

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénierat
Département : Électrotechnique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique.
Spécialité : COMMANDES ÉLECTRIQUES

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

ETUDE ET GESTION D'UN SYSTEME HYBRIDE

Présenté par : *BENTRAD Moutaz Billeh & BOULASSEL Adel*

Encadrant : *BAHI Tahar* Professeur Université Badji Mokhtar-Annaba

Jury de Soutenance :

KAHOUL Nabil	MCA	Université Badji Mokhtar-Annaba	Président
BAHI Tahar	PROF	Université Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
MERABET Leila	MCA	Université Badji Mokhtar-Annaba	Examinatrice

Année Universitaire : 2019/2020



Remerciements

- ❖ *Nous remercions tout d'abord **الله** pour nous avoir donné le courage et la force de mener à bien ce travail.*
- ❖ *Nous remercions profondément nos **parents** respectifs pour tout ce qu'ils ont fait pour nous offrir les conditions nécessaires afin qu'on puisse devenir ce que nous sommes. Qu'ils trouvent dans ce manuscrit toutes nos reconnaissances.*
- ❖ *Nous remercions particulièrement notre encadreur Monsieur **BAHI Tahar** pour sa patience, sa confiance, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité impeccable et sa bienveillance durant la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude.*
- ❖ *Nous vifs remerciements vont aussi aux **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour toutes leurs remarques et critiques constructives.*
- ❖ *Que tous **nos enseignants** trouvent notre sincère reconnaissance pour leur contribution à notre formation.*
- ❖ *Enfin, Merci à **toutes les personnes** qu'on n'a pas cité et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail. Merci pour leur sympathie et simplement pour le plaisir qu'on a eu à les côtoyer quotidiennement.*

M.B. Bentrاد & A. Boulassel



SOMMAIRE

RESUME	1
INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE 1	
	CONTEXTE ENERGETIQUE
1.1	Introduction 3
1.2	Etat énergétique 3
1.3	Energies renouvelables 4
1.3.1	Energie Eolienne 4
1.3.2	Energie biomasse 6
1.3.3	Energie hydraulique 6
1.3.4	Energie solaire thermique 7
1.3.5	Energie solaire photovoltaïque 8
1.4	Secteur de l'énergie en Algérie 8
1.4.7	Energie Solaire 9
1.4.8	Energie Eolienne 9
1.5	Conclusion 11

CHAPITRE 2**SYSTEMES DE CONVERSION DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ENERGIE ELECTRIQUE**

2.1	Introduction	12
2.2	Système solaire	12
2.2.1	Introduction	12
2.2.2	Energie solaire	13
2.2.3	Potentiel et rayonnement solaire	14
2.2.4	Effet et cellules photovoltaïques	16
2.2.5	Avantages et Inconvénients d'énergie solaire	20
2.2.5.1	<i>Avantages</i>	20
2.2.5.2	<i>Inconvénients</i>	20
2.2.6	Structure de la conversion solaire	21
2.2.6.1	<i>Convertisseur Boost</i>	21
2.2.6.2	<i>Onduleur</i>	22
2.3	Système éolien	23
2.3.1	Introduction	23
2.3.2	Energie éolienne	23
2.3.3	Potentiel énergétique en Algérie	23
2.3.4	Principe de fonctionnement	24
2.3.5	Types des turbines éoliennes	25
2.3.5.1	<i>Eoliennes à axe vertical</i>	26
2.3.5.2	<i>Eoliennes à axe horizontal</i>	26
2.3.5.3	<i>Dimensions des éoliennes</i>	27
2.3.6	Conversion électrique d'énergie éolienne	27
2.4	Systèmes hybrides	27
2.4.1	Introduction	27
2.4.2	Structure de systèmes hybrides	28
2.4.3	Régime du fonctionnement	28
2.4.4	Hybridation photovoltaïque/éolienne/stockage	29
2.5	Conclusion	30

CHAPITRE 3

MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE

3.1	Introduction	31
3.2	Modélisation du système photovoltaïque	31
3.2.1	Introduction	31
3.2.2	Association des cellules photovoltaïques	32
3.2.3	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	33
3.2.3.1	<i>Puissance crête</i>	33
3.2.3.2	<i>Caractéristique courant - tension d'un module</i>	33
3.2.3.3	<i>Tension en circuit ouvert (V_c)</i>	34
3.2.3.4	<i>Courant de court circuit (I_c)</i>	34
3.2.3.5	<i>Point du fonctionnement P_m (V_m, m)</i>	34
3.2.3.6	<i>Facteur de forme (FF)</i>	35
3.2.3.7	<i>Rendement(η)</i>	35
3.2.4	Modèle d'une cellule photovoltaïque	35
3.2.5	Simulation du système photovoltaïque	38
3.3	Modélisation d'un système éolien	41
3.3.1	Modèle du vent	41
3.3.2	Modèle de la turbine	42
3.3.3	Coefficient de puissance	45
3.3.4	Coefficient de couple	46
3.3.5	Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la génératrice	47
3.3.6	Simulation d'un système éolien	50
3.4	Modélisation du dispositif de stockage	53
3.5	Conclusion	55

CHAPITRE 4

COMMANDE ET GESTION DU SYSTEME HYBRIDE

4.1	Introduction	56
4.2	Structure et commande	56
4.3	Composants et stratégie de contrôle	58

4.3.1	Hacheur survolteur (Elévateur)	58
4.3.2	Modélisation d'un onduleur	60
4.3.3	Modulation de largeur d'impulsion	62
4.3.4	Redresseur	63
4.4	Méthode de poursuite du point de puissance maximale	64
4.4.1	Méthode de la dérivée de la puissance	64
4.4.2	Méthode par incrémentation de conductance	66
4.4.3	Logique floue	68
4.4.3.1	<i>Principe de base de la logique floue</i>	68
4.4.4	Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine	68
4.4.4.1	<i>Contrôle à calage variable de pale</i>	69
4.5	Différentes modes de fonctionnement du système hybride	69
4.6	Simulation et discussion	71
4.7	Conclusion	74
Conclusion Générale		75
Bibliographie		76

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

CONTEXTE ENERGETIQUE

Fig. 1.1	Système de conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Fig. 1.2	Chaîne de conversion éolienne	5
Fig. 1.3	Système de conversion de l'énergie biomasse	6
Fig. 1.4	Système de conversion de l'énergie hydraulique	7
Fig. 1.5	Système de conversion de l'énergie thermique	7
Fig. 1.6	Système de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque	8
Fig. 1.7	Carte du vent annuel moyen à 50m en Algérie	10

CHAPITRE 2

SYSTEMES DE CONVERSION DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ENERGIE ELECTRIQUE

Fig. 2.1	Schéma en coupe du soleil	13
Fig. 2.2	Spectre du soleil terrestre et extra-terrestre	14
Fig. 2.3	Types de rayonnements	15
Fig. 2.4	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	17
Fig. 2.5	Cellules mono et poly cristallin	18
Fig. 2.6	Fig. 2. 6. Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%	18
Fig. 2.7	Chaîne de conversion d'énergie solaire	18
Fig. 2.8	Convertisseur élévateur (Boost)	21
Fig. 2.9	Symbole d'un onduleur	22
Fig. 2.10	Carte préliminaire de vents en Algérie	22
Fig. 2.11	Principe de la conversion d'énergie éolienne	23
Fig. 2.12	Exemple de système éolien de type aérogénérateur	24
Fig. 2.13	Technologies éoliennes à axe vertical	24
Fig. 2.14	Technologies éoliennes à axe horizontale	26
Fig. 2.15	Classification des systèmes hybrides	29
Fig. 2.16	Structure SEH photovoltaïque /éolienne/Batterie	30

CHAPITRE 3**MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE**

Fig. 3.1	Circuit de l'association de N_s cellules en série et parallèles	32
Fig. 3.2	Caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$ avec N_p cellules en parallèle et N_p série.	33
Fig. 3.3	caractéristiques $I_{PV}=f(V_{PV})$ et $P_{PV}=f(V_{PV})$ d'un module PV	34
Fig. 3.4	Circuit électrique équivalent à une diode d'une cellule PV	36
Fig. 3.5	Influence de l'irradiation sur la caractéristique $I(V)$	39
Fig. 3.6	Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P(V)$	39
Fig. 3.7	Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$	40
Fig. 3.8	Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$	40
Fig. 3.9	Système éolien	41
Fig. 3.10	Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne	43
Fig. 3.11	Schéma de principe de la théorie de Betz	44
Fig. 3.12	Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ	46
Fig. 3.13	Chaîne de transmission d'un système éolien	47
Fig. 3.14	Schéma bloc d'une turbine éolienne	49
Fig. 3.15	Schéma bloc du modèle de la turbine	50
Fig. 3.16	Fonction de probabilité de vitesse de vent	50
Fig. 3.17	Paramètre du modèle utilisé	51
Fig. 3.18	Caractéristiques de voilure dans le plan puissance-vitesse	52
Fig. 3.19	Caractéristique puissance (per unit) -vitesse de vent	52
Fig. 3.20	Caractéristique coefficient C_P - l'angle de calage β	53
Fig. 3.21	Modèle R-C de la batterie	53
Fig. 3.22	Schéma équivalent de η_b éléments en série	54

Chapitre 4**COMMANDE ET GESTION DU SYSTEME HYBRIDE**

Fig. 4.1	Chaîne de conversion photovoltaïque	57
Fig. 4.2	Chaîne de conversion éolienne	57
Fig. 4.3	Schéma bloc du système hybride	57
Fig. 4.4	Hacheur parallèle.	58
Fig. 4.5	Hacheur parallèle. Fonctionnement à courant de source	59

	ininterrompu	
Fig. 4.6	Hacheur parallèle. Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompue	60
Fig. 4.7	Représentation des composants bidirectionnels	61
Fig. 4.8	Allure de tension fournie par MLI	62
Fig. 4.9	Redresseur monophasé à diode	63
Fig. 4.10	Caractéristique du point de puissance maximale PPM	65
Fig. 4.11	Organigramme d'algorithme MPPT (P&O)	66
Fig. 4.12	Organigramme d'algorithme MPPT (inc-cond)	67
Fig. 4.13	Irradiation et température considérées	72
Fig. 4.14	Profil du vent, courants statoriques et puissances	73
Fig. 4.15	Mode Charge/décharge et signaux de commandes	73
Fig. 4.16	Gestion des puissances produites	74

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

CONTEXTE ENERGETIQUE

Tableau 1. 1	Potentiel Algérien en énergie solaire	9
--------------	---------------------------------------	---

CHAPITRE 2

SYSTEMES DE CONVERSION DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ENERGIE ELECTRIQUE

Tableau.2. 1	Potentiel d'énergie solaire en Algérie	16
Tableau 2. 2	Tableau récapitulatif des différents types de technologies	19
Tableau 2. 3	Différentes puissances produites selon la hauteur de l'installation	27
Tableau 2. 4	Ressources énergétiques des différentes régions d'Algérie	29

CHAPITRE 3

MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE

Tableau 3.1	coefficient de correction	42
-------------	---------------------------	----

Résumé

Les systèmes de production électrique à base d'énergies renouvelables sont en voie de développement afin d'assurer une transition énergétique efficace et satisfaire la demande énergétique sans cesse croissante.

Les énergies renouvelables solaire et éolienne représentent des alternatives aux énergies fossiles grâce à leurs avantages remarquables. Toutefois, le caractère intermittent de leur disponibilité nécessite l'utilisation d'un système de stockage.

Ce travail constitue une étude de gestion des puissances d'un système hybride autonome PV/éolien/batterie.

ملخص

يجري تطوير أنظمة طاقة متجددة لضمان انتقال فعال للطاقة وتلبية الطلب المتزايد على الطاقة.

تمثل الطاقات المتجددة للطاقة الشمسية والرياح بدائل للوقود الأحفوري بفضل مزاياها المعتبرة. ومع ذلك، فإن الطبيعة المتقطعة لوفرتها تتطلب استخدام نظام تخزين.

يشكل هذا العمل دراسة إدارة الطاقة لنظام هجين يتكون من طاقة شمسية/طاقة الرياح/بطارية.

Abstract

Renewable energy power systems are being developed to ensure an efficient energy transition and meet the ever-increasing energy demand.

Solar and wind renewable energies represent alternatives to fossil fuels thanks to their remarkable advantages. However, the intermittent nature of their availability requires the use of a storage system.

This work constitutes a study of power management of a hybrid PV / wind / battery hybrid system.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir car les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter et les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des ressources fossiles. Malheureusement, l'exploitation de ce type de sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus, une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures donc face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

Etant donné le danger que représente les énergies fossiles, il est devenu primordial de trouver une solution économique et peu polluante pour la production d'énergie électrique. A cet effet, les énergies renouvelables (énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne, hydraulique, etc.) qui sont des énergies illimitées contrairement aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Parmi elles, l'énergie solaire et l'énergie éolienne représentent une possibilité de développement efficace et durable et c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes hybrides.

L'optimisation des systèmes hybrides est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

CHAPITRE 1

CONTEXTE ENERGETIQUE

1.1. Introduction

A l'heure du développement des nouvelles technologies pour la production de l'électricité et de l'intégration des sources à énergies renouvelables, le monde gère une phase de transition énergétique très importante pour pouvoir satisfaire le besoin en demande énergétique sans cesse croissante.

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'état énergétique. Il montre le modèle basé sur l'utilisation des hydrocarbures et la transition vers la voie des utilisations des énergies renouvelables.

1.2. Etat énergétique

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit qu'en raison de la croissance démographique et économique, la demande énergétique mondiale devrait inévitablement croître et pourrait atteindre 17 Gtep (Gigatonnes équivalent pétrole) en 2030. A cet effet, le domaine de l'énergie est en transition entre la situation actuelle, où les hydrocarbures notamment le pétrole tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique, et un futur proche, où d'autres sources à énergies renouvelables doivent être développées suffisamment pour les remplacer tout en assurant un développement durable, en terme de la

préservation de l'environnement et de la pérennité des sources d'approvisionnement.

Ceci en raison d'une prise de conscience sur les conséquences de l'exploitation des sources d'énergies fossiles sur l'environnement, et de l'épuisement inévitablement des ressources d'une telle énergie dans un avenir proche.

En effet, la transition énergétique n'est pas choisie uniquement par crainte de changement climatique et de l'épuisement des ressources mais plutôt d'engager le pays d'agir avec la conviction pour créer des industries durables ainsi que de nouveaux emplois et surtout satisfaire la demande énergétique.

Par ailleurs, la conception de la transition est corrélée à la disponibilité des sources énergétiques spécifiques à chaque pays, à la protection de l'environnement, à la culture sociétale et à la volonté politique des gouvernements. C'est dans ce contexte que l'Algérie développe la conception d'une stratégie intelligente de développement durable par la diversification des ressources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne,...etc.) [1].

1.3. Energies renouvelables

1.3.1. Energie Eolienne

Elle permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis finalement en énergie électrique.

La figure ci-dessous, montre les parties principales d'une chaîne de conversion éolienne (CCE).

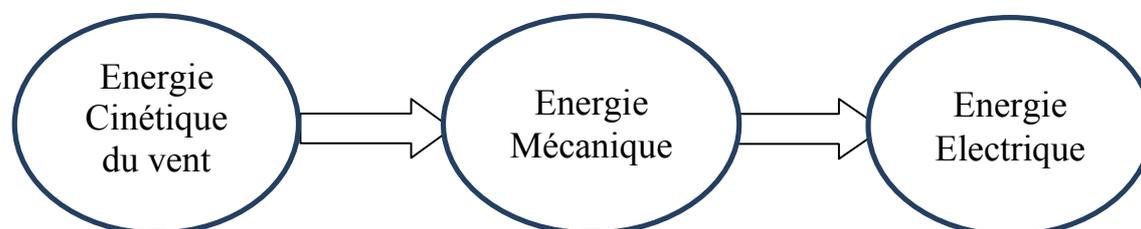


Fig.1. 1 Système de conversion de l'énergie cinétique du vent

La CCE est composée fondamentalement, de deux (2) parties : la partie mécanique et la partie électrique. Ces dernières sont constituées comme le montre la figure 1.2 : la turbine éolienne, le multiplicateur, le générateur électrique, de convertisseurs statiques équipés avec leurs dispositifs de commande et d'un transformateur connecté à un réseau électrique.

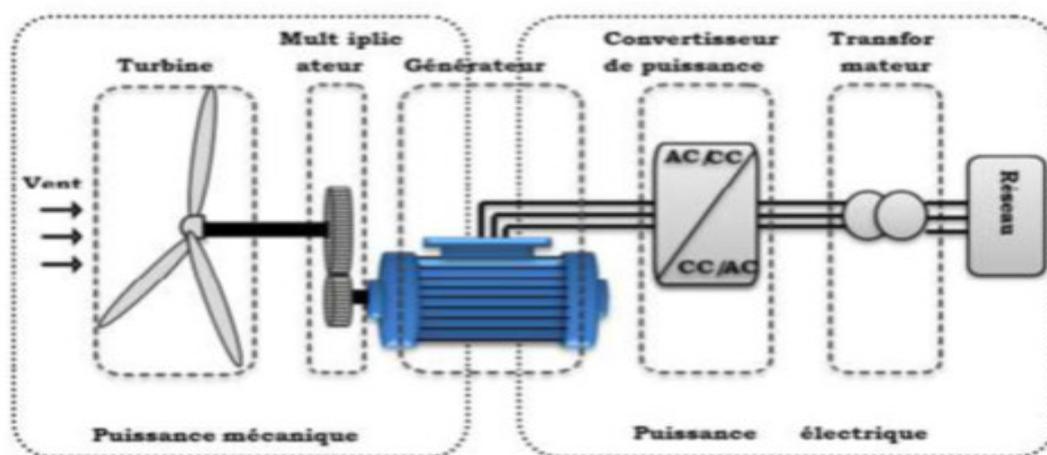


Fig.1. 2 Chaîne de conversion éolienne

Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la **turbine (rotor)**, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Les chaînes de conversion éoliennes produisent de l'électricité sans rejet de gaz carbonique (CO₂) ni de déchets radio actifs dans l'atmosphère. Ceci constitue l'un de leurs avantages (Energie propre). Par ailleurs, du fait qu'elles nécessitent d'une part des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences et que d'autre part, la vitesse du vent est de nature aléatoire, ces points sont comptés parmi la liste des inconvénients de telles installations.

1.3.2. Energie biomasse

La biomasse est une énergie renouvelable non polluante, elle a été exploitée en industrie bien avant les hydrocarbures (charbon, pétrole) [2].

La centrale à biomasse produit de l'électricité grâce à l'énergie thermique dégagée par la combustion de déchets végétaux, de déchets ménagers et le biogaz, ainsi la vapeur qui se dégage est utilisée pour la cuisson, le chauffage des maisons (cogénération) et principalement pour la production de l'électricité grâce à une génératrice.

La figure 1.3 montre les étapes de la production de l'énergie électrique en utilisant un système de conversion biomasse.

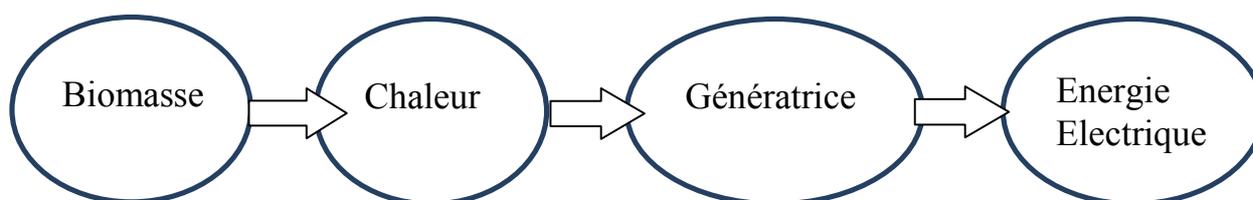


Fig.1. 3 Système de conversion de l'énergie biomasse

La tension est élevée à l'aide de transformateur afin qu'elle puisse être transportée sur les lignes à très haute tension du réseau et les fumées sont filtrées avant d'être rejetées. Les centrales à biomasse produisent une énergie régulière car elles peuvent fonctionner continuellement et émettent peu de CO₂.

1.3.3. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité de manière durable, souple, compétitive, elle répond à faible coût aux brusques fluctuations de la demande d'électricité.

Une centrale hydraulique produit de l'électricité grâce à une chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes, et ce en faisant tourner une turbine qui à son tour met en mouvement un alternateur qui lui est relié.

L'eau utilisée est préalablement stockée dans un barrage puis conduit via des tuyaux vers la centrale hydraulique située en contre bas. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif dont la tension sera élevée par des transformateurs pour qu'il puisse être transporté dans les lignes à très haute tension.

La figure 1.4 illustre les différentes parties de transformation d'un système de conversion hydraulique.

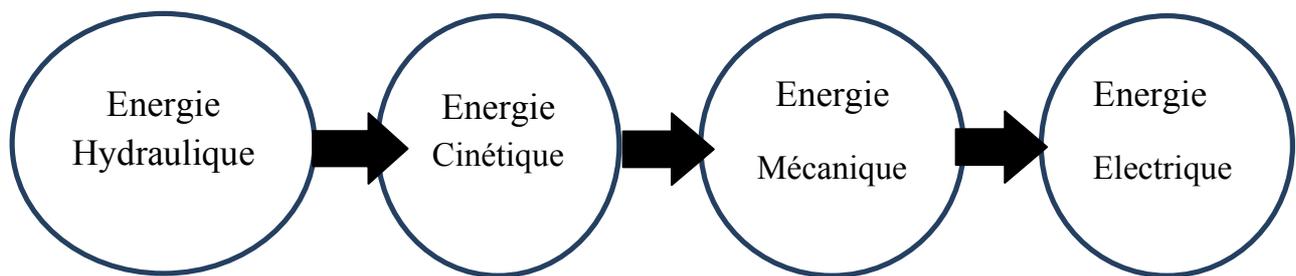


Fig.1. 4 Système de conversion de l'énergie hydraulique

1.3.4. Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but de chauffer un liquide ou gaz, l'énergie produite par cet échauffement servira pour entrainer des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, ou pour produire le froid, etc....

La figure ci-dessous montre le schéma bloc des étapes principales d'un système de conversion de l'énergie thermique.

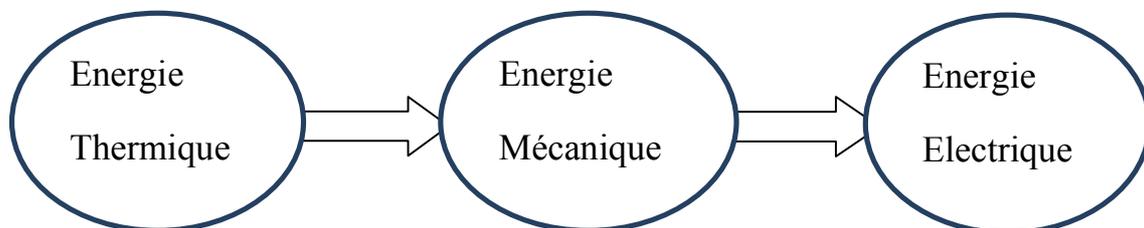


Fig.1. 5 Système de conversion de l'énergie thermique.

1.3.5. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Dans les chaînes de conversion photovoltaïque, on distingue deux (2) types de technologies : actives et passives [3].

- Actives : l'énergie solaire transformée sous forme électrique ou thermique est utilisée directement, c'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique.
- Passive : elles sont basées sur l'orientation des bâtiments par rapport au soleil ou à l'utilisation des matériaux spéciaux afin de permettre l'exploitation de l'énergie solaire.

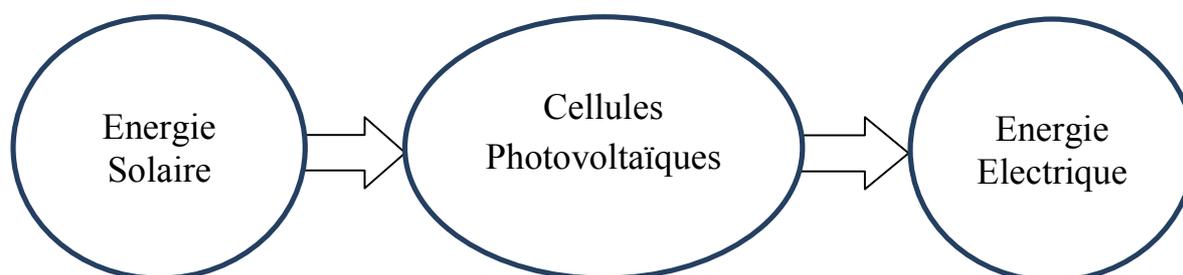


Fig.1. 6 Système de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque

1.4. Secteur de l'énergie en Algérie

En Algérie, les premières et les plus grandes découvertes de gisements en hydrocarbures, principalement en pétrole et en gaz naturel ont été réalisées entre les années 50_s et 60_s. De ce fait, l'Algérie est passée alors rapidement au statut de producteur et d'exportateur de l'énergie. Et, depuis 1971 à nos jours, le secteur de l'énergie constitue le secteur essentiel du modèle de développement économique

du pays basé sur la rente issue des hydrocarbures. Cependant, la chute du prix du pétrole et le gaz depuis l'année 2014 et par ailleurs, les chiffres annoncés par le conseil des ministres en date du 06 octobre 2005 qui montrent qu'une tendance à la baisse devrait s'accélérer en matière de découverte et de récupération des hydrocarbures conventionnels, ont montré la fragilité de ce modèle de développement [4].

En parallèle, l'Algérie dispose d'un énorme potentiel en énergies renouvelables (EnR), principalement l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

1.4.1. Energie Solaire

Tableau.1. 1: Potentiel Algérien en énergie solaire

<i>Zones</i>	<i>Zone entière</i>	<i>Hautes Plaines</i>	<i>Sahara</i>	<i>Total</i>
Surface (%)	4	10	86	100
Superficie (km ²)	95.270	238.174	2.048.297	2.381.741
Durée moyenne quotidienne d'ensoleillement (h)	7.26	8.22	9.59	
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500	
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650	
Densité d'énergie solaire Quotidienne (kWh/m ²)	4.66	5.21	7.26	
Energie quotidienne Potentielle (TWh)	443.96	1240.89	14870.63	16555.48

1.4.2. Energie Eolienne

L'énergie éolienne constitue la deuxième source importante pour la production d'électricité en Algérie. Cependant, comme le potentiel éolien dépend fondamentalement la densité de puissance moyenne (W/m²) du vent qu'elle varie selon la localisation.

Rappelons qu'à 50m de hauteur, un site est dit éligible à l'installation d'un parc éolien s'il présente une densité de puissance comprise entre 300 et 400 W/m², ainsi la figure qui présente la carte du vent annuel moyen à hauteur de 50m en Algérie permet d'estimer le potentiel Eolien de notre pays [5].

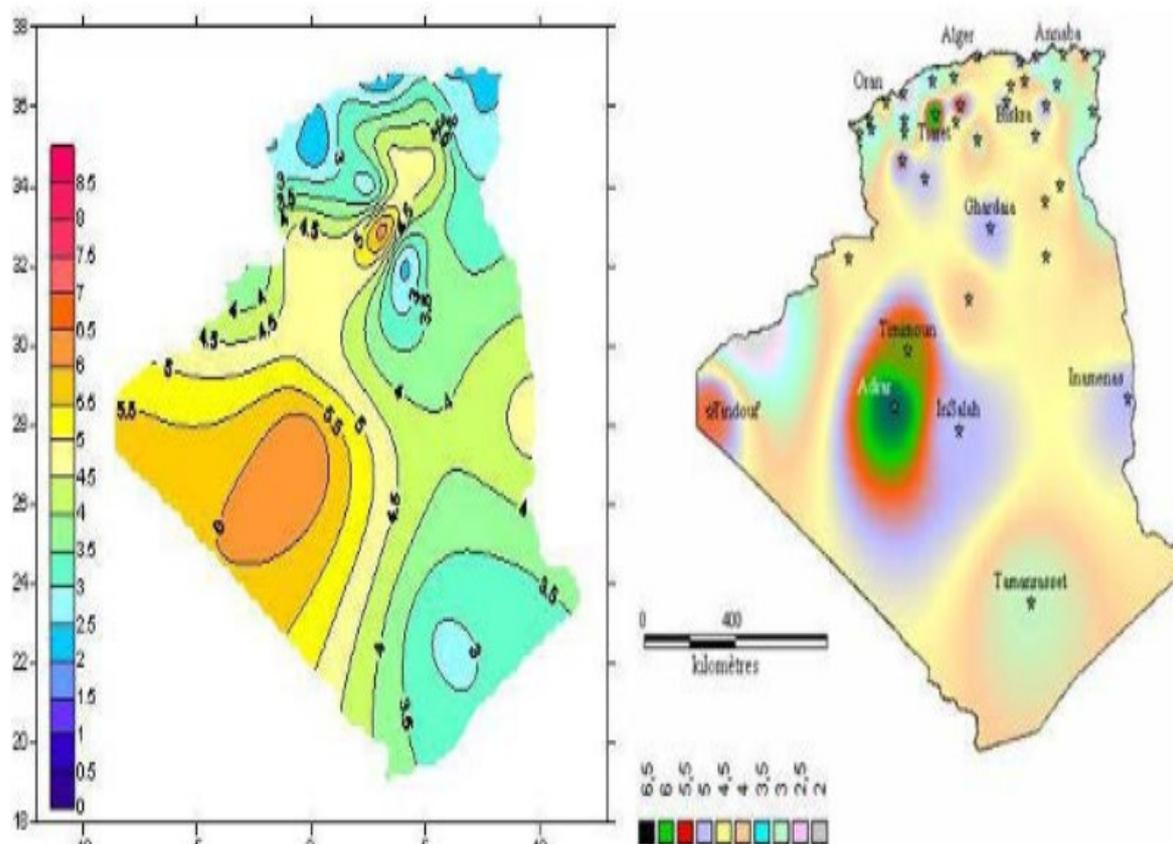


Fig.1. 7 Carte du vent annuel moyen à 50m en Algérie

Le potentiel national en énergie renouvelable étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables.

En effet, l'Algérie s'est engagée dans l'ère des énergies renouvelables, afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux

problématiques de préservation de ressources énergétiques d'origine fossile, à travers la mise en place d'un cadre juridique favorable et d'un fond national par la maîtrise de l'énergie, ainsi que par le lancement d'un programme ambitieux pour le développement de ces énergies renouvelables, qui a été adopté par le gouvernement en février 2011, révisé en mai 2015, suite à de nouvelles données dans la scène internationale, baisse des coûts des filières photovoltaïques et éoliennes qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer (maturité technologique, coûts compétitifs), par contre les coûts de la filière CSP (Concentrated Solar Power), (solaire thermique) qui restent élevés associés à une technologie non encore mature, notamment en termes de stockage avec une croissance très lente du développement de son marché.

Notons que le programme des énergies renouvelables actualisé par le gouvernement algérien consiste à installer une puissance d'énergie renouvelable de l'ordre de 22.000 MW à l'horizon 2030 où 12.000 MW pour le marché national, ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10.000 MW. Selon le plan de travail du gouvernement annoncé en février 2020, la part de la capacité des énergies renouvelables est révisée de 15.000 MW à l'horizon 2035. A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïques et éoliennes en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique [5].

1.5. Conclusion

La production de l'énergie électrique est une des préoccupations major des décideurs des pays du monde. En effet, elle constitue le palier du développement économique, de la sécurité, de la stabilité et l'avancée technologique. Ainsi, au vue de la situation énergétique et environnementale à travers le monde, la réussite de la transition énergétique est le défi de tout le monde. il s'agit donc de mettre tous les moyens au profit du développement et l'exploitation des énergies renouvelables.

CHAPITRE 2

SYSTEMES DE CONVERSION DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ENERGIE ELECTRIQUE

2.1. Introduction

L'épuisement annoncé des ressources en combustibles fossiles a nécessité une prise de conscience pour trouver une alternative en urgence. Parmi, les solutions le photovoltaïque et l'énergie éolienne sont considérées comme prometteuses pour répondre à la demande croissante en l'énergie. Les sources d'énergies photovoltaïques et éoliennes sont renouvelables et inépuisables. Les processus de transformations sont sans pollution et leur disponibilité est gratuite. Cependant, pour les sites isolés les systèmes de transformation hybrides sont des alternatives attrayantes et privilégiées. Toutefois, le stockage constitue encore les principales contraintes économique et technologique. Combinant à la fois l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque conduirait à réduire au minimum l'exigence de stockage, et par conséquent le coût global du système et permet de satisfaire la demande énergétique requise par la charge à tout moment de l'année.

2.2. Système solaire

2.2.1. Introduction

La transformation de la lumière en électricité à l'aide de panneaux solaire se fait depuis plus de 60 ans. La différence aujourd'hui, c'est que la technologie est suffisamment développée mais la dépendance aux conditions météorologiques et au cycle jour-nuit, ainsi qu'un prix encore élevé des panneaux solaires, sont un frein et font l'objet de développements actifs. Quoi qu'il en soit, les préoccupations

environnementales et le renchérissement des combustibles fossiles sont un formidable moteur pour les énergies renouvelables, et en particulier le solaire.

2.2.2. Energie solaire

Albert Einstein décrivait la réaction qui se produit à l'intérieur du Soleil ainsi : « À chaque seconde, 620 millions de tonnes d'hydrogène 1 fusionnent pour former de l'hélium 4 avec une perte de masse de 4,3 millions de tonnes qui est transformée en énergie [6].

Il a été montré que c'est la réaction de fusion de quatre atomes d'hydrogène en un atome d'Hélium 4 qui est impliquée (réaction de fusion nucléaire):



La perte de masse impliquée par cette réaction dans le soleil est de $5 \cdot 10^9$ kg par seconde, soit 5 millions de tonne par seconde. Ceci implique selon l'équation d'équivalence Masse (m)/Energie (E), la fameuse équation :

$$E = mc^2 \quad (2.2)$$

Où, c est la vitesse de la lumière, une puissance de $4 \cdot 10^{26}$ W soit 400000 milliards de TW, une puissance absolument considérable.

Cette énergie est libérée dans le cœur du soleil, le noyau (Fig 2.1). Des échanges énergétiques complexes ont lieu entre ce noyau et la périphérie, d'abord sous forme radiative dans une zone intermédiaire dite radiative, puis à travers la convection dans la couche périphérique dite convective [7].

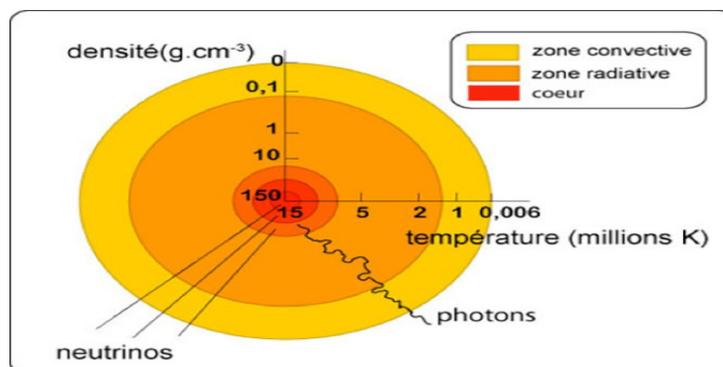


Fig. 2. 1. Schéma en coupe du soleil

2.2.3. Potentiel et rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est pratiquement la base de toutes les formes d'énergie renouvelables disponibles sur la planète : solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, marémotrice. Seule la géothermie échappe à cette règle [8].

La planète solaire est située à près de 150 millions de kilomètres de la Terre.

Son rayonnement ou spectre solaire est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm qui se divise approximativement en 3 bandes, comme le montre la figure 2.2.

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

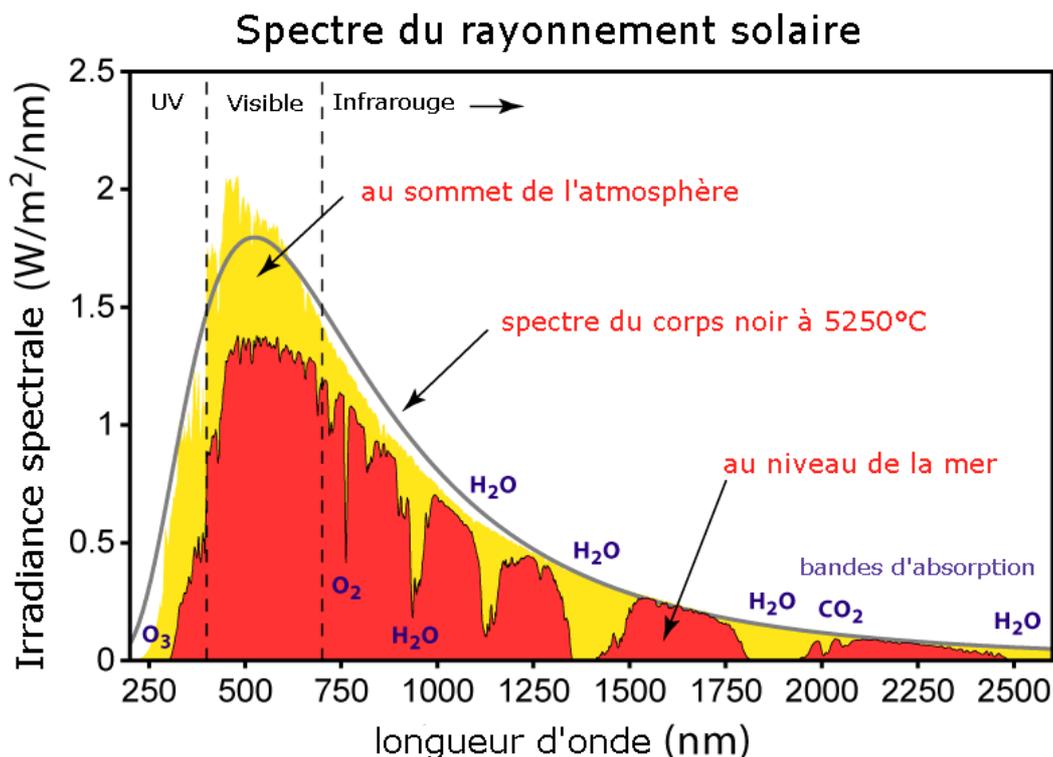


Fig. 2. 2. Spectre du soleil terrestre et extra-terrestre

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m^2 à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [9].

Donc, une fraction, seulement du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre. Celle la se composant de 3 différents types de rayonnements : directs, diffus, et réfléchi.

- Le rayonnement direct : provient du soleil en ligne droite du seul disque solaire. Il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.

- Le rayonnement diffus : radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses. Elle est donc nulle que la nuit.

- Le rayonnement réfléchi: radiation solaire incidente réfléchi par une surface.

La figure 2.3 montre les directions de ces rayonnements :

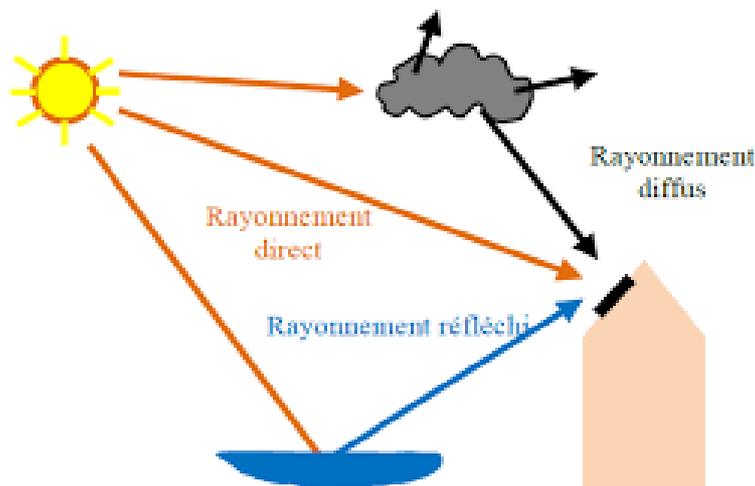


Fig. 2. 3. Types de rayonnements

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 2. 1. Potentiel d'énergie solaire en Algérie

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

2.2.4. Effet et cellules photovoltaïques

L'énergie solaire que la terre reçoit peut être convertit en électricité ou en chaleur grâce, respectivement, à des systèmes solaires photovoltaïques ou thermiques.

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois procédés suivants [10]:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

La cellule photovoltaïques, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elles sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée n (par exemple du phosphore) et l'autre est dopée p (par exemple du bore) (voir la figure 2.4) .Des

électrodes métalliques sont placées sur les deux (2) faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique.

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion. Les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons.

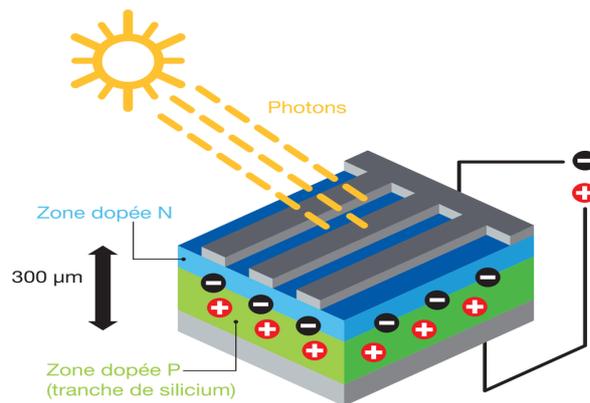


Fig. 2. 4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

On distingue différents types de cellules photovoltaïques :

- **1^{ère} Génération: Silicium cristallin (mono et poly)**

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999% de Silicium.

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline :

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe, voir la figure 2.5.

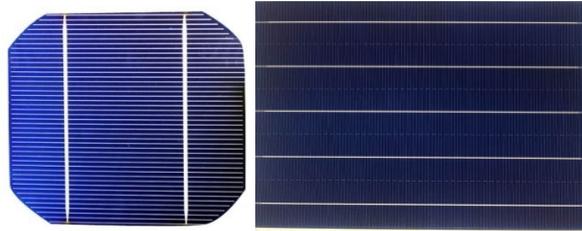


Fig. 2. 5. Cellules mono et poly cristallin

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés.

- **2^{ème} Génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin**

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres.



Fig. 2. 6. Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% (α Si) à 5 à 11% (CdTe) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules).

Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV) Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication.

Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires.

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir [11].

On peut dire que les efficacités « typiques » des différentes technologies sont :

Tableau 2. 2 : Tableau récapitulatif des différents types de technologies

	Silicium amorphe	Teluride de Cadmium	CI(G)S	silicium amorphe / microcristallin	monocristallin	polycristallin
efficacité de cellule aux STC	5 - 7 %	8 -11 %	7 - 11 %	8%	16 - 19 %	14 - 15%
Surface requise pour obtenir 1 kWc						
	15 m ²	11 m ²	10 m ²	12 m ²	~ 7 m ²	~ 8 m ²

STC : conditions de test standard 1000 W/m², 25°C, spectre AM 1.5

2.2.5. Avantages et Inconvénients d'énergie solaire

2.2.5.1. Avantages

- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants ;
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés ;
- L'énergie solaire photovoltaïque nécessite peu de maintenance ;
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales arides et isolées ;
- Les modules solaires peuvent couvrir les toits et les façades et contribuer ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique ;
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable ;
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

2.2.5.2. Inconvénients

- Les fabrications du module photovoltaïque relèvent de la haute technologie et requièrent des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%) ;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes ;
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru, la fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la

batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis ;

- Tributaire des conditions météorologiques ;
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur [12].

2.2.6. Structure de la conversion solaire

L'assemblage en série permet d'additionner les tensions des cellules solaires. L'assemblage en parallèle quant à lui permet d'additionner les courants. Ainsi, on peut donc cumuler la puissance fournie par chaque cellule solaire.

On ne peut pas assembler à l'infini les cellules photovoltaïques en série. On se retrouve donc avec une sortie à relativement basse tension avec un courant assez important. Ce n'est pas adapté pour le réseau électrique, qui a un niveau de tension bien plus élevé et qui est en courant alternatif. Pour cela on recourt à une chaîne de conversion électrique, qui peut être schématiser comme suit :

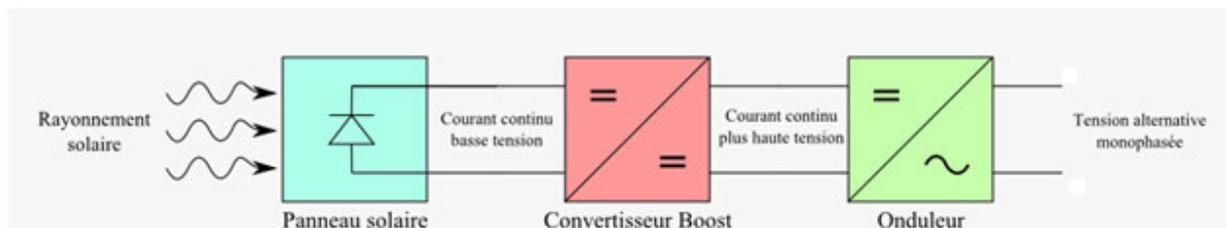


Fig. 2. 7. Chaîne de conversion d'énergie solaire

L'étape qui suit la conversion de l'énergie solaire en courant électrique basse tension, est l'élévation de tension. On utilise pour ça un convertisseur continu-continu dit *survolteur*. Le plus simple est le convertisseur Boost.

2.2.6.1. Convertisseur Boost

La conversion de l'énergie solaire en courant électrique basse tension est suivie de l'élévation de tension. On utilise pour cela un convertisseur continu-continu dit *survolteur*. Tel que le convertisseur élévateur (Boost).

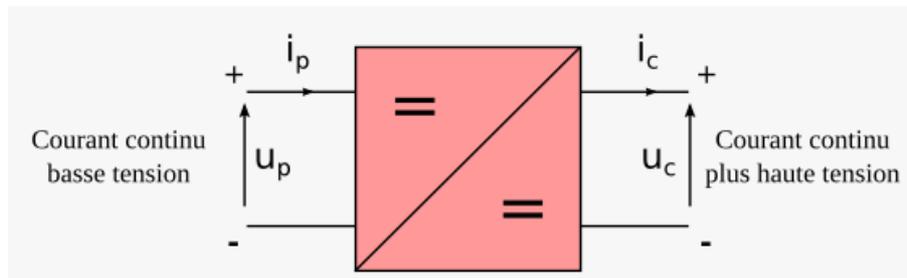


Fig. 2. 8. Convertisseur élévateur (Boost)

Il convertit le courant continu basse tension en courant continu haute tension. Il transforme dans une première étape l'énergie électrique en énergie magnétique, puis dans une deuxième étape l'énergie magnétique en énergie électrique.

Le composant qui stocke l'énergie magnétique et la restitue est une bobine. Pour alterner entre les phases de chargement et de déchargement de la bobine, on change la configuration du circuit en ouvrant et fermant des semi-conducteurs. Dans une des configurations, la source fournit de l'énergie à la bobine ; dans l'autre, la bobine fournit de l'énergie vers la sortie.

2.2.6.2. Onduleur

Il transforme une tension continue en une tension alternative. Le schéma ci-dessous résume l'action d'un onduleur.

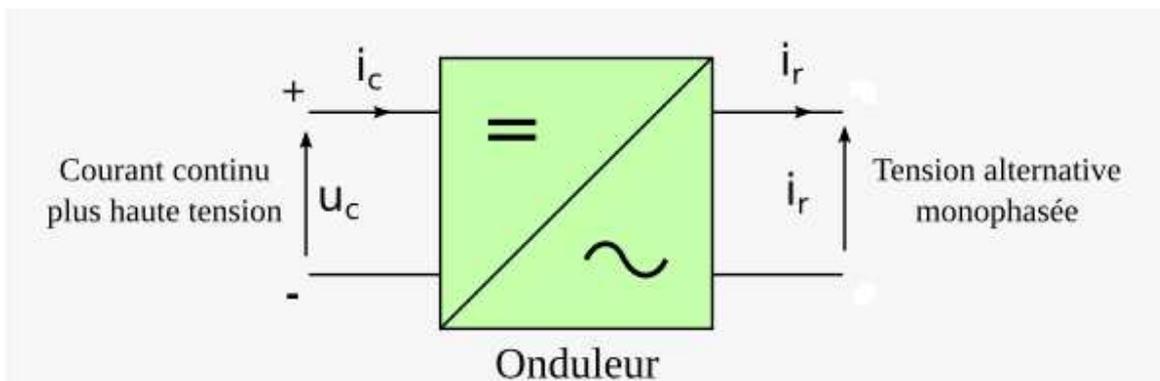


Fig. 2. 9. Symbole d'un onduleur

2.3. Système éolien

2.3.1. Introduction

Les systèmes éoliens servent à produire de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent sans pollution et sans crainte d'épuisement de la ressource grâce à des turbines éoliennes.

2.3.2. Energie éolienne

- Le vent est **variable** localement. Il peut être nul, trop faible ou trop fort et dans ce cas les éoliennes ne peuvent produire de l'électricité. Cependant, les nouvelles technologies éoliennes et les stratégies de contrôle des centrales permettent alors de réguler la puissance injectée pour assurer l'équilibre du réseau.

2.3.3. Potentiel énergétique en Algérie

L'Algérie a un grand potentiel en énergies renouvelables car elle jouit de ressources éoliennes et solaires abondantes. Elle dispose de nombreuses zones, où la vitesse de vents varie de 7-9m/s. Donc, pour l'Algérie le vent est une excellente ressource à exploiter pour l'avenir de la production d'électricité algérienne.

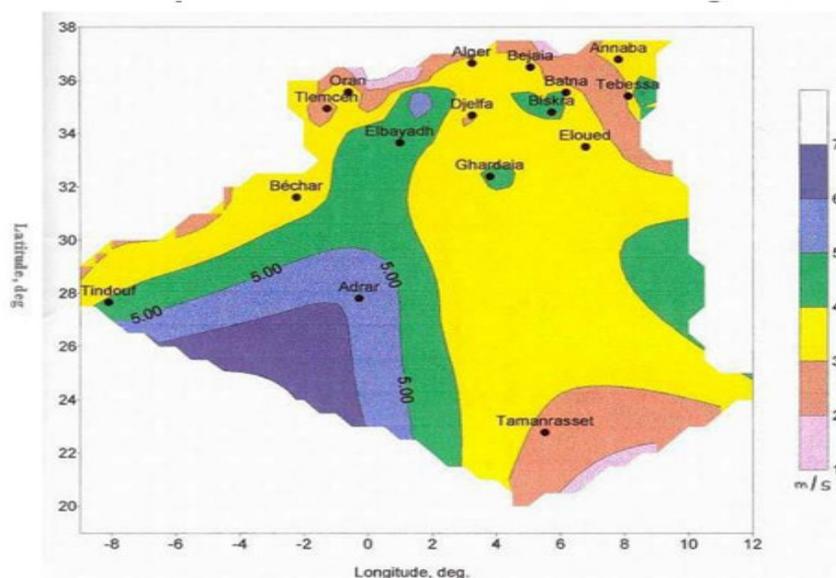


Fig. 2. 10. Carte préliminaire de vents en Algérie

2.3.4. Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique en deux étapes : la turbine reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible et la convertit en énergie mécanique. Puis, la génératrice reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui sera transmise ensuite sur le réseau électrique.

La figure 2.11 montre la structure d'une chaîne éolienne.

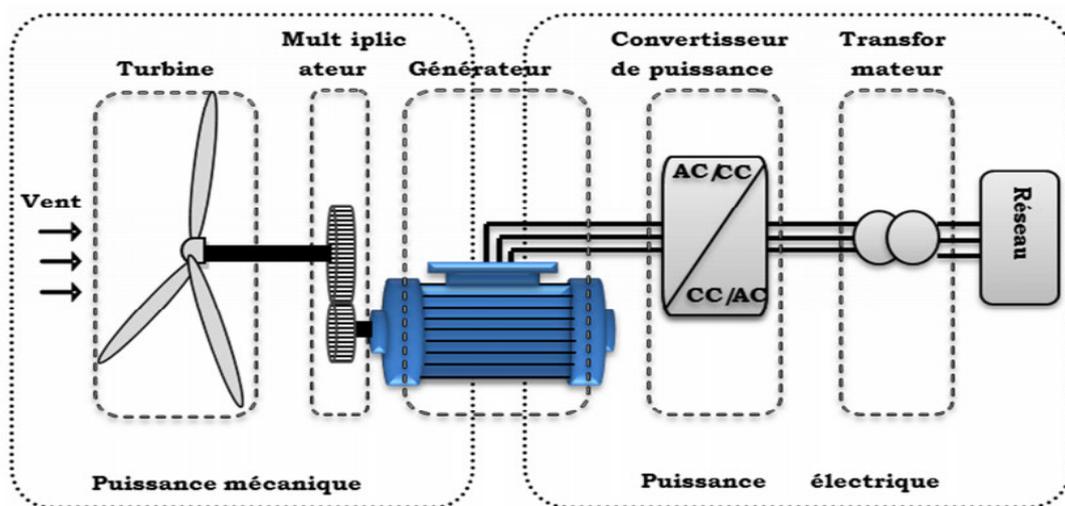


Fig. 2. 11. Principe de la conversion d'énergie éolienne

Une photo d'éolienne typique est présentée par la figure 2.12

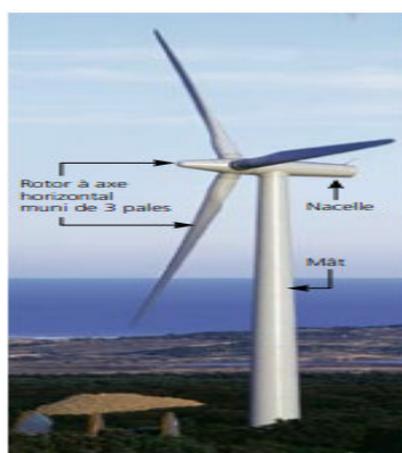


Fig. 2. 12. Exemple de système éolien de type aérogénérateur

Elle est composée principalement de [13] :

- **Mât** : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..).
- **Rotor** : composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu.
- **Nacelle** : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).
- **Pales** : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

Elles fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles sont arrêtées pour raison de sécurité.

2.3.5. Types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol, on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [14].

2.3.5.1. Eoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux.

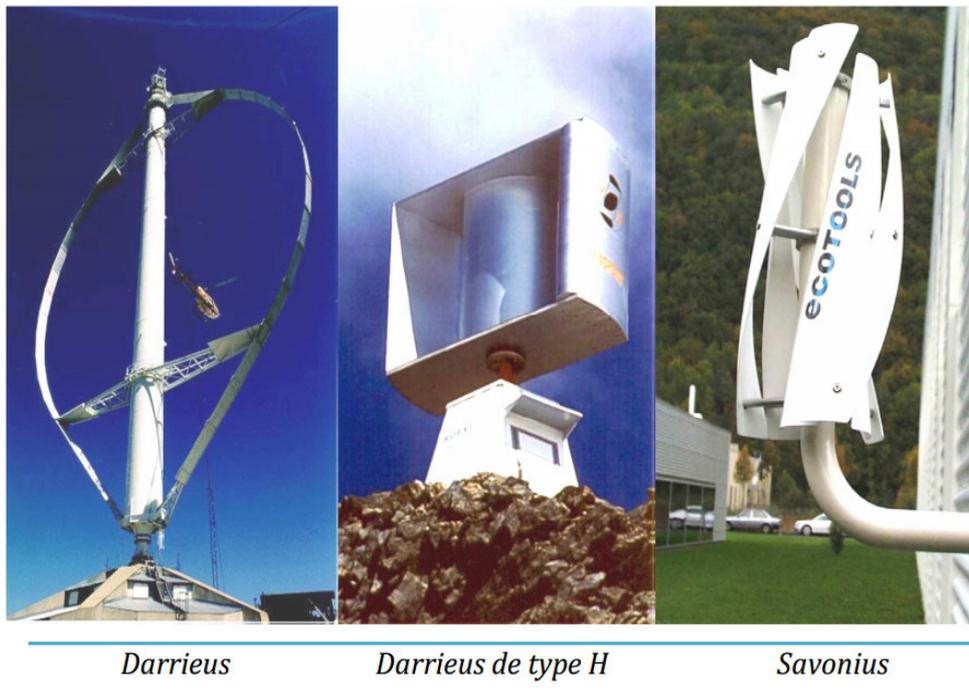


Fig. 2. 13. Technologies éoliennes à axe vertical

2.3.5.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.

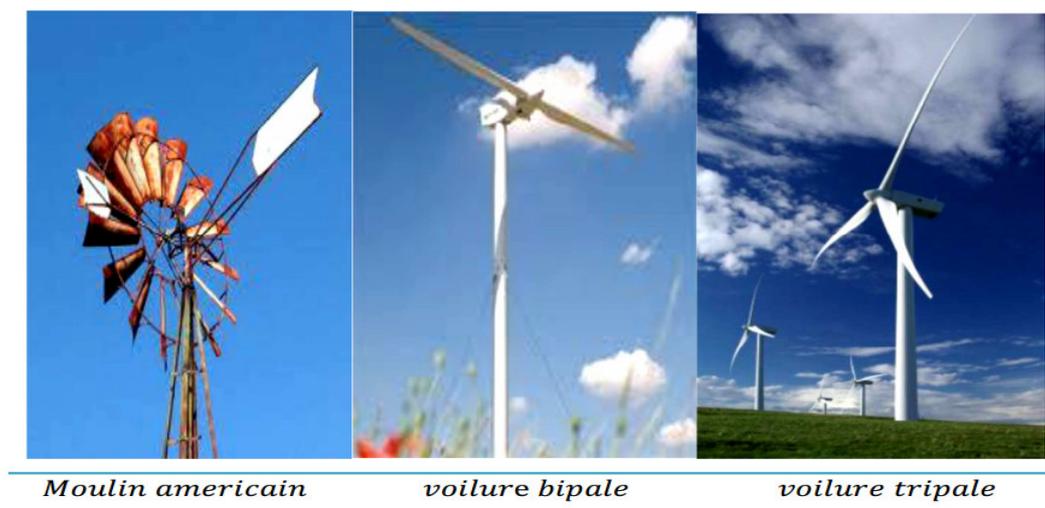


Fig. 2. 14. Technologies éoliennes à axe horizontale

2.3.5.3. Dimensions des éoliennes

Tableau 2. 3 Différentes puissances produites selon la hauteur de l'installation

Puissance électrique (kW)	Diamètre du rotor (m)	Hauteur de la tour (m)
750	~47	~56
1500	~66	~79
3000	~93	~112
5000	~120	~144

Donc, on note très bien que l'énergie produite a une relation proportionnelle avec la hauteur de l'installation.

2.3.6. Conversion électrique d'énergie éolienne

- Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Les génératrices utilisées pour les systèmes aérogénérateurs qui ont des caractéristiques spécifiques variant en fonction du type et les dimensions géométriques de la voilure. Notons, les machines asynchrone exigent, et ce contrairement, aux machines synchrones l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse. Pour ces installations l'énergie produite est d'abord redressée puis reconvertis en alternatif à l'aide de redresseurs commandables.

2.4. Systèmes hybrides

2.4.1. Introduction

Un système hybride (multi-sources) à base de sources d'énergie renouvelables est un système électrique, comprenant au moins une source d'énergie renouvelable. Ils peuvent être connecté au réseau ou fonctionner en régime isolé (autonome) [15].

L'intérêt d'un système hybride réside dans le fait que l'utilisation simultanée de plusieurs sources d'énergie pour satisfaire le besoin en demande énergétique.

On distingue plusieurs configurations de systèmes hybrides (SEH).

2.4.2. Structure de systèmes hybrides

On les distingue selon trois (3) critères :

- Présence ou non d'un classique (générateur diesel, turbine à gas ...)
- Présence ou non d'un système de stockage (batterie, volants d'inertie,...)
- Types de ressources renouvelables utilisées (photovoltaïque, éolien...).

Les dispositifs de stockage sont plus souvent des batteries parfois un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de batterie et stockage d'hydrogène. Les modèles de comportement ont pour paramètres d'entrée des valeurs de rayonnement solaire et de vitesse de vent horaires des valeurs moyennes mensuelles ou une distribution statistique de Weibul.

2.4.3. Régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes [16] :

Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc. Pour les zones isolées, les SEH sont plus pratique.

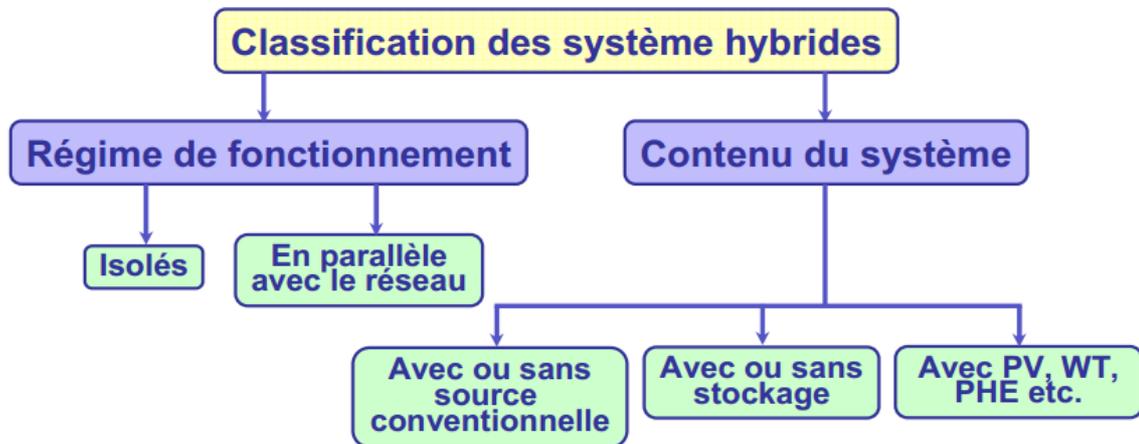


Fig. 2. 15. Classification des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides photovoltaïque/éolienne [17] :

Tableau 2. 4: Ressources énergétiques des différentes régions d'Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sud (Sahara)
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650
Energie éolien moyenne récupérable (TWh/an)	1	4.5	31.5

2.2.4. Hybridation photovoltaïque/éolienne/stockage

Dans ce cas, la plupart des travaux concerne l'optimisation de la configuration du système hybride utilisent soit des algorithmes génétiques, soit des méthodes heuristiques ou de surface ou encore des logiciels commerciaux tels que HOMER, Hybrid 2, etc ... [18].

L'utilisation de l'énergie éolienne comme agent complémentaire pour l'énergie solaire PV dans l'hybridation représente une solution intéressante au problème de la discontinuité de l'énergie solaire même dans la nuit en fonction de la vitesse de vent.

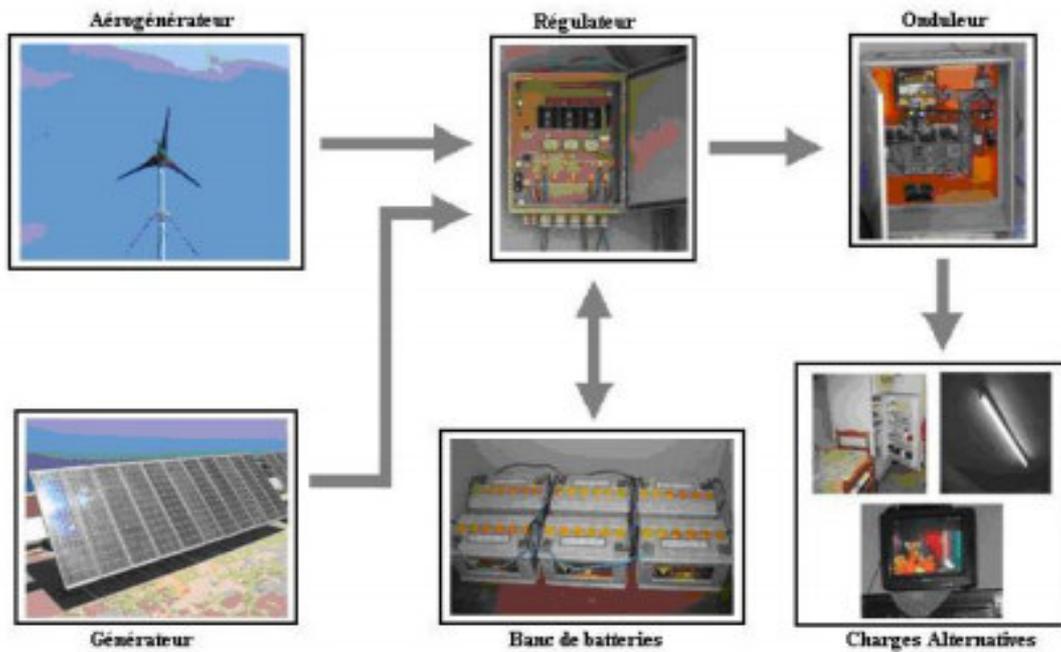


Fig. 2. 16. Structure SEH photovoltaïque /éolienne/Batterie [19]

2.5. Conclusion

A l'issue des notions portées dans le contenu de ce chapitre et qui sont tirées d'une bibliographie du domaine de l'exploitation de systèmes de conversions à énergie renouvelables ainsi que le caractère intermittent des énergies solaire et éolienne, l'option de l'hybridation de ces deux derniers, avec stockage s'avère une configuration d'une grande importance

CHAPITRE 3

MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE

3.1. Introduction

A la suite du chapitre précédent, on considère dans ce chapitre la modélisation des différents composants du système hybride. A cet effet, il s'agit de mettre en équations chaque composant en vue de la modélisation et la commande de l'ensemble de système. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées c'est-à-dire les données météorologiques du site et les données relatives aux équipements. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

3.2. Modélisation du système photovoltaïque

3.2.1. Introduction

Dans cette section, on présente la modélisation du module photovoltaïque qui est le composant principale pour la conversion de l'énergie solaire ainsi le principe de fonctionnement du module photovoltaïque. Un intérêt particulier est réservé au fonctionnement du générateur photovoltaïque et à son fonctionnement au point maximum de puissance (MPPT) en dépit de la variation particulièrement la température et l'irradiation.

3.2.2. Association des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent être connectées en série ou en parallèle [20].

Les figures 3.1 (a,b) montrent, respectivement, les circuits de branchements des cellules montées en série et en parallèle.

Lorsque l'on associe N_s cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. Et, l'impédance optimale de l'association sera N_s fois plus grande que celle de la cellule de base.

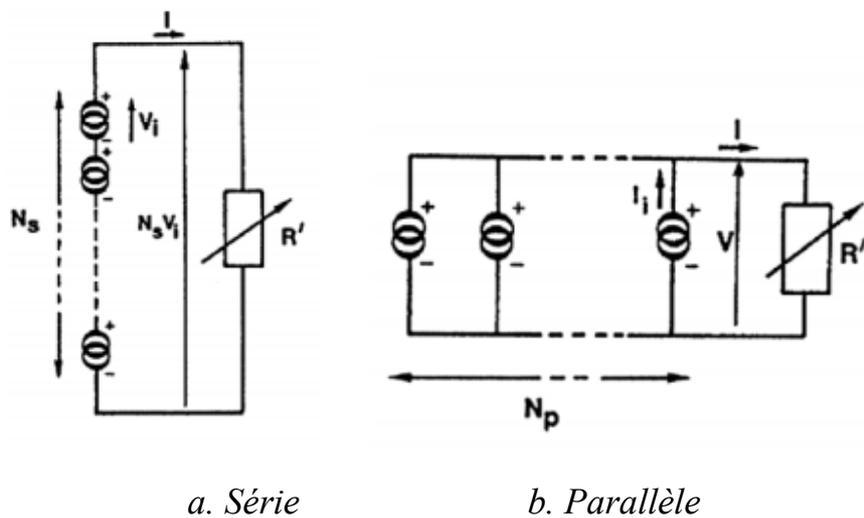


Fig. 3. 1. Circuit de l'association de N_s cellules en série et parallèles

Or, lorsque N_p cellules sont montées en parallèle, c'est les courants qui s'ajoutent. L'impédance optimale de l'association sera N_p fois plus faible que celle d'une cellule individuelle [20].

Par ailleurs, les caractéristiques statiques $I_{PV}=f(V_{PV})$ correspondantes à ses deux (2) types de montages sont illustrées par les figures 3.2. La caractéristique I-V résultante de l'association de la figure 3.2(a) est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension individuelle V_i par N_s et celle de l'association parallèle est obtenue en additionnant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule de base par N_p .

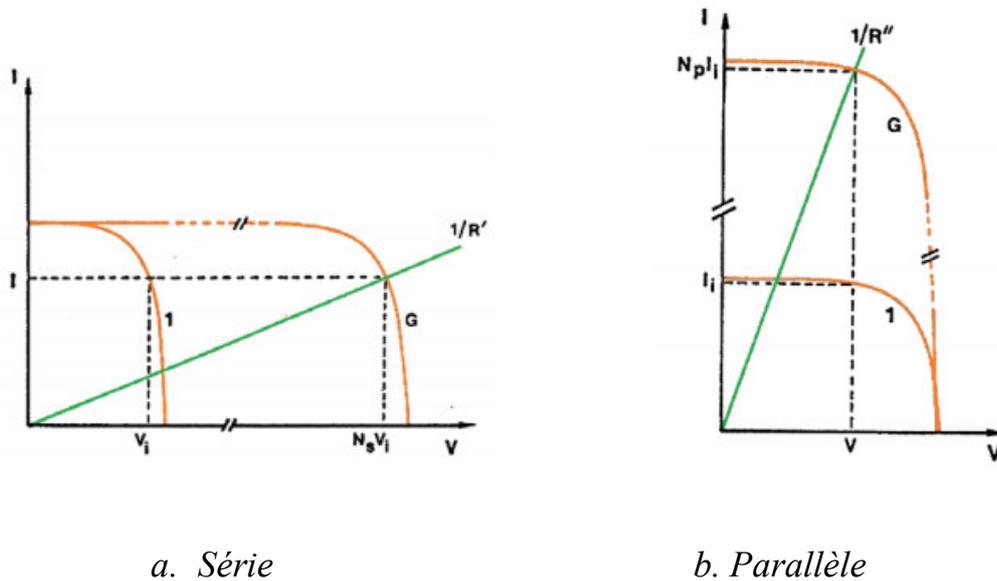


Fig. 3. 2. Caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$ avec N_p cellules en parallèle et N_p série.

3.2.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par les paramètres suivants [21] :

3.2.3.1. Puissance crête

La puissance électrique produite par un module varie en fonction du rayonnement solaire. Cependant, la puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous les conditions standards, soient : un éclairement de 1000 W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C .

3.2.3.2. Caractéristique courant - tension d'un module

Le courant produit par un module varie conformément aux caractéristiques $I_{PV}=f(V_{PV})$ dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [21].

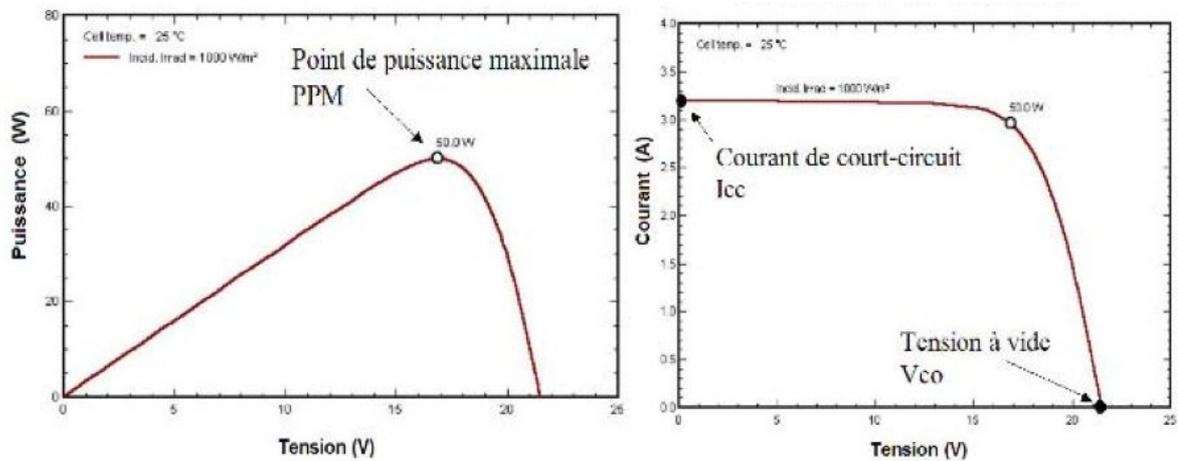


Fig. 3. 3: caractéristiques $I_{PV}=f(V_{PV})$ et $P_{PV}=f(V_{PV})$ d'un module PV

3.2.3.3. Tension en circuit ouvert (V_d)

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule quand le courant débité par la cellule solaire est nul. Elle est donnée par la relation suivante :

$$V_{co} = nV_{th} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (3.1)$$

3.2.3.4. Courant de court circuit (I_c)

En court circuit $V_{PV}=0$:

D'où,

$$I_{cc}=I_{ph} \quad (3.2)$$

3.2.3.5. Point du fonctionnement P_m (V_m, I_m)

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance. Elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m \quad (3.3)$$

3.2.3.6. Facteur de forme (FF)

Il est défini par le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{cc} , V_{co}), soit :

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} \times V_{CO}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (3.4)$$

La valeur du facteur de forme est un pourcentage (%). Le FF est généralement compris entre 0.6 et 0.85.

3.2.3.7. Rendement(η)

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Soit la surface S de la cellule en m^2 et E est l'éclairement-irradiante en W/m^2 . Le rendement énergétique s'écrit :

$$n = \frac{P_m}{P_{inc} S} \quad (3.5)$$

P_m : puissance maximale maximale ;

P_{inc} : Puissance incident ;

S : surface de la cellule photovoltaïque (m^2).

De (3.5), on obtient [21] :

$$P_m = FF \times I_{CC} V_{CO} \quad (3.6)$$

Donc,

$$n = \frac{FF \times I_{CC} \times V_{CO}}{P_{inc} S} \quad (3.7)$$

3.2.4. Modèle d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est modélisée à base de circuit électrique. La figure 3.4 représente le circuit équivalent à une diode ou deux diodes [22] :

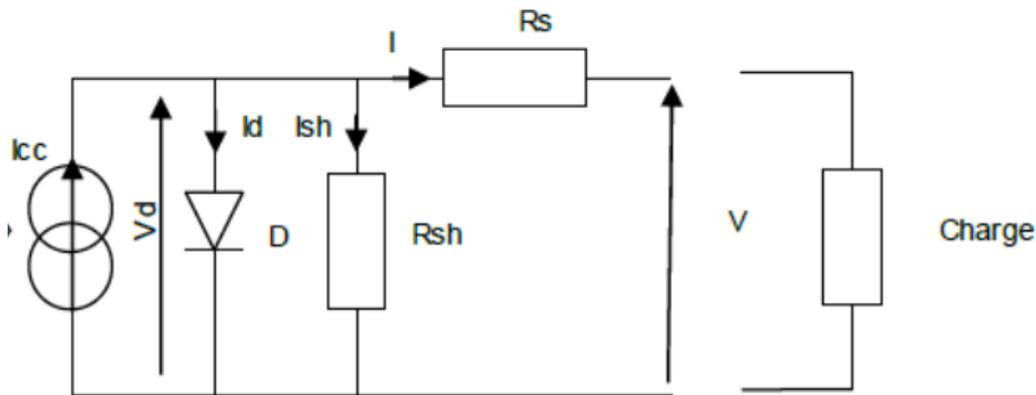


Fig. 3. 4. Circuit électrique équivalent à une diode d'une cellule PV

Le générateur de courant I_{CC} modélise le flux lumineux incident, la diode (D) pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances série R_S et shunt (parallèle) R_{Sh} qui tient compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_S représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{Sh} caractérise les courants de fuite.

La loi des nœuds permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_d + I_p + I \tag{3.8}$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T_C} \right) \right] \tag{3.9}$$

Le courant dans la résistance R_{Sh} est donné par :

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_S}{R_{Sh}} \tag{3.10}$$

A partir de l'équation précédente, on obtient l'expression de la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du modèle choisi.

$$I = I_{ph} + I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T_C} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{Sh}} \tag{3.11}$$

Avec,

I_{sat} : courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A) ;

Π : coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque;

K : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) ;

q : charge d'électron ;

T_C : température absolue de la cellule (K).

La température de la cellule est donnée par l'équation suivante :

$$T_C = T_a + (Noct - T_{aNoct}) \frac{G}{G_{Noct}} \quad (3.12)$$

T_a : température ambiante ;

$Noct$: température nominale de fonctionnement de cellules ;

T_{aNoct} : température ambiante à $Noct$;

G : rayonnement solaire ;

Le photo-courant est donné par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc_ref} [1 + \alpha_{icc} (T_C - T_{ref})] \quad (3.13)$$

Avec,

G_{noct} : rayonnement solaire à $Noct$;

I_{cc_ref} : courant de court-circuit de référence ;

α_{icc} : coefficient de température du courant de court circuit,

Le courant de saturation peut être calculé à partir de l'équation :

$$I_{sat} = \frac{I_{ph}}{\left(\exp\left(\frac{V_{CO}}{n.V_T}\right) - 1\right)} \quad (3.14)$$

Avec,

V_{co} : tension de circuit ouvert ;

V_T : potentiel thermodynamique.

$$V_T = \frac{K.T_C}{q} = 25\text{mv à } 20^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

La résistance parallèle R_p a une valeur assez élevée. Alors, le courant généré par la cellule peut être donné sous la forme :

$$I = I_{ph} \left[1 - \frac{\left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n.V_T}\right) - 1\right)}{\left(\exp\left(\frac{V_{CO}}{n.V_T}\right) - 1\right)} \right] \quad (3.16)$$

3.2.5. Simulation du système photovoltaïque

En tenant compte du modèle de la cellule photovoltaïque, on étudie l'influence de la variation de la température et de l'irradiation. En premier, la température est maintenue constante égale à la valeur standard ($T=25^\circ\text{C}$), pour plusieurs valeurs de l'irradiation :

($G=1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$). Les figures 3.5 et 3.6 présentent respectivement, les caractéristiques $I_{PV}=f(V_{PV})$ et $PPV=(VPV)$ pour $T=25^\circ\text{C}$.

On remarque que l'accroissement du courant de court-circuit (I_{cc}) est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique. Aussi l'augmente de l'irradiation augmente la puissance maximale.

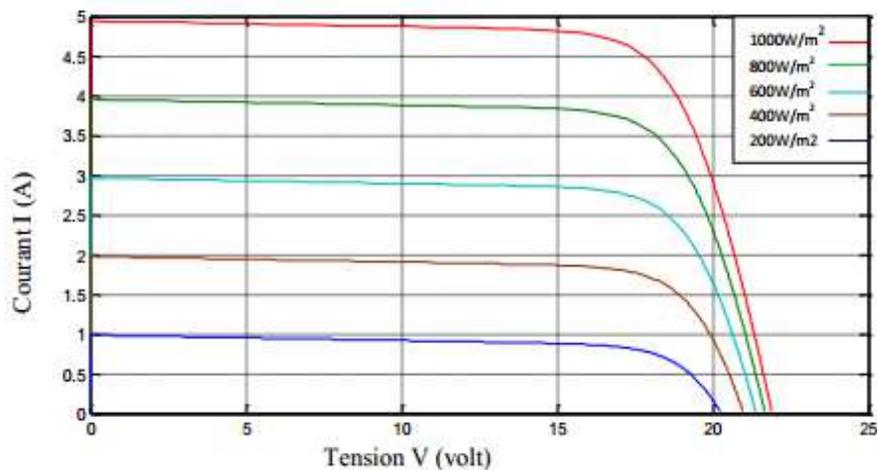


Fig. 3. 5. Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V) pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).

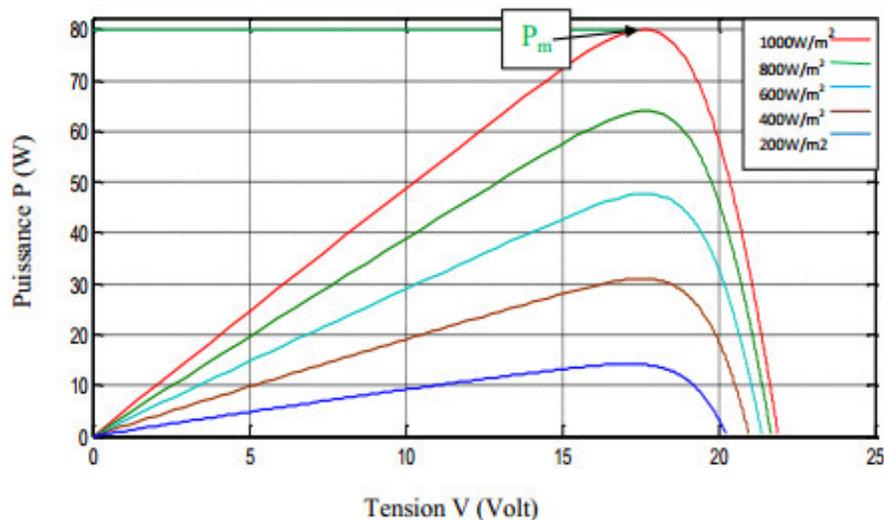


Fig. 3. 6. Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V) pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E= 1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$.

Par contre, lorsque nous avons maintenu une irradiation constante pour différentes températures. Figure 3.7 représente les différentes allures $I_{pv}=f(V_{pv})$ selon la température. La tension à vide (V_{CO}) diminue avec l'augmentation de la température. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la

variation du courant de court-circuit I_{CC} . Figure 3.8 représente la puissance fournie par un panneau qui varie très légèrement avec la température et la tension diminue.

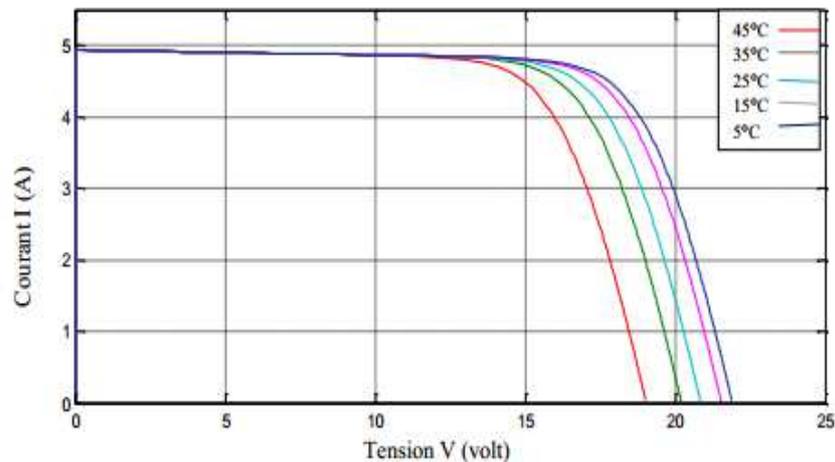


Fig. 3. 7. Influence de la température sur la caractéristique I(V) pour un panneau PV à $E=1000W/m^2$ et $T=5\text{ }^{\circ}C$; $15\text{ }^{\circ}C$; $25\text{ }^{\circ}C$; $35\text{ }^{\circ}C$; $45\text{ }^{\circ}C$.

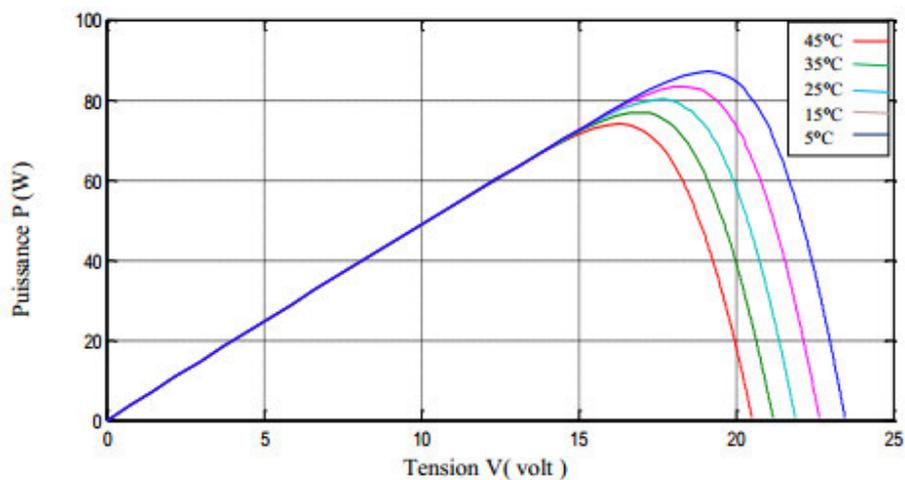


Fig. 3. 8. Influence de la température sur la caractéristique P(V) pour un panneau PV à $E=1000W/m^2$ et $T=5\text{ }^{\circ}C$; $15\text{ }^{\circ}C$; $25\text{ }^{\circ}C$; $35\text{ }^{\circ}C$; $45\text{ }^{\circ}C$.

Donc, le caractère intermittent de la température et l'irradiation, impose que les installations photovoltaïques soient dotées de commandes adéquates pour extraire le maximum de puissance quelque soient les conditions météorologiques.

3.3. Modélisation d'un système éolien

Le générateur éolien est constitué d'une turbine (GSAP) couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents. Les pales sont mises en rotation grâce à l'énergie du vent.

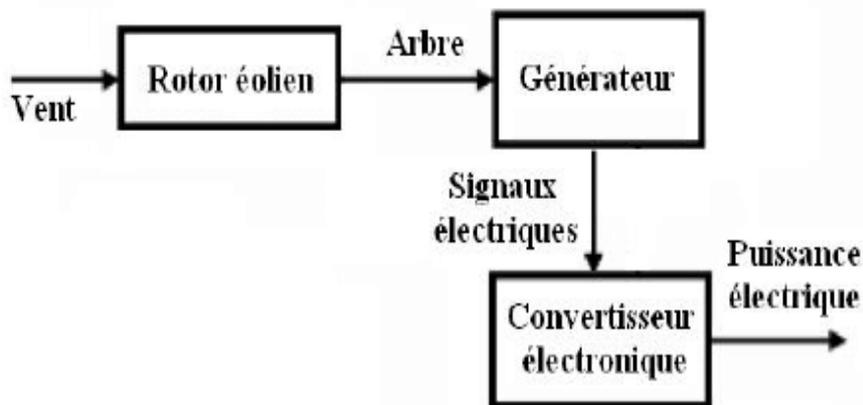


Fig. 3. 9. Système éolien

3.3.1. Modèle du vent

Les vitesses de vent à l'altitude 'h₀' en vitesses de vent à la hauteur de moyenne 'h' par la relation suivante [23] :

$$V_h = V_{h_0} \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (3.17)$$

Où,

α : coefficient de correction ou d'incidence.

La valeur de α dépend de la nature du terrain comme le montre le Tableau 3.1

Tableau 3. 1 coefficient de correction

Nature du terrain	α
Surface de l'eau	0.1
Plaine herbeuse	0.15
Cultures agricoles	0.2
Végétation avec peu d'arbres	0.2
Bois	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25

Le potentiel éolien d'un site est, généralement, approximé par la distribution de Weibull :

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3.18)$$

Les paramètres 'k' et 'c' sont respectivement le facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en m/s.

Le facteur de forme caractérise la symétrie de la distribution k=2. Le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent (v).

3.3.2. Modèle de la turbine

La turbine éolienne est représentée par le circuit de la figure 3.10 :

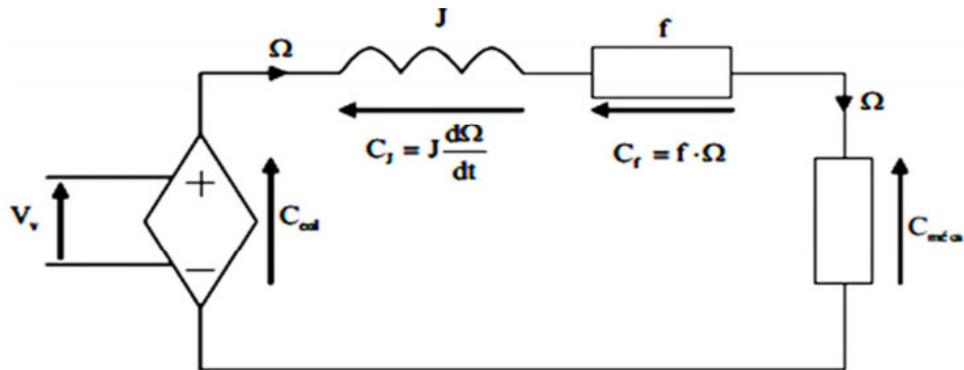


Fig. 3. 10. Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx de section S et de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v .

$$dE_C = \frac{1}{2} \rho s dx v^2 \quad (3.19)$$

Avec, ρ : densité volumique de l'air (Kg/m^3) ;

v : vitesse instantanée du vent (m/s) ;

E_C : énergie cinétique du vent (Joules).

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

On a $dx = v dt$, on déduit l'expression de P :

$$Pv = \frac{dE_C}{dt} = \frac{1}{2} \rho s v^3 \quad (3.20)$$

La variation de l'énergie cinétique ΔE est [24]:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.21)$$

M : masse d'air qui traverse l'éolienne.

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

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.22)$$

S : surface balayée par les pales.

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

$$F = \rho \cdot s \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.23)$$

D'où,

$$P_{aer} = F \cdot V' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot V'^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.24)$$

En identifiant les équations, il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.25)$$

Et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot s \cdot (V_1 - V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.26)$$

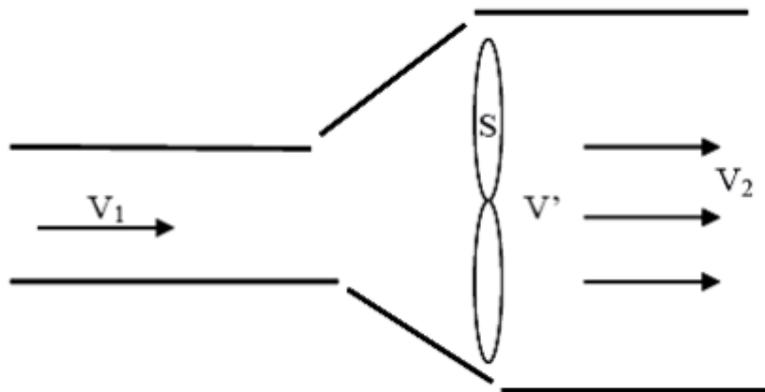


Fig. 3. 11. Schéma de principe de la théorie de Betz

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée est nulle soit pour $V_2 = V_1/3$, la puissance est maximale est alors :

$$P_{aer\ max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} = \frac{16}{27} \cdot P_v \quad (3.27)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde.

On définit la vitesse normalisée (λ) comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t \cdot R_t$ sur la vitesse instantanée du vent est donné par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (3.28)$$

Avec ,

V : vitesse de vent (m/s) ;

Ω_t : vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s) ;

R_t : rayon de la surface balayée.

3.3.3. Coefficient de puissance

La puissance maximale théorique ($P_{éol\ max}$) qui peut être exploitée est approximativement comprise entre 60% et 70% et le coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est exprimé par [25] :

$$P_{éol} = C_p \cdot P_v = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (3.29)$$

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{éol}}{\rho \cdot S \cdot V^3} \quad (3.30)$$

Le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{éol max}}{P_v} = 0.59 \quad (3.31)$$

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

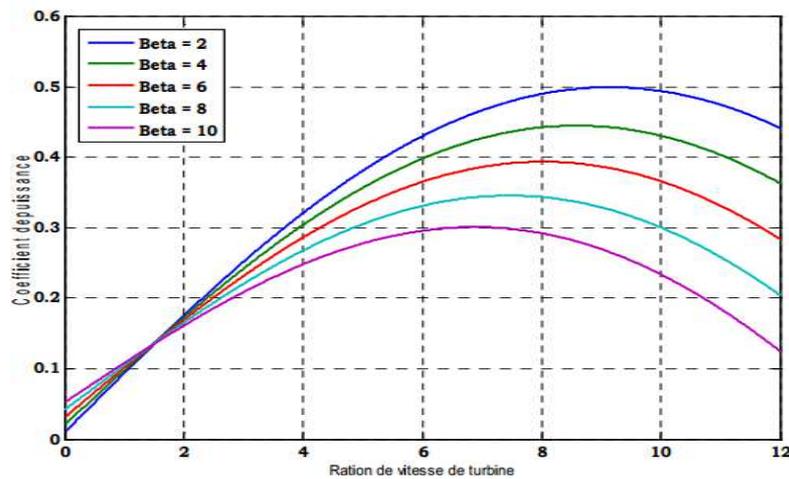


Fig. 3. 12. Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ

3.3.4. Coefficient de couple

La puissance mécanique (P_m) disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut être exprimée par [25]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot V^3 \quad (3.32)$$

$$\lambda_n = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (3.33)$$

D'où, l'expression du couple de la turbine (T_t) est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t \cdot P_m}{\lambda \cdot V} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V^2 \quad (3.34)$$

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

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho \cdot S_t \cdot R_t \cdot V^2} \quad (3.35)$$

3.3.5. Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la génératrice

La cinématique de la chaîne de transmission d'un système éolien est représentée par la figure 3.13 [26].

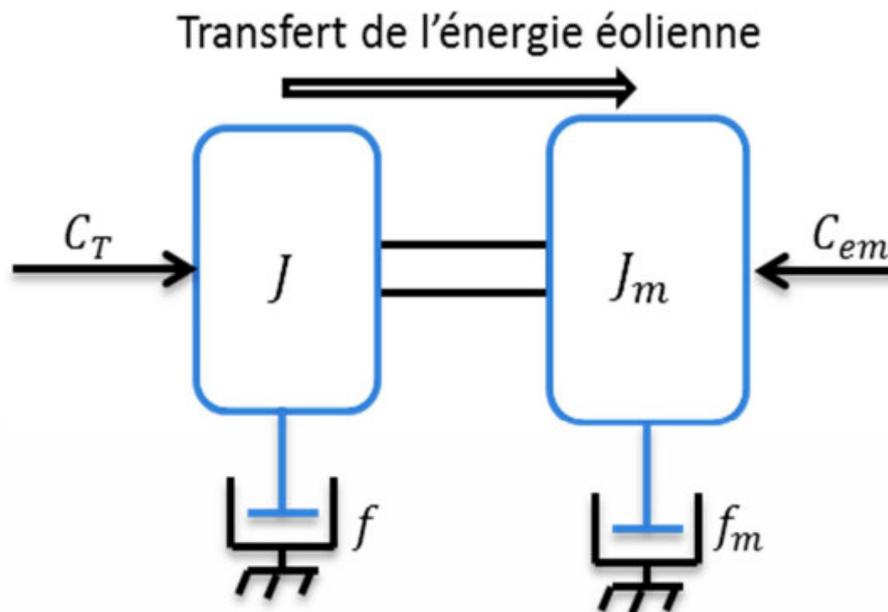


Fig. 3. 13. Chaîne de transmission d'un système éolien

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et de la génératrice en négligeant les notions de la voilure est :

$$\Delta C = C_T - C_{méc} = J_{T0} \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right) + f_{T0} \cdot \Omega_T \quad (3.36)$$

Où,

$$\begin{cases} f_{T0} = f + f_m \approx f \\ J_{T0} = J_f + J_m \approx J \end{cases} \quad (3.37)$$

Avec, f_{T0} : coefficient de frottement total ;

J_{T0} : inertie totale ;

J_m : inertie de la machine ;

f_m : coefficient de frottement de la machine ;

J : inertie de la turbine ;

f : frottement des pâles ;

C_T : le couple statique fournie par l'éolienne ;

$C_{méc}$: couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine.

Ainsi, on aura :

$$C_T = C_{méc} = J \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right) + f \cdot \Omega_T \quad (3.39)$$

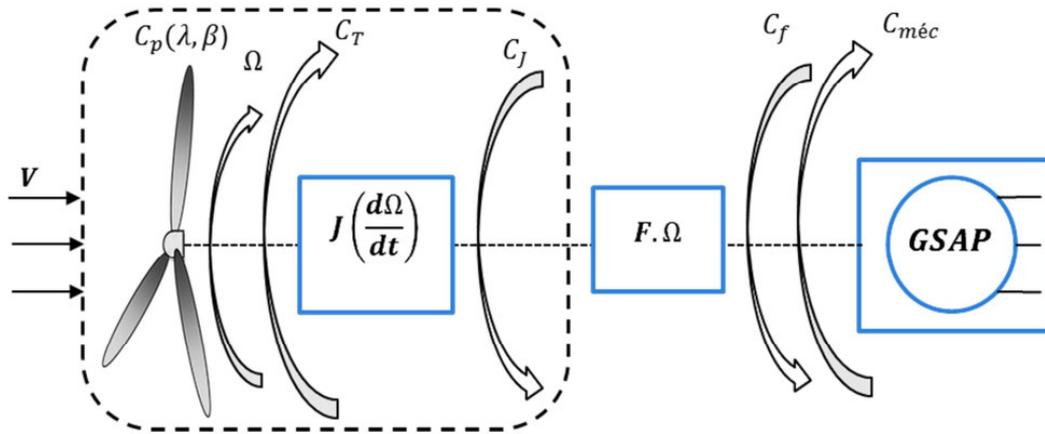


Fig. 3. 14. Schéma bloc d'une turbine éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$\Delta C = C_T - C_{méc} = J \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right) + f \cdot \Omega_T \quad (3.39)$$

D'où, après le réarrangement des termes, la valeur de la vitesse obtenue par :

$$\Omega_T = \frac{1}{J} \int (\Delta C - C_f) dt \quad (3.40)$$

$$\text{Où : } C_f = f \cdot \Omega_T \quad (3.41)$$

Correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément des équations précédentes. Cette dernière génère le couple C_t entrées de la turbine sont la vitesse du vent V , l'angle d'orientation des pales β , et la vitesse de rotation de la turbine $\Omega(t)$. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse de la turbine $\Omega(t)$, il a donc deux entrées : le couple C_t , le couple électromagnétique C_{em} fourni par la génératrice [27].

Le schéma montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale β et le couple électromagnétique de la génératrice C_{em} . La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système [27].

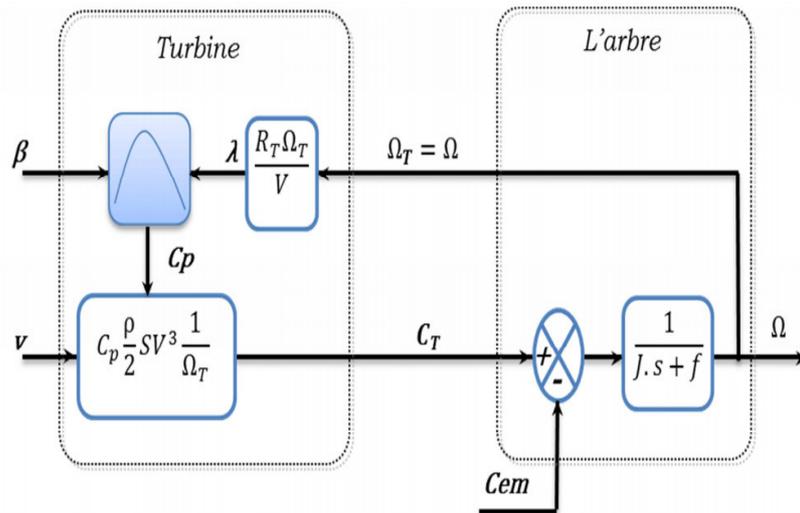


Fig. 3. 15. Schéma bloc du modèle de la turbine

3.3.6. Simulation d'un système éolien

La figure présente un exemple de la fonction de probabilité de la vitesse de vent.

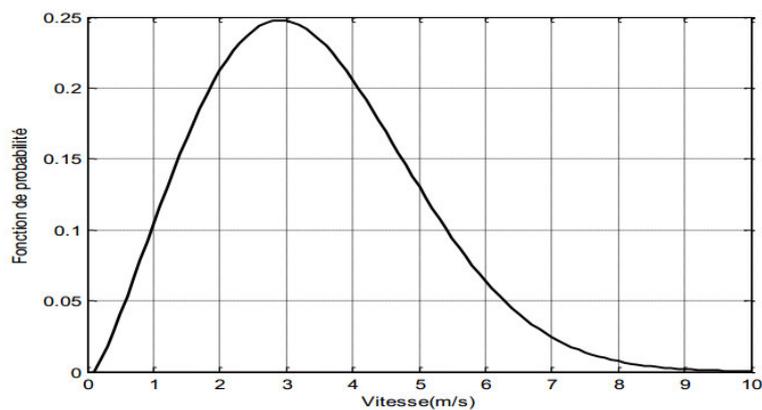
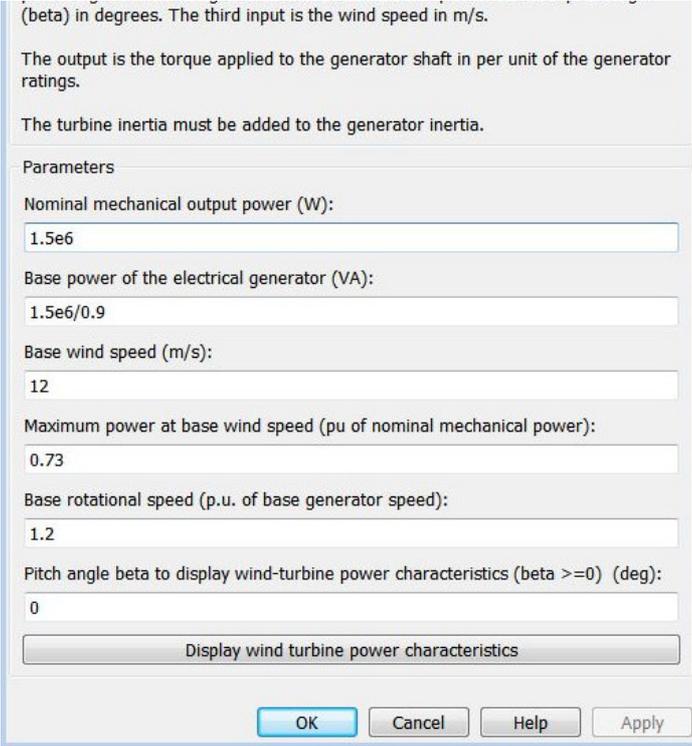


Fig. 3. 16. Fonction de probabilité de vitesse de vent.

Le modèle utilisé est un modèle d'une turbine avec un générateur synchrone à aimant permanent dont les paramètres de ce modèle sont comme suit :



(beta) in degrees. The third input is the wind speed in m/s.

The output is the torque applied to the generator shaft in per unit of the generator ratings.

The turbine inertia must be added to the generator inertia.

Parameters

Nominal mechanical output power (W):
1.5e6

Base power of the electrical generator (VA):
1.5e6/0.9

Base wind speed (m/s):
12

Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):
0.73

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):
1.2

Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):
0

Display wind turbine power characteristics

OK Cancel Help Apply

Fig. 3. 17. Paramètre du modèle utilisé

La caractéristique de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est une forme de cloche comme le montre la figure 3.17. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, représente les points optimaux recherchés, qui définissent une courbe de puissance optimale.

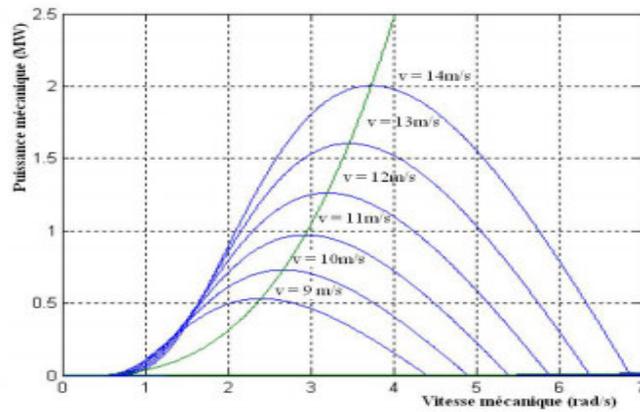


Fig. 3. 18. Caractéristiques de voilure dans le plan puissance-vitesse

Afin d’optimiser le système de production éolien, il faut poursuivre la courbe de puissance optimale à tout instant pendant son fonctionnement. En effet, des stratégies de commande de maximisation de la puissance produite doivent être utilisées. Et voici , la caractéristique puissance (en per unit) en fonctions des vitesses de vent variables (pour notre modèle $V=12\text{m/s}$ est la vitesse maximale et tolérable par le générateur).

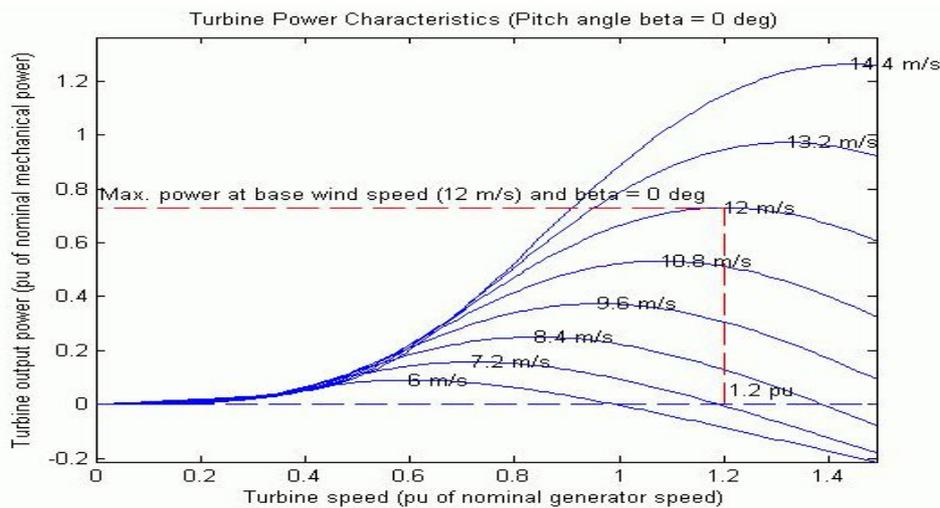


Fig. 3. 19. Caractéristique puissance (per unit) -vitesse de vent

Ci-dessous sont les caractéristiques C_p en fonction de l'angle de calage ou d'orientation des pales β (on note que $\beta=0$ est l'angle fonctionnel ou le coefficient de puissance est maximal).

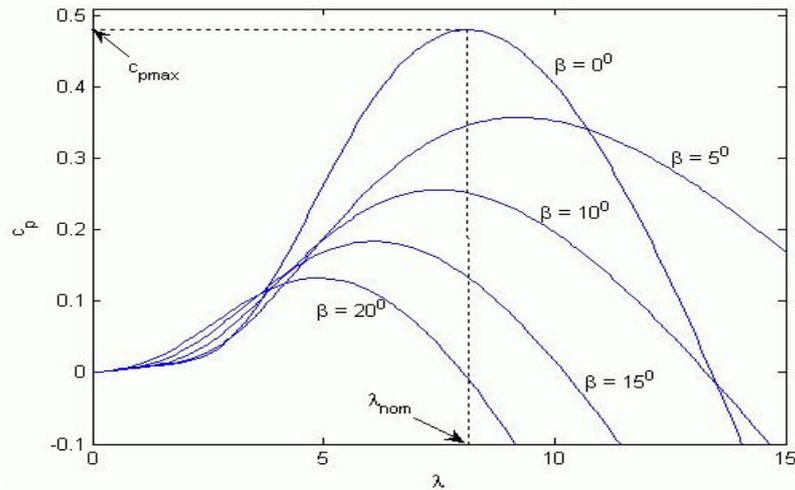


Fig. 3. 20. Caractéristique coefficient C_p - l'angle de calage β

3.4. Modélisation du dispositif de stockage

Le modèle électrique simple de la batterie comprend une fem (E_0) modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance (R_s) [28].

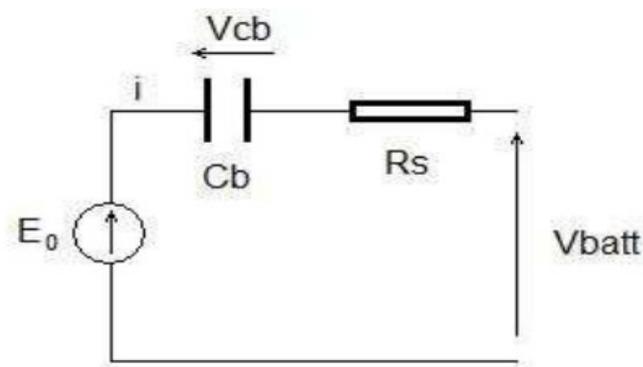


Fig. 3. 21. Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_S \cdot i - V_{Cb} \quad (3.43)$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (3.44)$$

Avec :

C_b : la capacité (Ah) nominale de la batterie ;

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_b .

En outre, le modèle <<CIEMAT>> [28], décrit la batterie par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

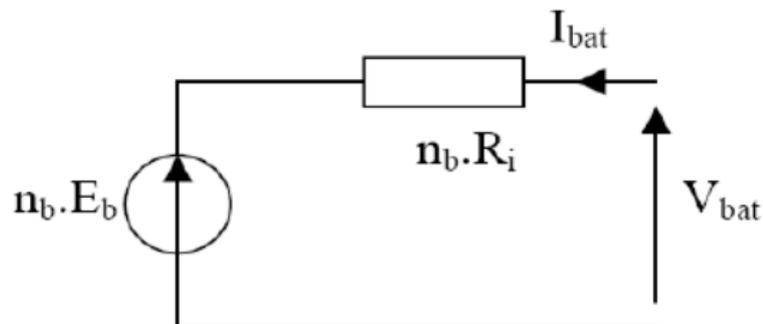


Fig. 3. 22. Schéma équivalent de n_b éléments en série

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

La valeur du courant est obtenue à partir de la puissance et de la tension :

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \quad (3.45)$$

L'expression générale de la tension batterie est:

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (3.46)$$

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale.

L'expression de l'état de charge est:

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (3.47)$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [29].

- Tension de décharge :

$$V_{bat_dé} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (3.48)$$

- Tension en charge :

$$V_{bat_ch} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) \cdot (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (3.49)$$

3.5. Conclusion

En prévision de l'étude par simulation d'un système hybride composé principalement d'un système photovoltaïque, un système éolien et d'un système de stockage, les modèles mathématiques relatifs de chacune des parties sont présentés. Pour un fonctionnement désiré, les systèmes de conversion considérés requièrent des composantes spécifiques et des commandes adéquates dont les détails feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4

COMMANDE ET GESTION DU SYSTEME HYBRIDE

4.1. Introduction

Le système hybride (SH) étant constitué de ressources à énergies renouvelables qui de nature leurs disponibilités dépendent essentiellement, des conditions météorologiques (irradiation, température, vitesse de vent, etc...). A cet effet, ce chapitre est consacré aux stratégies de commandes, des convertisseurs statiques, l'optimisation d'extraction de la puissance maximale, le contrôle du système de stockage et la gestion de puissances disponibles.

4.2. Structure et commande

L'analyse des architectures des systèmes de conversion solaire et éolienne exigent l'utilisation de convertisseurs statiques de puissance tels que des hacheurs, redresseurs, onduleurs ainsi que la nécessité de l'utilisation des algorithmes d'optimisation de l'extraction de la puissance maximale disponible, notamment, « Maximum Power Point Tracking » .

La structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque est montrée par la figure 4.1 :

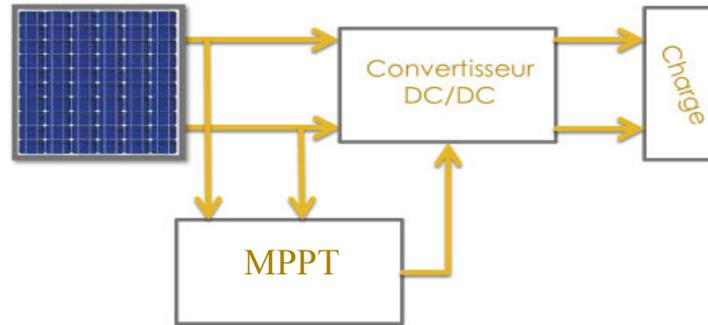


Fig. 4. 1. Chaîne de conversion photovoltaïque

Celle d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) représentée par la figure 4.4 [30] :

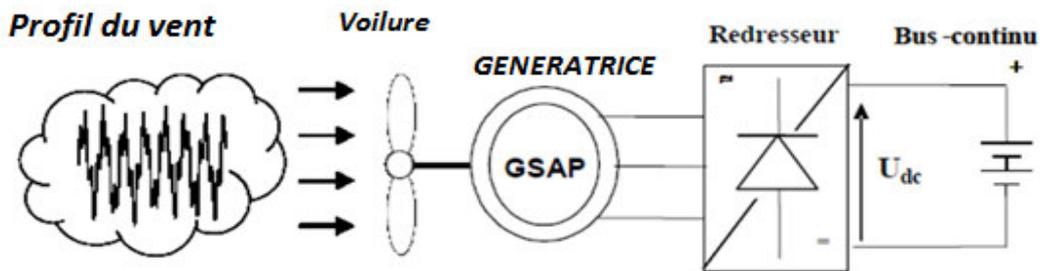


Fig. 4. 2. Chaîne de conversion éolienne

Finalement, leur combinaison nécessite un système de stockage pour le maintien du service de fonctionnement. Ceci constitue donc le système hybride dont la structure est montrée par la figure 4.3.

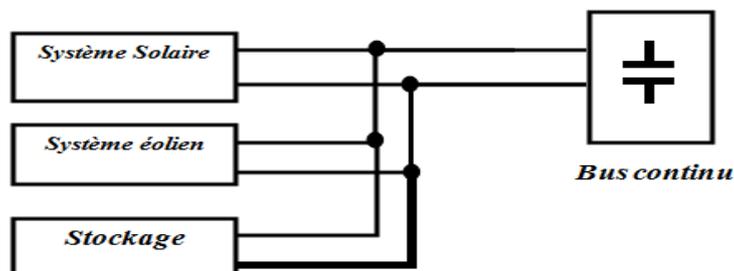


Fig. 4. 3. Schéma bloc du système hybride

4.3. Composants et stratégie de contrôle

4.3.1. Hacheur survolteur (Elévateur)

Il est nécessaire pour la chaîne de conversion, voltaïque, son circuit électrique est donné par la figure 4.4 [31]:

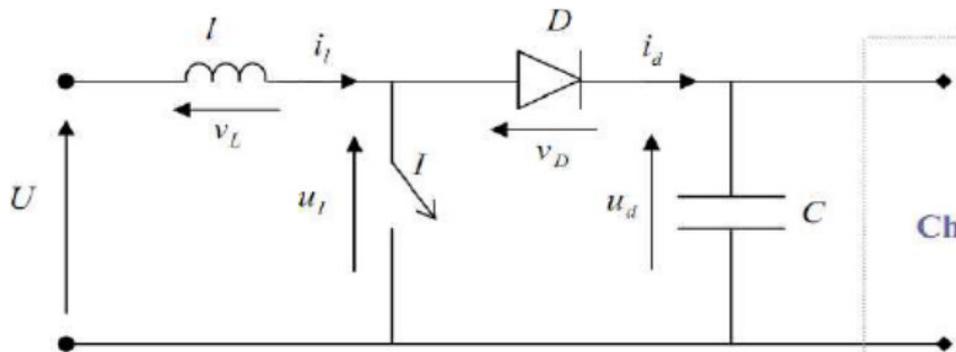


Fig. 4. 4. Hacheur parallèle.

On distingue deux phases de fonctionnement :

- 1- Lorsque l'interrupteur 'I' est fermé, la diode est polarisée en inverse $i_d = -i_L$. La charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance 'L' ;
- 2- Lorsque l'interrupteur 'I' est ouvert, l'étage de sortie (C+charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance 'L'.

Pour l'analyse en régime permanent présentée ici, le condensateur de filtrage (C) a une valeur suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante :

$$u_d(t) = -U_{do} \quad (4.1)$$

Enfin on distingue deux modes de fonctionnement selon le courant dans l'inductance L, $i_L(t)$ est interrompu ou non.

a. Fonctionnement à courant de source ininterrompu -Pour $0 < t < \alpha T$ l'interrupteur **I** est fermé et l'intensité .

$$U = L \frac{di_L}{dt} + U_{d0} \quad (4.2)$$

$$i_L(t) = \frac{U - U_{d0}}{L} (t - \alpha T) + i_L(\alpha T) \quad (4.3)$$

$$\text{Avec : } i_L(\alpha T) = \frac{U}{L} \alpha T + i_L(0)$$

Et, $U < U_{d0}$; car $i_L(t)$ doit décroître.

On a :

$$u_L = U_{d0} ; i_d = i_L ; v_L = U - U_{d0}. \quad (4.4)$$

On déduit les caractéristiques de la figure

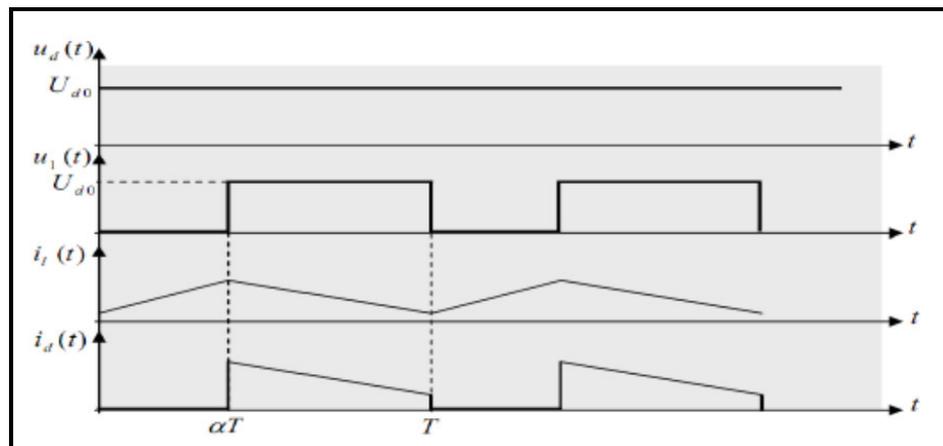


Fig. 4. 5. Hacheur parallèle. Fonctionnement à courant de source ininterrompu.

On détermine facilement la relation liant U à U_{d0} .

On a : $U = V_L + U_i$; donc en moyenne sur une période, compte tenu du fait que la valeur de la moyenne; $V_L(t)$ est nulle, on obtient :

$$U = U_{10} = (1 - \alpha) \frac{T}{T} U_{d0} \quad (4.5)$$

Donc,

$$\frac{U_{d0}}{U} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (4.6)$$

b. Limites entre le fonctionnement interrompu et le fonctionnement ininterrompu La forme des courants et tension $i_L(t)$ et $V_L(t)$ est donnée sur la figure ci-dessous. La valeur moyenne du courant $i_L(t)$ s'écrit :

c.

$$i_{L0} = \frac{I_{LM}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{L} \alpha T \quad (\text{car } i_L(t) = 0) \quad (4.7)$$

Donc, la valeur moyenne du courant disponible en sortie I_{d0} s'écrit :

$$I_{d0} = (1 - \alpha) I_{L0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{L} \alpha T (1 - \alpha) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{d0}}{L} \alpha T (1 - \alpha) \quad (4.8)$$

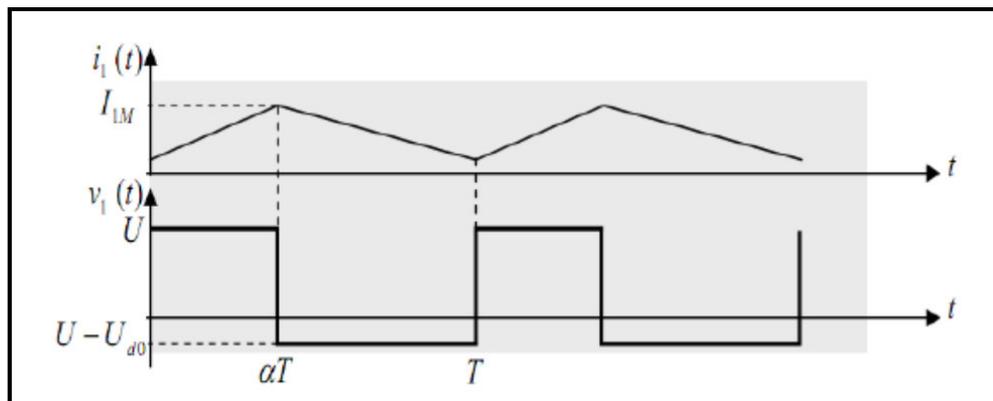


Fig. 4. 6. Hacheur parallèle. Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu.

4.3.2. Modélisation d'un onduleur

L'association d'un transistor T_i et d'une diode D_i donne un composant bidirectionnel K_i

Comme les commandes des deux transistors du même bras sont complémentaires, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux

positions comme l'indique la figure 4.7, soit F_i l'état de l'interrupteur K_i , il est donné par [31] :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

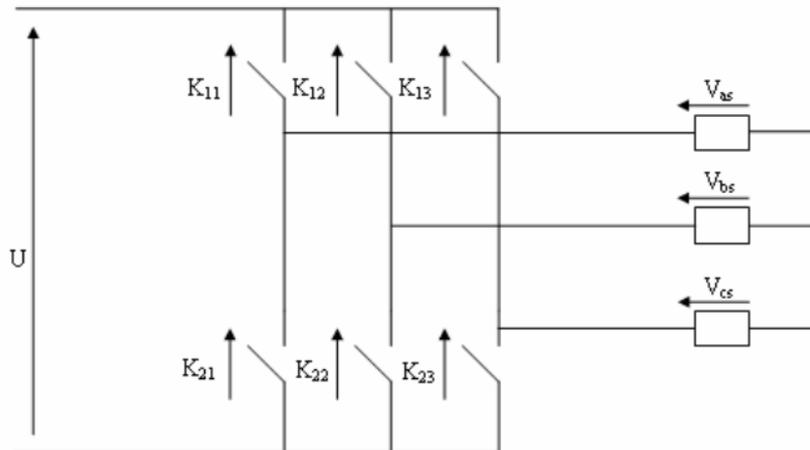


Fig. 4. 7. Représentation des composants bidirectionnels.

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

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} F_1 & -F_2 \\ F_2 & -F_3 \\ F_3 & -F_1 \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 2F_1 & -F_2 & -F_3 \\ -F_1 & 2F_2 & -F_3 \\ -F_1 & -F_2 & 2F_3 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

$$I_s = F_1 \cdot I_{sa} + F_2 \cdot I_{sb} + F_3 \cdot I_{sc} \tag{4.11}$$

4.3.3. Modulation de largeur d'impulsion

Le principe de la modulation de largeur d'impulsion MLI est de réaliser un signal rectangulaire, dont le temps passé au niveau haut et au niveau bas change au cours du temps. On parle de rapport cyclique variable.

Pour réaliser le signal MLI, c'est en fait assez simple. Il suffit de comparer un triangle et un sinus ! Le fondamental du signal est proportionnel au rapport de l'amplitude du sinus sur l'amplitude du triangle. Ce rapport, noté m est en général assez proche de 1 (0,8 par exemple). On a un donc un fondamental de la forme suivante, où U est la tension en sortie du convertisseur Boost :

$$u_f(t) = U \cdot m \cdot \sin(\omega t) \quad (4.12)$$

Ce fondamental est à la fréquence du réseau et c'est le signal utile qu'on peut transmettre au réseau. On obtient le résultat sur la courbe suivante :

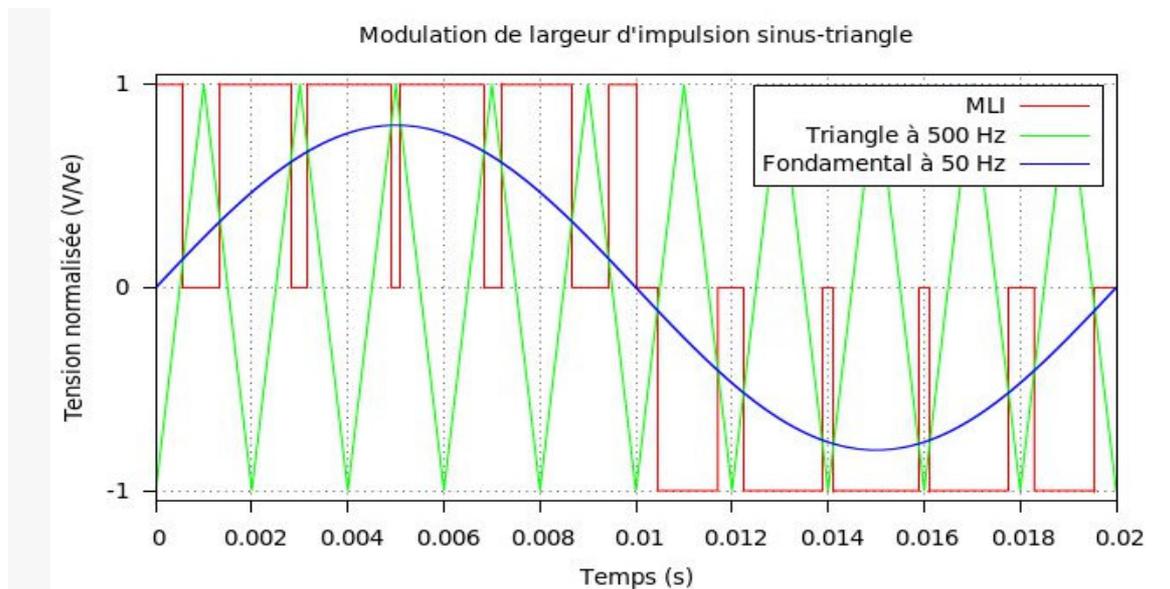


Fig. 4. 8. Allure de tension fournie par MLI

4.3.4 Redresseur

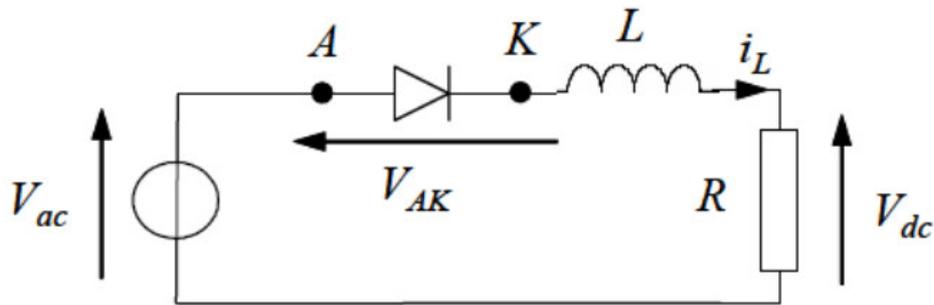


Fig. 4. 9 Redresseur monophasé à diode

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \quad (4.13)$$

Où la tension V_L aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction c de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ($c = 1$), on a :

$$V_L = V_{ac} - V_{dc} \quad (4.14)$$

Et lorsque celle-ci est bloquée ($c = 0$) :

$$V_L = 0 \quad (4.15)$$

Ainsi, de façon générale, en fonction de l'état de conduction c de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = c (V_{ac} - V_{dc}) \quad (4.16)$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance :

$$V_{dc} = R_{iL} \quad (4.17)$$

Donc, l'équation du courant dans l'inductance devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int c (V_{ac} - R_{iL}) dt \quad (4.18)$$

Reste à établir l'état de conduction c de la diode. A partir des règles élémentaires évoquées précédemment en début de paragraphe, nous pouvons dire que la diode est conductrice ($c = 1$) si et seulement si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \text{ ou } i_L > 0 \quad (4.19)$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons $V_{AK} = V_{ac} + V_{dc}$ (4.20) le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédente n'est pas remplie, la diode est bloquée ($c = 0$) [31].

4.4. Méthode de poursuite du point de puissance maximale

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance. Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont [31] :

- Méthodes de la dérivée de la puissance ;
- Méthodes à contre réaction de la tension.

4.4.1 Méthode de la dérivée de la puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P_{pv} = f(V_{pv})$ obtenue directement de la caractéristique du (GPV). Le (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $(P_{pv}/dV_{pv}) = 0$.

Le point de puissance maximale (PPM) est donné par :

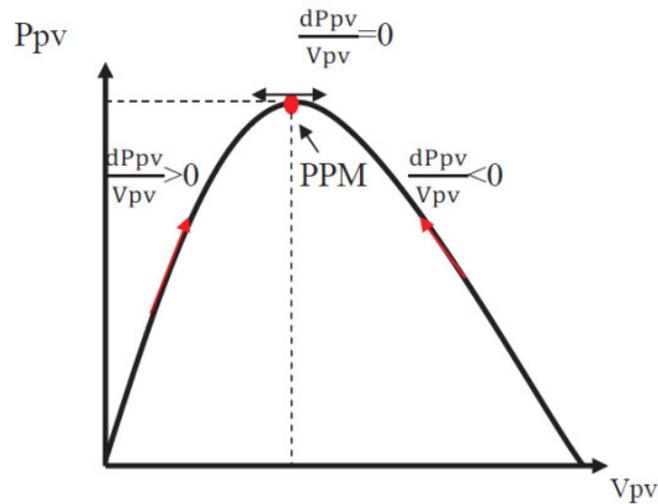


Fig. 4. 10. Caractéristique du point de puissance maximale PPM

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé (figure 4.10). Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en u en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [32].

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le PPM sera atteint, oscille autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

La valeur pour la largeur idéale du pas ΔD dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

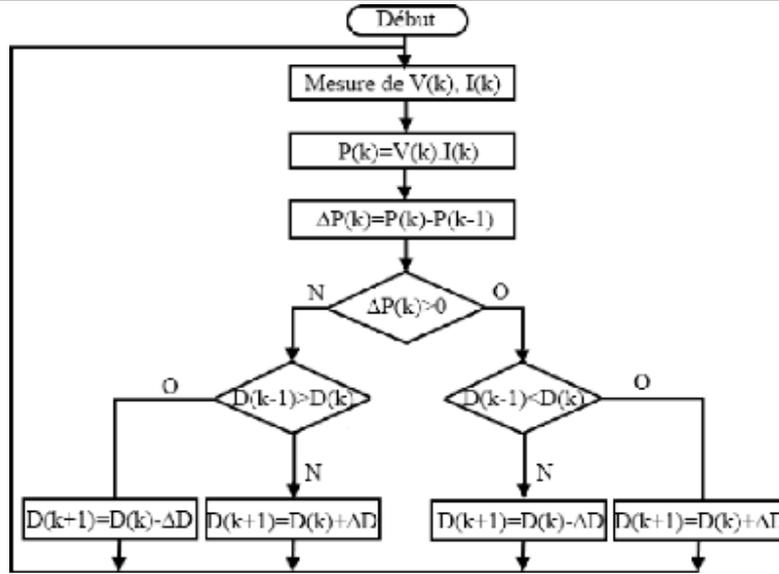


Fig. 4. 11. Organigramme d’algorithme MPPT (P&O)

ΔD est le pas de perturbation.

4.4.2. Méthode par incrémentation de conductance

L’algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \tag{4.21}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \cdot V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \tag{4.22}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}} \tag{4.23}$$

Le terme I_{pv}/V_{pv} représente l’opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et dI_{pv}/dV_{pv} représente le terme d’incrément de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum(PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l’inégalité indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum(PPM) [33].

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \right)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \right)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \right)$$

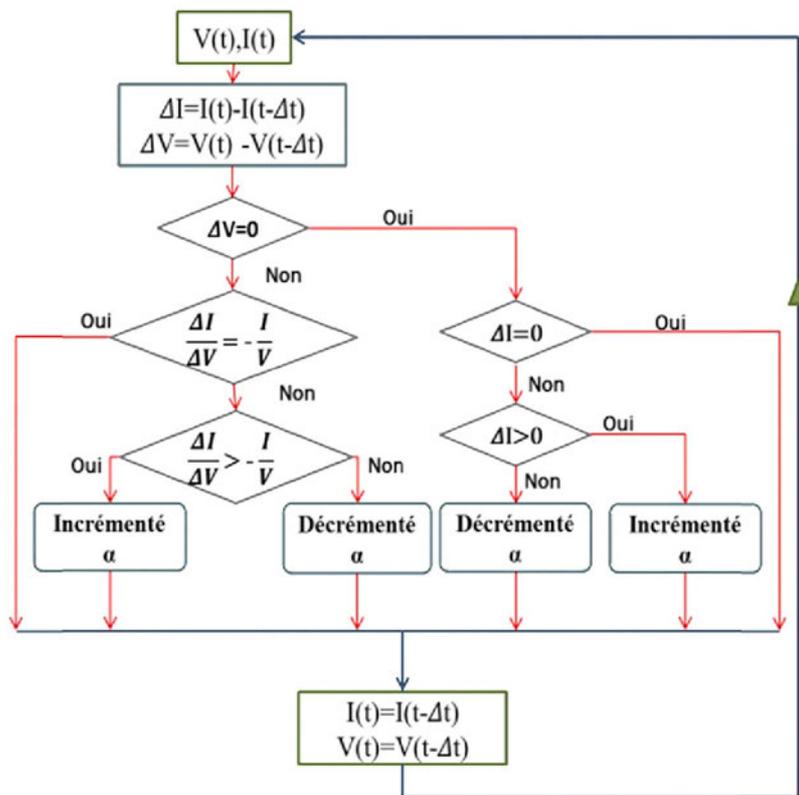


Fig. 4. 12. Organigramme d’algorithme MPPT (inc-cond).

ΔD est le pas de perturbation.

4.4.3. Logique floue

La logique floue est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous. Toute une série de notions fondamentales a été développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base de la logique floue.

L'importance de cette logique réside dans :

- Facilité d'implantation ;
- Solutions de problèmes multi variables complexes ;
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes ;
- Possibilité d'intégration du savoir-faire de l'expert.

4.4.3.1. Principe de base 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 [34].

4.4.4. Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine

Les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15 m/s. En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne et pour cela il existe une méthode de contrôle. Elle est basée principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais elle peut intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine.

4.4.4.1. Contrôle à calage variable de pale

L'angle de calage β est variable pour ce type de control, en cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité.

Le mécanisme de calage est normalement opéré par un système hydraulique [35].

4.5. Différentes modes de fonctionnement du système hybride

Notre système multi-sources est constitué par un GPV d'un générateur éolien, une batterie. Le SEH est conçu afin d'alimenter une charge, on considère que :

- Les systèmes PV et l'éolien sont considérés comme des sources principales ;
- La batterie est utilisée à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction ;
- La charge principale est toujours connectée.

Par conséquent pour simplifier l'étude, nous supposons que chaque composant a deux états; actif ou inactif, par exemple sur une journée en été, le rayonnement solaire est plus fort pendant le jour alors que le vent peut souffler dans la nuit. Le tableau ci-dessous exprime l'état de chaque composant constituant le SEH .En effet, selon les sources d'énergie disponibles, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie, nous distinguons plusieurs scénarios de fonctionnement du système hybride [36].

Etat		Actif	inactif
Source Principales	PV	Pendant un jour ensoleillé	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant la nuit. • Pendant un jour nuageux. • En cas de panne
	Eolien	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant la nuit. • Pendant un jour nuageux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant un jour ensoleillé (Vitesse du vent < à la Vitesse de démarrage de l'éolien). • En cas de panne.
Source auxiliaire	Batterie	<p>Pendant l'incapacité des sources principales, par exemple lorsque:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Les conditions climatiques sont faibles. 2. La demande de la charge est supérieure à la production. 3. En cas de panne d'une source ou les deux sources principales Lorsque l'état de charge est compris entre 20% et 80%. 	<ul style="list-style-type: none"> • pendant le fonctionnement normal des sources principales (PV et éolien). • La demande de la charge égale ou inférieure à la production ($P_{ch} = < P_{pv} + P_{éol}$).
Charge Principale		La charge est toujours connectée.	
Charge Auxiliaire	Batterie	En cas où existe un excès d'énergie, avec SOC est inférieur à seuil bas.	SOC est supérieur à seuil haut ($SOC_{max} = 0.8$).

4.6. Simulation et discussion

En supposant que la puissance demandée par la charge est égale à 10 kW et sous les conditions météorologiques : température $T = 25^{\circ}\text{C}$ (constante), et un ensoleillement où irradiation de valeur 1000 W/m^2 quand le temps est inférieure à 0.06s mais égale 600 W/m^2 sinon (voir la figure 4. 13). Sous ces conditions le générateur photovoltaïque fonctionne selon les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$ représentée précédemment. On note que pour $E = 1000\text{W/m}^2$ et $E = 600\text{W/m}^2$ les puissances maximales que peut produire le générateur photovoltaïque sont 11.5KW et 6KW, respectivement. Ceci, correspond bien à la courbe du bas de la figure 4. 13, qui justifie correctement que le générateur produit la puissance maximale quelque soient l'irradiation et ce grâce à la commande MPPT.

Par ailleurs, on considère un profil de vent à trois paliers, comme le montre la figure 4.14. Dans ce cas aussi, on remarque que la puissance produite par l'éolienne correspond bien à sa valeur de référence, et qu'en plus les courants statoriques de la machine synchrone évoluent en fonction du profil du vent considéré.

Concernant, le système de stockage (batterie) on rappelle que le hacheur bidirectionnel est prévu dans cette installation pour que la batterie se charge si la puissance totale entre le générateur PV et l'éolienne dépasse la puissance de référence demandée et se décharge dans le cas contraire. Cependant, sans les conditions adoptées pour cette analyse, la figure 4.15 montre ces deux modes de fonctionnement à travers les signaux de commandes des deux semi-conducteurs du hacheur réversible.

Finalement, la figure 4.16 résume et valide le bon fonctionnement de l'ensemble. En effet, en haut de la figure on voit que la puissance demandée étant constante, juste après la puissance du générateur photovoltaïque et par la suite celle de l'éolienne. En quatrième position c'est la puissance totale produite qui nous permet grâce à sa comparaison avec la référence de commander le système de stockage tantôt en charge (augmentation du seuil de charge SOC) entre les instants 0s à 0.06s et 0.133s à 0.42s et tantôt en décharge (diminution du SOC) durant les périodes 0.06s à 0.133s et lorsque le temps dépasse 0.42s.

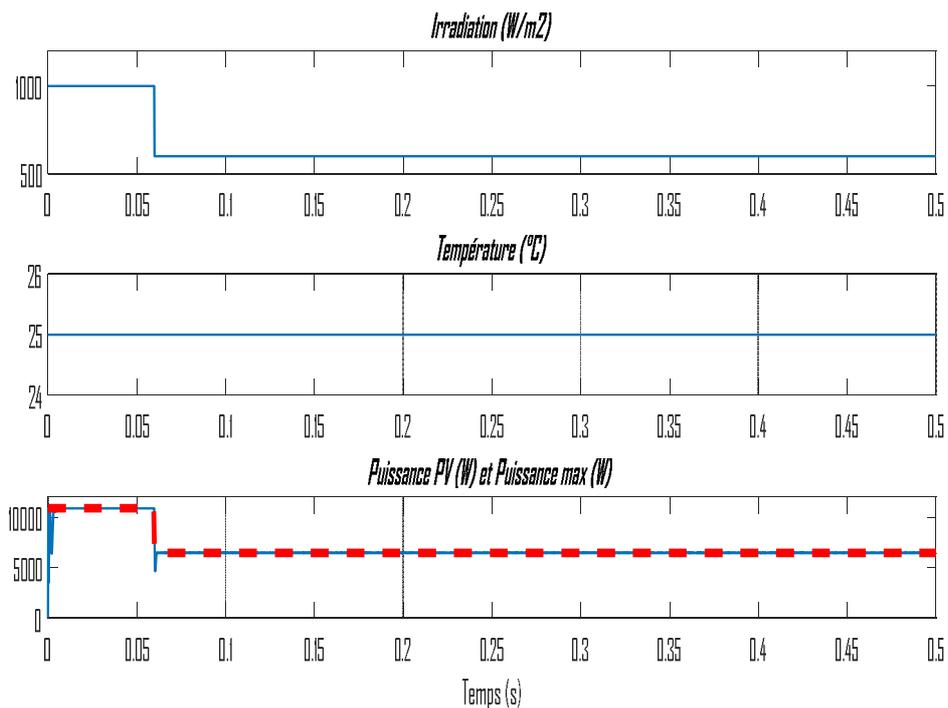


Fig. 4. 13. Irradiation et température considérées

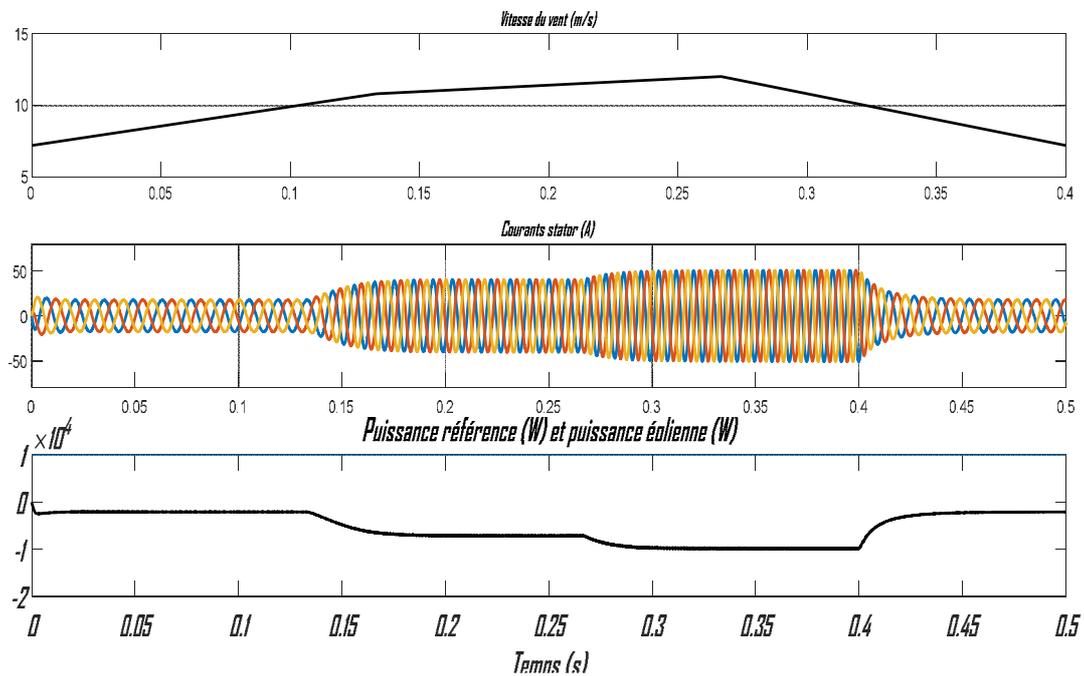


Fig. 4. 14. Profil du vent, courants statoriques et puissances

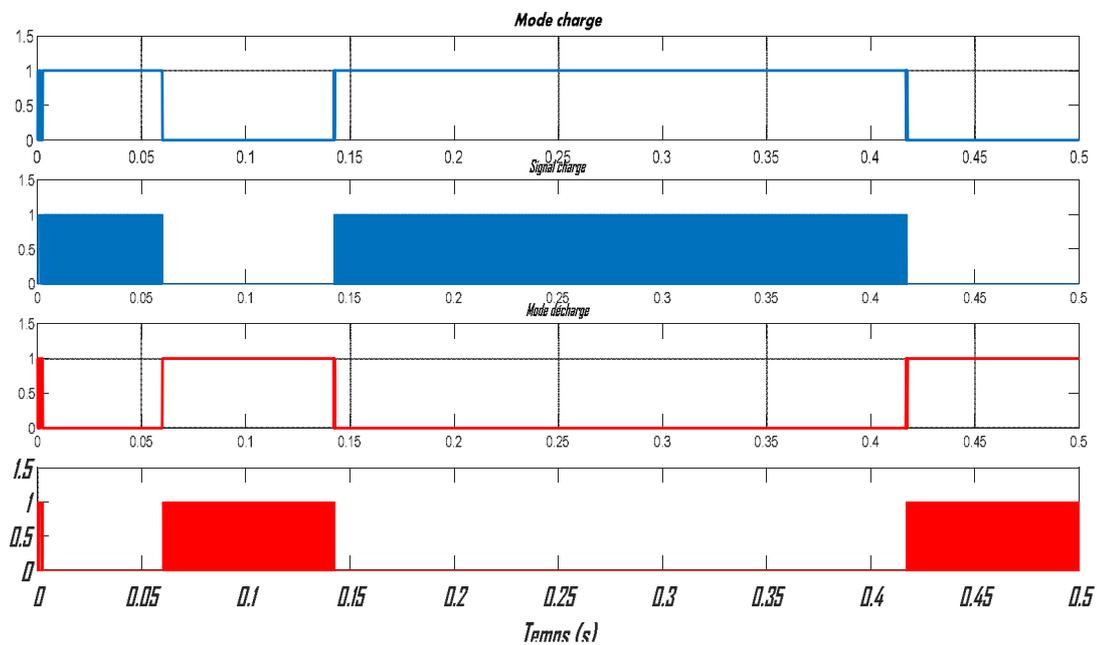


Fig. 4. 15. Mode Charge/décharge et signaux de commandes

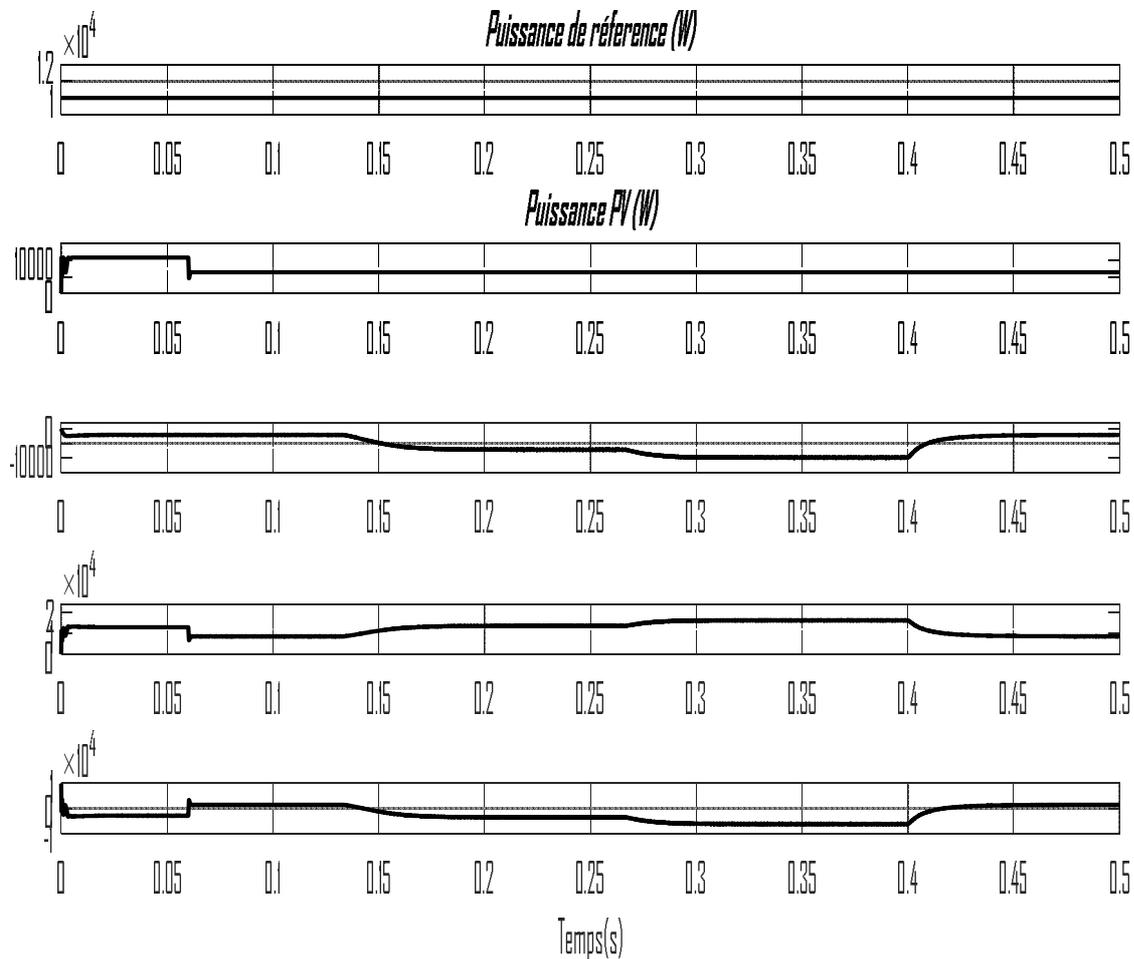


Fig. 4. 16. Gestion des puissances produites

4.7. Conclusion

Un système hybride est d'un intérêt capital pour les sites isolés. En plus, de l'intérêt de telles installations le système de stockage joue un rôle primordial pour la continuité de service sous les conditions météorologiques disponibles.

Ce chapitre a permis de s'initier à l'analyse de fonctionnement d'un système hybride : PV-Eolienne- Batterie et de valider son fonctionnement sous des profils d'irradiation, température et vitesse du vent.

CONCLUSION GENERALE

La production de l'énergie électrique constitue le palier du développement économique, de la sécurité, de la stabilité et l'avancée technologique. Ainsi, au vue de la situation énergétique et environnementale à travers le monde, la réussite de la transition énergétique en exploitation des ressources renouvelables est le défi de tout le monde. Par conséquent, les systèmes de production d'énergie électrique à base d'énergies renouvelables font de nos le centre d'intérêt de plusieurs travaux scientifiques en termes de conception, dimensionnement, modélisation, optimisation, commande, etc....

L'exploitation de systèmes de conversions à énergie renouvelables est une alternative prometteuse et incontestable par rapport à l'exploitation des énergies fossiles et ce grâce aux avantages qu'ils présentent, principalement, par leur disponibilité (durables et inépuisable) et par leur propreté (pas de rejet de déchet dans l'atmosphère). Toutefois, le caractère intermittent des énergies solaire et éolienne, l'option de l'hybridation de ces deux derniers, avec stockage s'avère une configuration d'une grande importance. A cet effet, un système hybride est d'un intérêt capital pour les sites isolés. En plus, de l'intérêt de telles installations le système de stockage joue un rôle primordial pour la continuité de service sous les conditions météorologiques disponibles

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire est une initiation à compréhension de la gestion des puissances d'un système hybride autonome PV/Eolienne/Batterie. L'effet de la variation de l'irradiation, température et vitesse du vent sur le comportement du système considéré ont été validés par simulations sous l'environnement MatLab /Simulink. Par ailleurs, comme l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne sont des les sources principales et par contre la batterie est une source axillaire pour de telles installations, une analyse de transfert de puissances entre ces dernières sources et la charge est présenté pour différents scenarios.

Les modèles des composants développés dans cette thèse peuvent être particulièrement utiles pour la conception, le dimensionnement et le contrôle d'un système aussi complexe que le système hybride qui combine des phénomènes physiques explicitement différents. Comme ils peuvent être couplés aux modèles économiques pour déterminer les coûts d'investissement et de fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] <http://www.energy.gov.dz>
- [2] www.dgrsdt.dz
- [3] www.ons.dz
- [4] <http://www.sonalgaz.dz>
- [5] <http://sonatrach.com>
- [6] David Funk. , « L'énergie solaire : circonstances et conditions d'exploitation au Québec», Université de Sherbrooke janvier 2010.
- [7] Joly Jean-Pierre, «Encyclopédie de l'énergie-Énergie Solaire : les bases théoriques pour la comprendre», Voir le site : <https://www.encyclopedie-energie.org/energie-solaire-les-bases-theoriques-pour-la-comprendre/>
- [8] Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadasy, « Le pompage photovoltaïque » ; IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [9] Ministère de l'énergie, « Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie», Voir le site : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.
- [10] Le photovoltaïque – module 3 – fonctionnement et technologies/institut bruxellois pour la gestion de l'environnement. https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF%20Energie%20Mod3%20Fonctionnement%20technologies%20PV%20FR.
- [11] Thomas Mambrini, «Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies», Météorologie ; Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français.
- [12] Berrezzoug Hanane, « Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque», Université Dr Moulay Tahar de Saida, 2016.

- [13] Metatla Samir, «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [14] Arthouros Zervos, « Sven Teske «perspectives mondiales de l'énergie éolienne», septembre 2006.
- [15] J.F. Manwel. «Wind energy Explained »; Theory, Desin and application. 2009 John Wiley & Sons.
- [16] Haritza Camblong , «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003 .
- [17] A. Idda, S. Bentouba et A. Mahdi Kada, « Résumé d'Etude du Potentiel Eolien d'Adrar», CREG, Filiale Sonelgaz, greg.dz.
- [18] Mohamed Mladjao, «contribution a la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multichargés » ; Laboratoire d'études et de recherche sur le matériau bois», 186, rue de lorraine - 54400 cosnes et romain.
- [19] Stoyanov, Ludmil, « Etude de diffrentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables», Université Pascal Paoli, 2011.
- [20] L. Protin and S. Astier, «Convertisseurs photovoltaïques», Techniques de l'ingénieur, D 3360, 1996.
- [21] A. Lakhdara , «Etude de la commande de la puissance et stockage d'un système photovoltaïque». Mémoire Master en Electrotechnique, Université Badji Mokhtar –Annaba, 2019.
- [22] Berrezzoug Hanane, «Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque». Université Dr Moulay Tahar de Saida Faculté des sciences Département de Physique, 2016.
- [23] B. Fellah, «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah » ; Thèse Magister, Université de Tlemcen, 2012.
- [24] S. Ameziane, « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien » ; Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [25] A. Mirecki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.

- [26] Abdenour Abdelli, «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [27] Salma El Aimani , « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; Thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL), 2004.
- [28] A. T. Singo, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome» ; Thèse doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [29] O. Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, France, 2002.
- [30] L. Zarour, «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau», Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, Juin, 2010.
- [31] H. Patel, V. Agarwal, « Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions», IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 55, N°. 4, pp.1689-1698, 2008.
- [32] A. Sahli, «Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau» ; Mémoire de magistère, Université de Sétif, 2012.
- [33] «Pour y Voir Plus Clair ... dans la Logique Floue ! » Document d'Internet, :<http://perso.club-internet.fr/bmantel/pages/logfloue/logfloue01.html>.
- [34] F. Chevie, F. Guely , «La Logique Floue» Cahier Technique Schneider», N°191, Mars 1998.
- [35] Peter Alexandersen, «1997-2003 Association danoise de l'industrie éolienne -Dernière mise à jour le 10 mai 2003 - <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/powerreg.htm>
- [36] Madaci Bouthaina, «Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs», Université des Frères Mentouri Constantine/N_ de série : 20/D3C/2018