PV/Diesel) hybride autonome pour les zones rurales de la région de d'Adrar, Mémoire de Master Académique, Université de Kasdi Merbah –Ouargla 2022
- [4] C. Nichita, D. Luca, "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulator", IEEE Trans Energy. Conv., vol.17, n°4, pp.523 - 529, Dec 2002.
- [5] S. Boux de Casson, "Modélisation et Simulation D'architectures de Conversion de Puissance Associées à une Commande MPPT Destinée à Optimiser la production Electrique d'une Eolienne", Octobre 2001.
- [6] A. Mirecki, "Réalisation Pratique d'une Chaîne de Conversion D'énergie et L'implantation d'un MPPT pour une Eolienne Débitant sur Réseau Autonome", LEEI, Août 2001.
- [7] P. Barret, "Régime Transitoires dans les Machines Tournantes", Eyrolles, Paris 1982
- [8] Fartas Hafsia « étude, modélisation et simulation d'un système hybride autonome éolien-photovoltaïque » Mémoire de Master de l'université Badji Mokhtar Annaba ; 2019.
- [9] Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, Ludmilla Strogano
- [10] NAAM Abdelahak, Falkou Mostafa etude et optimisation du système (éolien / PV/Diesel) hybride autonome pour les zones rurales de la région de d'Adrar, Mémoire de Master Académique, Université de Kasdi Merbah –Ouargla 2022
- [11] NAAM Abdelahak, Falkou Mostafa etude et optimisation du système (éolien / PV/Diesel) hybride autonome pour les zones rurales de la région de d'Adrar, Mémoire de Master Académique, Université de Kasdi Merbah –Ouargla 2022
- [12] M. Lajoie-Mazene, Ph. Viarouge, "Alimentation des Machines Synchrones " Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D3630.
- [13] J. Chatelian. "Machine Electrique" Traité d'électricité vol 10, édition géométrie 1983.
- [14] S. Barkati, "Commande Robuste par Retour D'état d'une Machine Asynchrone", Thèse de Magister, ENP, 1997
- [15] G. Séguier et F. Labrique. "Les Convertisseur de L'électronique de Puissance, et Comportement Dynamique", Tome5, Technique et documentation –Lavoisier, 1998.
- [16] J. P. Hautier, J, P. Caron, Convertisseur Statique, Méthodologie Causale de Modélisation et de Commande, Edition Techip

A. Djahbar. "Commande Vectoriel d'une Machines Asynchrone Alimentée en Tension", Ecole Nationale Polytechnique, 1995

[17] C. Luo, B. Ooi, "Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms.", IEEE Transactions on power systems, vol.21, N°3, Septembre 2006, pp. 708-716.

[18] T. Ackerman, "Wind power in power systems", Wiley, 2005.

[19] Robyns B., Davigny A., Saudemont C., Ansel A., Courtecuisse V., Plumel S., Deuse J., « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », Actes des journées du club EEA, Gif sur Yvette, 26-28 mai 1997, Paris, Hermès, p. 53-68.

[20] Bousseau P., Belhome R., Monnot E., Laverdure N., Boëda D., Rove D., Bacha S., « Contribution of wind farms to ancillary service », CIGRE 2006, Paris

[21] A. Ansel, B. Robyns, 'Production décentralisée d'électricité au moyen d'une micro centrale hydraulique au fil de l'eau', 3EI, décembre 2004, p46-57

[22] A. Ansel, B. Robyns, "Small hydroelectricity : from fixed to variable speed electromechanical drives," Electromotion, vol.13, n°2, 2006

[23] A. Ansel, B. Robyns, "Modelling and simulation of an autonomous variable speed micro hydropower station." Mathematics and computers in simulation, vol. 71, issues 4 – 6, 19 June 2006.

[24] C. Abbey, G. Joos, "Energy storage and management in wind turbine generator systems," EPE-PEMC 2006, Portoroz, Slovenia, 30 August-1 September, 2006.

[25] Enercon, « World's most powerful wind turbine installed near Emden », Windblatt, Issue 04, 6- 7, 2007.

[26] F. Messai, " Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable." .Thèse de Magister Institut d'électrotechnique Université mentouri constantine2009

[27] J. Appelbaum, "Starting and Study State Characteristics of DC Motors by Solar Cell ". Solar Energy, Vol. EC-1, N°1, pp17-25, March1989.

[28] Ameziane Sadek, Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien, Mémoire de Magister Université de Batna 200

[29] REDJEM Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.

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

[31] Bendoukha Adel Mohamed Adda « Zakaria Modélisation et simulation d'un système hybride éolien-photovoltaïque-diesel »

[32] BOUNAB Imad - BIAD Anis Gestion de puissance d'un système multi sources (photovoltaïque-éolien)

- [33] BOUNAB Imad - BIAD Anis Gestion de puissance d'un système multi sources (photovoltaïque-éolien)
- [34] F. Nicola, G. Petrone, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ", IEEE. Vol.20, N°4, pp.963-973, 2005.
- [35] Youcef Imen Dehani Amina « Etude et simulation d'un système hybride à base d'énergies renouvelables (photovoltaïque –éolien) »
- [36] M. Mimouni, N. Mansouri, "Vectorial Command of an Asynchronous Motor Fed by a Photovoltaic Generator", Renewable Energy 29 (2004) 433–442
- [37] R. Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering - February 2008.
- [38] R Chedid, Y Saliba " Optimization of Autonomous Solar-Wind Power Systems for Lebanon", Solar Energy, pp. 51 1-5 17. (1996)
- [39] F. Nicola, G. Petrone, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ", IEEE. Vol.20, N°4, pp.963-973, 2005.
- [40] M. Mimouni, N. Mansouri, "Vectorial Command of an Asynchronous Motor Fed by a Photovoltaic Generator", Renewable Energy 29 (2004) 433–442
- [41] R. Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering - February 2008.
- [42] C. Cabal, C. Alonsol, "Adaptive Digital MPPT Control for Photovoltaic Applications" . IEEE Trans Power Electronics, pp 2414-2419, 2007.
- [43] N. Hamrouni, M. Jraidi," Measurements and Simulation of PV Pumping Systems Parameters using MPPT and PWM Control Strategies" IEEE MELECON 2006, May 16-19, Benalmádena (Málaga), Spain 2006
- [44] R Chedid, Y Saliba " Optimization of Autonomous Solar-Wind Power Systems for Lebanon", Solar Energy, pp. 51 1-5 17. (1996)
- [45] N. Hamrouni, M. Jraidi," Measurements and Simulation of PV Pumping Systems Parameters using MPPT and PWM Control Strategies" IEEE MELECON 2006, May 16-19, Benalmádena (Málaga), Spain 2006
- [46] R. Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering - February 2008.
- [47] H. D Battista, P. F. Puleston, "Sliding Mode Control of Wind Energy Systems with DOIG. Power Efficiency and Torsional Dynamics Optimization, " IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 2, pp. 728–734, May 2000
- [48] Shigeo Morimoto, " Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG, " IEEE Transactions on industry applications, Vol. 41, N). 1, January/February 2005.

- [49] M. Sugeno, G. T. Kang, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst. Man. Cybern, Vol. 15, pp.116-132, 1985
- [50] L.Zadeh, "Fuzzy sets, Information and Control", Vol.8, pp.338-353, 1965.
- [51] J. M. Mendel, "Fuzzy systems for Engineering A Tutorial", IEEE Proc, Vol. 83, N°3, pp 347-377, March, 1995
- [52] D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel » Revue des Énergies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 623 – 633.
- [53] Valenciaga, F. and Puleston, P. F. « *Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy* ». IEEETransactions. Energy Conversion pp.398–405, 2005.
- [54] IZGHECHE yousra « Estimation de la vitesse de la machine d'une éolienne » mémoire de master de l'université Badji Mokhtar Annaba ; 2019.
- [55] Waleed Obaid, A-K.Hamid, Chaouki Ghenai « Wind-Fuel-Cell-Solar Hybrid Electric Boat Power Design with MPPT System” 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO).
- [56] Meflah AIssa « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister de l'université Abou Bakr Belkad- Tlemcen, 2011.
- [57] Guillaume Pongo Pyoumea” Modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents” mémoire présenté à l'université du Québec en Abitibi Témiscamingue comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie ; Avril2018.
- [58] B. Abdessemed, K. Salah-ddine, C. Elidrissi Mohamed “Design and Modeling of DC/ DC Boost Converter for Mobile Device Applications”. International Journal of Science and Technology Volume 2 No. 5, May 2013.
- [59] . B. M Hasaneen, and Adel A. Elbaset Mohammed, “Design and simulation of DC/DC boost converter,” Power System Conf. Middle-East, pp. 335-340, 2008.
- [60] Ch. Ghabara, H. Jouini, M. Lahbib, A. Mami “Stratégie d'optimisation floue du point d'extraction de la puissance maximale (MPPT) pour les petites éoliennes connectées à des sites isolés” International conference on green energy and environmental engineering (GEEE 2017) ; International journal of scientific research and engineering Technology-IGSET. VOL 5 pp 48-54.
- [61] L. Reznik “Fuzzy Controllers” Victoria University of Technology, Melbourne, Australia. Newnes, An imprint of Butterworth-Heinemann. First published 1997.
- [62] . A. Asri, Y. Mihoub, S. Hassaine, P.O. Logerais, T. Allaoui, “Intelligent Maximum Power Tracking Control of a PMSG Wind Energy Conversion System,” Asian Journal of Control • April 2019.
- [63]. A.A. Sale, Noura A. Nour Aldin, Ahmed M. Azmy, Walid S. E. Abdellatif,” A Fuzzy Logic-Based MPPT Technique for PMSG Wind Generation System”, INTERNATIONAL

JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH. A.A. Salem et al, Vol.9, No.4, December 2019.

[64] . Yacine Hocini, Ahmed. Allali, Houari Merabet Boulouiha “Power fuzzy adaptive control for wind turbine” International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Vol. 10, No. 5, Octobre 2020, pp. 5262~5273. ISSN : 2088- 8708, DOI: 10.11591/ijece.v10i5.pp5262-5273.

[66]. ASSAM Azzeddine, BOUKERMA Redouane « Optimisation et commande d’une chaîne de conversion éolienne par la logique floue adaptative » Thèse de master de l’université Akli Mohand Oulhadj-Bouira ; 2019. [64]. Louar Fateh « Modélisation et simulation d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne à base d’une machine synchrone à aimant permanent » Thèse de DOCTORAT 3ème cycle de l’université Badji Mokhtar Annaba ; 2016.

[67]. Bontjes Joamie « Etude d'un hacheur survolteur » ECAM EPMI Septembre 6, 2017

