

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingénierat
Département: Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :
**Etude, modélisation et simulation d'un système
hybride autonome éolien-photovoltaïque**

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electronique
Spécialité: Instrumentation

Par :
Fartas Hafsia

DEVANT Le JURY

Président : REDJATI Abdelghani	MCA	UBM Annaba
Directeur de mémoire : ABBASSI Hadj Ahmed	Prof	UBM Annaba
Co-Directeur: KHERFANE Hamid	MCA	UBM Annaba
Examineur : LARBI Allal	Prof	UBM Annaba
Examineur : TOUMI Salah	Prof	UBM Annaba

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, Patience et force durant toutes ces années d'étude.

Je remercie mes beaux parents, mes frères, mes sœurs ainsi que leurs familles

*Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre encadreur prof **Abbassi hadj Ahmed** et Co-encadreur **kherfane Hamid** Pour avoir accepté de nous encadrer, pour leurs permanentes gentillesse et pour leurs précieux conseils tout au long de notre travail.*

Je remercie vivement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste mémoire

Je remercie, tous les enseignants de l'université de Badji Mokhtar Annaba

Dédicace !

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

**Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ;
Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.**

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

ملخص:

ساهمت الطاقة المتجددة خلال السنوات الاخيرة في التنمية الاجتماعية و الاقتصادية ولكن يبقى مشكل توصيلها بالشبكات مكلف جدا.

ومنه ظهرت الانظمة الهجينة التي تجمع بين محرك ضوئي و محرك ريحي ان تكون بالكامل ذاتية لفك هذا النوع من

المشاكل

و في هذا العمل المطروح سنقدم نموذج ومحاكاة نظام هجين مستقل تماما ريحي كهرو ضوئي لانتاج الكهرباء في بطاريات التخزين.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين, الطاقة الريحية, الطاقة الكهرو ضوئية, بطاريات التخزين, المحولات.

Résumé :

Les énergies renouvelables ont contribué ces dernières années au développement social et économique, mais le problème de la connectivité réseau reste très coûteux.

Les systèmes hybrides combinant un générateur photovoltaïque et un générateur éolien s'expliquent d'eux-mêmes.

Dans ce travail, nous présenterons une modélisation et une simulation d'un système hybride

Totalement autonome éolienne-photovoltaïque permettant de produire de l'électricité

Dans des batteries de stockage.

Mots clés :

Système hybride, énergie éolienne, énergie photovoltaïque, les convertisseurs, batterie de stockage

Abstract:

Renewable energies have contributed in recent years to social and economic development, but the problem of network connectivity remains very expensive.

Hybrid systems combining a photovoltaic generator and a wind generator explain themselves.

In this work, we will present modeling and simulation of a hybrid system fully autonomous photovoltaic-wind turbine to produce electricity in storage batteries.

Key words

Hybrid system, Wind power, Photovoltaic power, Storage batteries, Transformers

Liste de figure

Chapitre I : principe fonctionnement d'un système hybride pv/ éolien

Figure I.1 : Système hybride	2
Figure I. 2 : Système hybride biénergie (solaire + éolienne) en Afrique.....	3
Figure I. 3 : Classification de système hybride.....	5
Figure I. 4 : Schéma synoptique système hybride pv /éolien.....	11
Figure I. 5 : Module photovoltaïque.....	12
Figure I.6 : Schéma description d'une cellule photovoltaïque.....	13
Figure I. 8 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	15
Figure I.9 : Redresseur.....	16
Figure I.10 : Onduleur.....	16
Figure I.11 : Hacheur.....	17

Chapitre II : modélisation d'un système hybride pv/éolien

Figure II.1 : Système hybride complète.....	19
Figure II. 2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	19
Figure II.3 : L'hacheur survolteur.....	21
Figure II.4 : Régulation de la tension du bus continu.....	22
Figure II.5 : Chaîne de conversion éolienne.....	23
Figure II. 7 : Redresseur PD3 (triphase).....	27
Figure II.8 : Onduleur.....	28
Figure II.9 : Schéma équivalent de la batterie.....	29

Chapitre III : Simulation d'un système hybride autonome pv /éolienne

Figure III.1 : Courant de tension(Température).....	32
Figure III.2 : Tension de puissance(Température).....	32
Figure III. 3 : Courant de tension(Irradiation)	33
Figure III.4 : Puissance de tension (Irradiation).....	33
Figure III.5 : Courant de tension (facteur de qualité variable).....	34
Figure III. 6 : Système photovoltaïque autonome.....	35.
Figure III.7 : La tension de sortie de l'hacheur survolteur.....	35
Figure III.8 : Tension de sortie en charge résistive.....	35
Figure III.9 : Schéma bloc de la turbine.....	36
Figure III.10 : Coefficient de puissance.....	36

Figure III.11 : Schéma bloc de la machine synchrone à aimant permanent.....	37
Figure III.12 : Vitesse de rotation.....	38
Figure III.13 : Couple électro.....	38
Figure III.14 : Vitesse de rotation et couple.....	38
Figure III.15 : Courant triphasé (i_{abc} (A)).....	39
Figure III.16 : Tension triphasé (u_{abc} (V)).....	39
Figure III.17 : Tension biphasé (u_{qd}) (pour le repère de Park).....	39
Figure III.18 : Courant biphasé (i_{dq}) (repère de Park).....	40
Figure III.19 : Schéma bloc de système éolien autonome.....	40
Figure III.20 : La sortie de l'hacheur.....	41
Figure III.21 : Tension de sortie de la charge résistive.....	41
Figure III.22 : Schéma bloc de système hybride.....	42
Figure III.23 : Bus continu.....	42
Figure III.24 : Tension de sortie l'onduleur.....	43
Figure III.25 : Tension de sortie de charge résistive.....	43

Nomenclature

Symbole	Désignation
VCO	La tension à circuit ouvert (V)
IL	Courant de photon
Isc	Courant de court _ circuit
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance shunt
Isc (T1)	Courant de court-circuit à la première température de référence (A)
Isc(T2)	Courant de court-circuit à la deuxième température de référence (A)
FF	Facteur de forme
I	Courant saturation
I0	Courant inverse de la diode,
K	Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$)
Q	Charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19} C$) ;
A	Facteur d'idéalité de la jonction.
N	Facteur de qualité
G	L'irradiation en kW/m ² ;
Gnom	L'irradiation nominale de la cellule photovoltaïque en kW/m ² ;
TI et T2	des températures de référence (K)
S	Surface de la cellule solaire.
Φ	Flux incident.
Im, Vm	Coordonnées de point de fonctionnement
Ich	Courant de charge
Ecv	Énergie cinétique
Vdc	Tension de bus continu
V	Vitesse de vent
P	La densité d'air [$Kg \cdot mm^{-3}$].
Ptur	Puissance de turbine

S	La surface circulaire balayée par la turbine
R	Le rayon du cercle
S	Surface balayée par l'éolienne,
P	Masse volumique de l'air (<i>1.25kg / m3</i>)
Cp	Coefficient de puissance
Λ	Vitesse spécifique
B	L'angle d'orientation de la pale
G	Gain du multiplicateur
<i>Te</i>	Le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone
<i>Tt</i>	Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
Ω	La vitesse mécanique de la génératrice
Cm	Le couple moteur appliqué sur la génératrice
Nb	Nombre de cellule constituant la batterie
Eb	La force électromotrice
Ubat	Tension de la batterie
Ibat	Courant de la batterie

Liste abrégation

SEH	Système énergie hybride
CC	Courant continu
AC	Courant alternative
FF	Facteur de forme
P_{max}	Puissance maximum
η_m	Rendement maximum
FTBO	Fonction transfert boucle ouvert
FTBF	Fonction transfert boucle fermé
EDD	Etat de charge
EDC	Etat de décharge
R_i	Résistance interne d'une cellule de la batterie

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux I.1 Typologies de configurations des systèmes hybrides.....8

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Liste de figure.....	IV
Nomenclature.....	VI
Liste abréviation	VIII
Liste de tableau.....	IX

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1: principe de fonctionnement de système hybride autonome éolienne Photovoltaïque	
I.1 INTRODUCTION.....	2
I.2 Système hybride	2
I.2.1 Définition	2
I.2.2 Principe de système hybride	3
I.2.3 Classification	4
I.1.3.1 Le régime du fonctionnement.....	4
I.1.3.2. La structure du système hybride.....	4
I.1. 4. Typologies de configurations des systèmes hybrides	5
□ Les configurations selon le type de bus (AC, CC ou AC/CC) :	5
• La configuration à bus CC (courant continu)	6
• La configuration à bus AC (courant alternatif).....	6
• La configuration à bus AC/CC.....	6
□ <i>Les configurations parallèle, série ou commuté</i> :	6
• La configuration série	6
• La configuration commutée	6
• La configuration parallèle.....	7
□ La configuration « maitre/esclave ».....	7
□ La configuration à plusieurs maîtres « Multi-master »	7
□ La configuration à un seul maître « single master »	7

I.1.4 Les avantages et les inconvénients d'un système hybride.....	9
I.2 Système hybride étude.....	10
I.2.1 Système hybride photovoltaïque-éolien.....	10
I.2.3 Principaux composantes du Système d'énergie hybride photovoltaïque -éolien	11
I.2.3. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque éolienne.....	11
I.2.3 Générateurs photovoltaïques.....	12
• Effet photovoltaïque :.....	12
I.2 .3.2 Générateur éolien.....	13
I.2.3.3. Systèmes de stockage.....	14
I.2.3.4 les convertisseurs.....	14
• Redresseur (AC/DC).....	14
• Onduleur (DC/AC).....	16
• Hacheur (DC/DC).....	16
I.2.3.5 Charges	16
I.3 Conclusion.....	17

Chapitre II modélisation d'un système hybride autonome éolienne photovoltaïque

II .1 La modélisation d'un système hybride éolien –photovoltaïque.....	18
II.2 Modelisation du champ photovoltaïque.....	18
II.2.1 Modèle électrique de la cellule pv.....	19
II.2.2 Paramètre des cellules photovoltaïques	20
II.2.3 .MODELISATION DE L'HACHEUR SURVOLTEUR	20
II.2.3.1 Principe de fonctionnement.....	21
II.2.3.2. Commande du hacheur survolteur	22
II.3 Modélisation de la chaine de conversion éolienne	23
II.3.1 Modélisation de la partie mécanique.....	23
II.3.1.1 Modélisation du vent.....	23

II.3.1.2 Modélisation de la turbine	24
II.3.2 Modèle du multiplicateur	25
II.3.3 Modélisation de la partie électrique.....	25
II.3.3.1 .Modèle de la machine synchrone a aiment permanent.....	25
II.4.Modélisation de convertisseur	26
II .4.1.Modélisation de redresseur	26
II.4.2.Modélisation de l'onduleur.....	27
II.5.Modélisation de système de stockage.....	28
• Modélisation de batterie.....	28
II.6. Conclusion.....	30

Chapitre III. Simulation d'un système hybride autonome éolienne_ photovoltaïque

III.1 Introduction	31
III.2 Simulation de cellule photovoltaïque	31
III.2.1 Simulation 1 : Observation de l'influence de la température sur la tension et le courant.....	31
III.2.2. Simulation 2 : Observation de l'influence de la température sur la puissance.....	31
III.2.3. Simulation 3 : Observation de l'influence de l'intensité de l'ensoleillement sur le courant et la tension	32
III.2.4. Simulation 4 : Observation de l'influence de l'intensité de l'ensoleillement sur la puissance	32
III.2.5 Simulation 5 : système photovoltaïque autonome (avec stockage).....	34
III.3. éolienne.....	35
III.3.1 Simulation 1.la turbine (coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique).....	35.
III.3.2 Simulation 2. Machine synchrone a aiment permanent	36
• Observation la vitesse de rotation	37
• Observation de couple de puissance	37
• Observation de tension et le courant triphasé.....	38
• Observation la tension dans le repère Park.....	38

• Observation le courant dans le repère Park (d,q).....	39
III.3.3 Simulation système éolienne autonome (avec stockage)	39
III.4 Simulation globale d'un système hybride autonome (éolienne- photovoltaïque).....	41
• Observation la sortie de l'onduleur.....	42
• Observation de la sortie de la charge résistive.....	42
III.5.Conclusion	43
Conclusion générale.....	44
Bibliographie	45
ANNEXE.....	X
Annexe 1.....	XI
Annexe 2	XI
Annexe 3.....	XI

Introduction générale

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans les unités de production d'électricité de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Ce qui représente un lourd fardeau financier pour d'électrification des locaux dans les sites isolés de notre pays. Installer des lignes électriques sur des centaines de kilomètres ne pourra pas résoudre ce problème. Ceci est par le faite de la présence des contraintes dues aux intempéries dont le vent de sable, les gradients de température entre les différentes saisons et celle entre la nuit et le jour pour la saison hivernale. A cet effet, nous avons pensé à contourner le problème par une autre solution à savoir le système hybride. Cette méthode de production d'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées et ventés. Cependant le travail proposé consiste en une combinaison de deux sources d'énergie (solaire et éolienne) de production continue de l'énergie électrique. L'autonomie de ce système sera assuré par un système de stockage .Ce système est destiné a alimenté des sites isolés au cours de toute l'année. Ceci nous semble répondre de façon intéressante à nos soucis de développement durable, aussi bien du point de vue environnemental que de celui de la sécurité d'approvisionnement.

Le document a été divisé en trois chapitres dont le contenu est résumé ci-dessous :

- Le premier chapitre donne une description générale du système hybride (éolienne, photovoltaïque) ses classifications ainsi que les avantages et les inconvénients
- Dans le second chapitre, on passe en revue de décrire le modèle de conception d'un Système hybride ainsi que ces différents composants.
- Le troisième chapitre contient la simulation du système hybride et les résultats obtenus.
- A la fin de ce travail, nous présenterons la conclusion et les perspectives.

Chapitre I

Description et principe de fonctionnement du système hybride autonome Photovoltaïque - éolien

I.1 INTRODUCTION

La demande sans cesse croissante sur les sources d'énergies conventionnelles comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole brut, fait que la recherche de notre société se dirige vers le Développement des sources d'énergies alternatives. Beaucoup de sources d'énergie renouvelable comme l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque sont maintenant bien développées, rentables et sont largement utilisés pour l'investissement dans ce domaine, tandis que d'autres sources. Ces sources d'énergie sont préférées car elles sont respectueuses de l'environnement.

La combinaison de ces sources d'énergies pour former un système hybride est une excellente Option pour la production d'énergie distribuée. La figure (I.1) présente un système hybride autonome [1]

I.2 Système hybride

I.2.1.Définition d'un système hybride :

De façon générale, un système hybride d'énergie est un système qui combine différents Systèmes de production. Par exemple, la combinaison éolien-diesel est un système hybride D'énergie, de nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins Deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, Généralement des générateurs au diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands Réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes Hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à La demande d'énergie sur de longues périodes. [2]

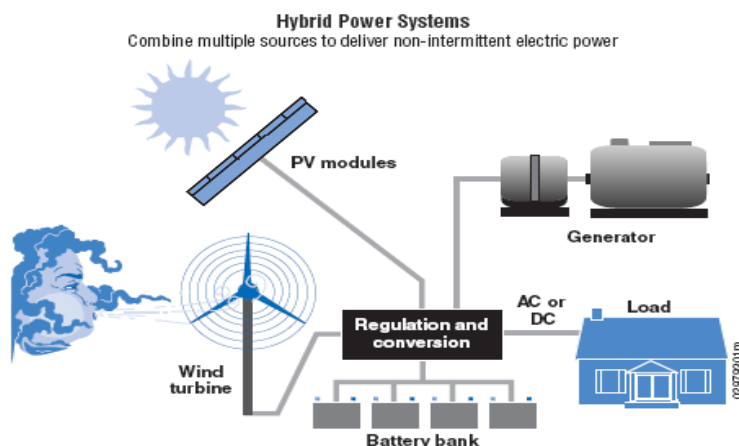


Figure (I.1) système hybride [3]

I.2.2 Principe de système hybride

Le fait de marier dans un même système deux sources d'énergie ou plus apporte de la stabilité, surtout si ces sources sont complémentaires. On distingue deux grandes familles de source d'énergie :

- les énergies flux : elles sont variables et intermittentes, et ont besoin d'un stockage car on ne peut pas les prévoir à l'avance. Elles sont gratuites et renouvelables. On fait appel à des modèles de probabilité et des simulations météo pour estimer leur potentiel
- Énergies stock : ce sont des énergies que l'on peut stocker pour une utilisation ultérieure et donc les utiliser au moment où on en a besoin. Elles peuvent répondre facilement à la demande en énergie, à n'importe quel moment. Ces énergies sont en revanche rarement renouvelable et coûteuses à l'utilisation : gaz, pétrole, charbon, bois de feu...



Figure (I.2) Système hybride biénergie (solaire + éolienne) en Afrique

Un bon système hybride profite des avantages combinés de ses deux formes d'énergie. Les énergies flux permettent de produire la plus grande part d'énergie, pour un prix très faible, tandis que les énergies stock sont utilisées à la demande, en appoint, pour répondre à un besoin exceptionnel en énergie ou pour faire face à un creux de production des énergies flux

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

.Si le système d'énergie est dimensionné par un professionnel de l'énergie, l'équilibre suivant est atteint:

- la source d'énergie flux (solaire, éolien, hydraulique) est exploitée à son maximum pour que chaque kWh soit utile. Elle couvre de 80 à 95% de la demande en énergie
- la source d'énergie stock (groupe électrogène) est utilisée rarement, seulement à la saison la moins favorable et sur de courtes durées
- la capacité de stockage du système (batteries) est réduite afin de faire des économies au moment de l'investissement et lors des remplacements [4]

I.2.3 Classification

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la Suite sont présentées les classifications les plus répandues.

I.2.3.1. Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes.

- ***le premier groupe, on*** : trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi

Connectes réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

- ***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

I.2.3.2. La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du Système.

- Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique

Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage

La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage

Peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ...

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien_photovoltaïque

- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie Renouvelables utilisées.

La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolien, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des Vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système [5]

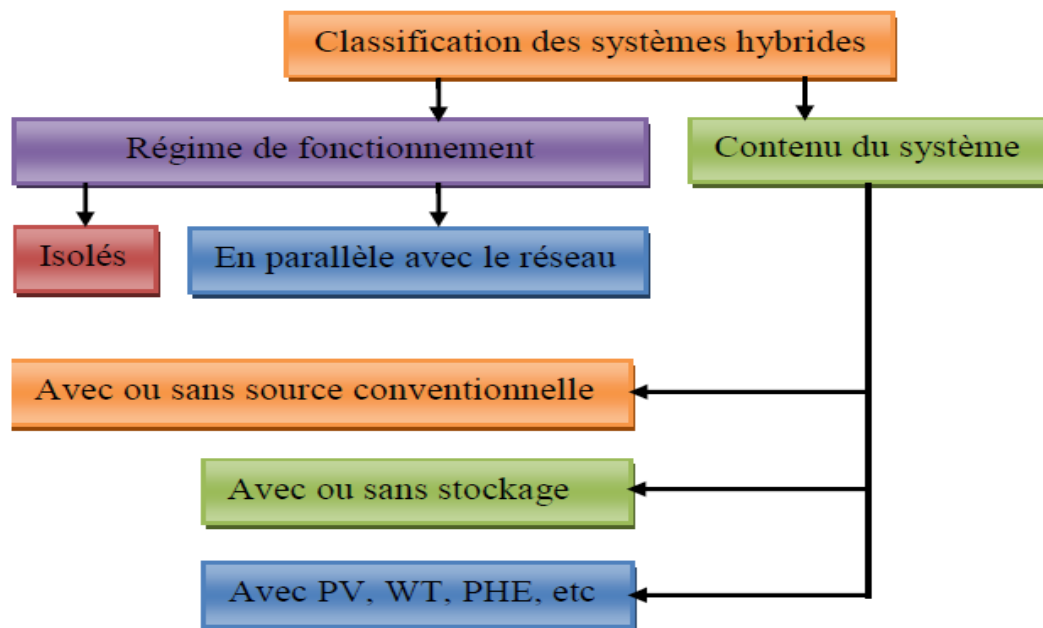


Figure I.3 classification du système hybride

I.2.4. Typologies de configurations des systèmes hybrides [6]

Il existe plusieurs typologies de configurations de systèmes hybrides. On peut les regrouper suivant le type de tension (AC, CC), suivant le type de montage électrique des composants (parallèle, série), ou suivant les modes de contrôle (multi, simple maître) :

□ *Les configurations selon le type de bus (AC, CC ou AC/CC) :*

Une façon de définir et comparer les systèmes hybrides est de les classer en fonction du type de tension qu'ils utiliseront principalement et le type de bus qui reliera les différents composants entre eux ; dans cette classification, l'accent est mis sur le type de bus. On distingue:

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

La configuration à bus CC (courant continu)

Un système hybride de production d'électricité est dit à bus CC lorsque toutes les sources de production (générateurs Diesel et technologies d'énergies renouvelables) sont Centralisées sur un bus CC. Ainsi, les sources qui génèrent naturellement un courant AC doivent être précédées d'un ou plusieurs redresseurs avant d'être connectées au bus CC.

La configuration à bus AC (courant alternatif)

De même que pour le cas précédent, la configuration AC implique que tous les composants de production d'électricité soient connectés à un bus AC. Cette configuration peut offrir des performances meilleures que celles de la configuration précédente dépendamment de la charge. En effet, chaque source de production peut alimenter la charge indépendamment ou simultanément avec les autres sources de production du système.

La configuration à bus AC/CC

Les configurations à bus AC/CC de systèmes hybrides sont celles pour lesquelles les composants qui génèrent le courant AC et CC sont mis de part et d'autres des onduleurs bidirectionnels. Il est possible d'avoir recours à un onduleur /un redresseur pour connecter un composant AC sur le bus CC ou un composant CC sur le bus AC, au détriment des rendements.

Les configurations parallèle, série ou commuté :

Les systèmes hybrides peuvent être classifiés suivant le type de montage électrique des composants. On distingue ainsi:

La configuration série :

Un système hybride est dit de configuration série lorsque l'énergie produite par toutes les sources d'énergies (conventionnelles ou renouvelables) est d'abord stockée dans un grand parc de batteries, puis reconvertie en AC pour alimenter les charges. Le parc de batteries y est donc dimensionné pour alimenter entièrement la charge.

La configuration commutée :

Comme dans une configuration série, les sources d'énergies renouvelables et conventionnelles du système hybride sont stockées dans un parc de batteries capable d'alimenter tout ou partie de la charge. En fonctionnement, les générateurs Diesel (ou les sources conventionnelles) alimentent la charge. Lorsqu'à un moment quelconque, l'énergie stockée dans les batteries est suffisante pour alimenter la charge, les générateurs Diesel sont débrayés au moyen d'un commutateur manuel ou automatique. Rappelons que l'énergie

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

Stockée dans les batteries est d'abord convertie en AC par un onduleur pour alimenter la charge.

La configuration parallèle

Une configuration parallèle des systèmes hybrides implique que toutes les sources de production soient couplées de manière à fonctionner en parallèle. C'est-à-dire que la charge est alimentée par l'énergie résultant de la combinaison des productions de toutes les sources présentes dans le système. De plus, en cas de faible demande, certaines unités peuvent être éteintes sans compromettre le fonctionnement des autres.

La configuration « maître/esclave ».

Dans cette configuration, le critère de différenciation est le contrôle de la fréquence et de la tension du réseau constituée par le système hybride. La configuration maître / esclave est essentiellement utilisée lorsque deux ou plusieurs sources de production d'énergie peuvent alimenter simultanément une même charge. Le « maître » est la/les source (s) chargée(s) d'imposer sa (leur) tension et sa (leur) fréquence au réseau afin d'assurer l'équilibre entre la production d'électricité et la consommation. Et les autres sources de production (esclaves) s'accommodent à la tension et à la fréquence imposées par le « maître ». Ici, tout est géré automatiquement par un système de contrôle. On distingue généralement:

La configuration à plusieurs maîtres « Multi-master »

La tension et la fréquence du réseau sont imposées soit par plusieurs onduleurs, soit par les générateurs Diesel, soit un mix des deux. Il y a au moins deux sources de production qui sont chargées de réguler la tension et la fréquence du réseau.

La configuration à un seul maître « single master »

Dans cette configuration, une seule source de production permet d'imposer la tension et la fréquence du réseau.

Suivant le type de bus principal, le mode de contrôle et/ou le type de montage électrique adopté pour les composants, on rencontre de nos jours plusieurs typologies de systèmes hybrides.

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

	<p>Descriptif : Tous les composants du système sont connectés sur un bus CC et les batteries sont directement chargées. Toutes les sources sont utilisées au maximum et la charge est alimentée sans interruption. Le parc de batteries doit satisfaire la demande, et les cycles charges/décharges des batteries sont assez fréquents. Ce qui crée des pertes en plus des pertes de conversion des redresseurs.</p>
	<p>Descriptif : Tous les composants du système sont connectés à un bus AC. Les composants fonctionnent comme une source de tension alternative (générateurs Diesel, hydro, éolien) et peuvent être connectés directement au bus AC. L'onduleur contrôle la tension et la fréquence du système ainsi que le fonctionnement des batteries.</p>
	<p>Descriptif : Les composants AC et CC sont connectés de part et d'autre d'un onduleur bidirectionnel qui assure le rôle de maître et contrôle l'énergie fournie à la charge. Les composants nécessitent d'être synchronisés entre eux. Le rendement du système est élevé lorsqu'il y a à la fois des charges AC et CC à alimenter</p>

Tableau I.1 Typologies de configurations des systèmes hybrides

I.2.5. Les avantages et les inconvénients d'un système hybride

A) Avantages

- Non dépendant d'une seule source d'énergie
- Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.
- Faible couts liés au cycle de vie de l'électricité pour des applications

B) Inconvénients

- Coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes électriques isolés, nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité. [7]

I.3 Système hybride étude

I.3.1 Système hybride photovoltaïque-éolien

Le système hybride de production d'énergie est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante, ce qui exige l'utilisation d'un système de stockage.

En plus des sources d'énergie renouvelable, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif(CA), un système à courant continu(CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution [8].

En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption ;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques [9].

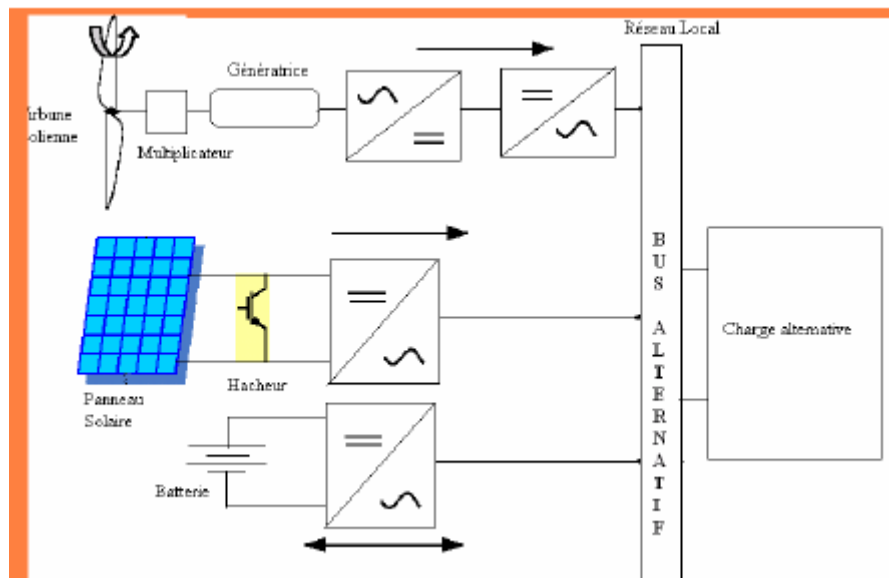


Figure (I.4) schéma synoptique système hybride pv /éolien [3]

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

I.3.2 Principaux composants d'un système étude

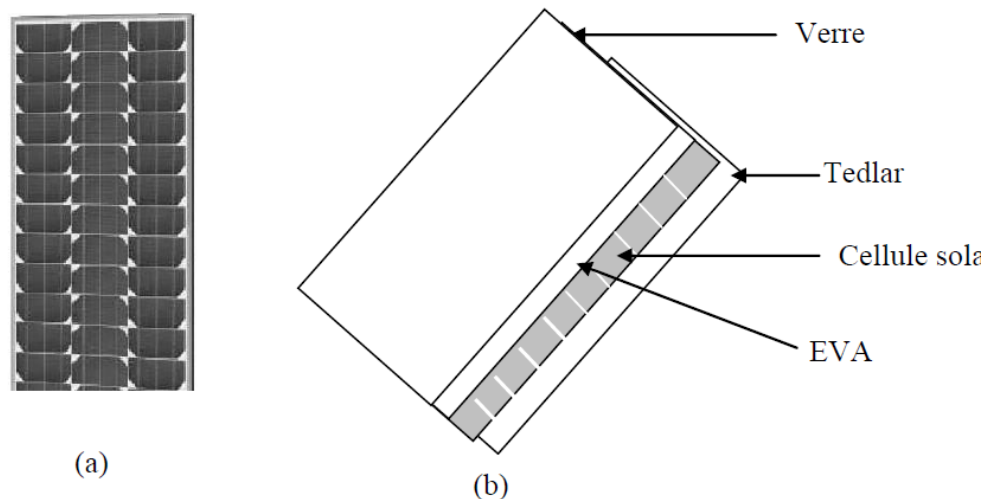
Les systèmes hybrides autonome photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- Un système générateur (éolien-photovoltaïque).
- Les batteries de stockage.
- les convertisseurs l'électronique de puissance.
- Une charge (résistive, inductif).

I.3.3. Descriptions des composants du système hybride photovoltaïque-éolienne

I.3.3.1 Générateurs photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie. [9].



Figure(I .5) Module photovoltaïque [10].

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

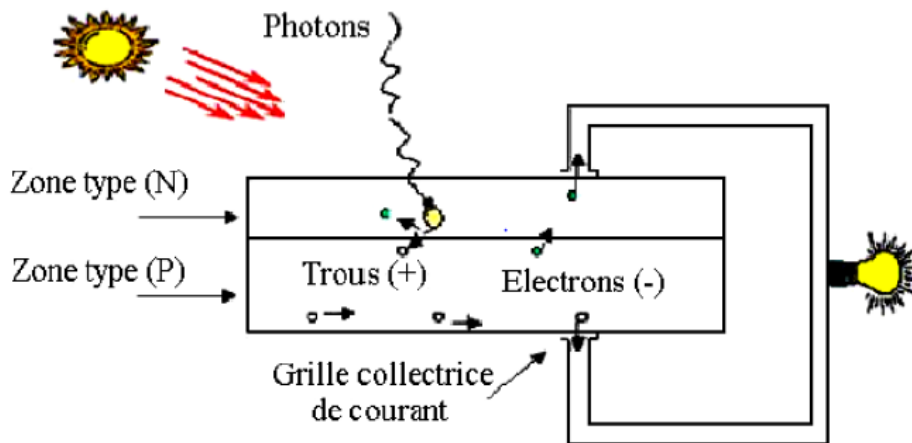
- Effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque est la production de l'énergie électrique par un système recevant du flux lumineux. Il repose sur le principe suivant :

On dope un disque de silicium positivement. Une de ces faces est ensuite dopée N, une jonction PN est ainsi réalisée. Du côté P comme du côté N, nous avons des trous et des électrons fixes. Ces charges fixes donnent naissance à un champ électrique E qui tend à repousser les charges mobiles de part et d'autre de la zone de transition. Aucun courant ne traverse la jonction. Lorsque la cellule solaire est éclairée, une partie des photons qui la frappent est réfléchi et l'autre partie pénètre dans la jonction. Les photons absorbés

Possédant une énergie suffisante, libèrent des parties des paires électrons – trous qui à leurs tours se déplacent sous l'action du champ électrique dans le cristal par phénomène de diffusion, ce qui provoque une différence de potentiel à ces bornes.

Le branchement d'une charge à ces bornes, permet l'écoulement d'un courant, l'énergie des photons est ainsi convertie en énergie électrique



Figure(I.6) Schéma description d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt

Le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint actuellement 15 à 19 % pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium poly cristallin, 7 à 9% pour le Silicium amorphe.

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules Photovoltaïques. [10].

I.3.3.2 Générateur éolien

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne »)

Est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La Technologie des aérogénérateurs a énormément évoluée ces 20 dernières années entraînant Une spécialisation des différents types d'éolienne.

Le petit éolien, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 Kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes En site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un Voilier (éclairage, instruments de bord...).

L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, Qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales.

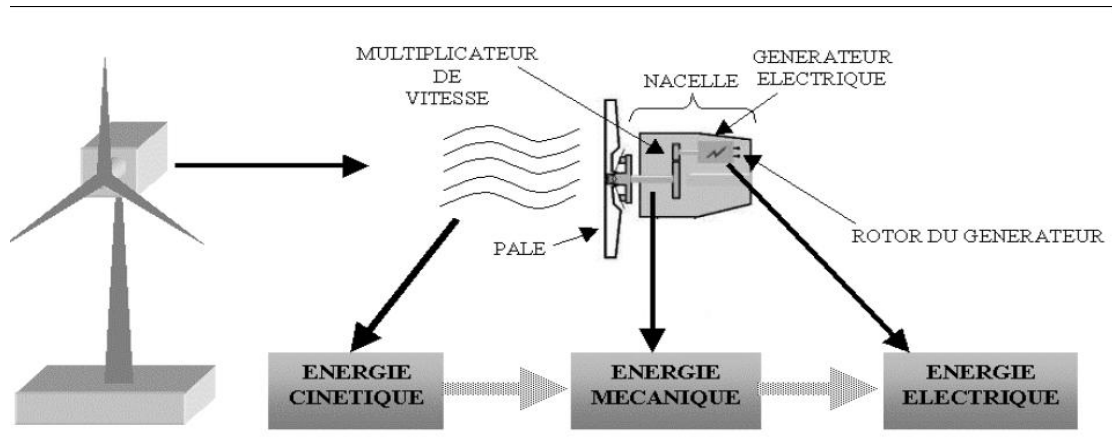
Les petites éoliennes peuvent avoir un système mécanique de modification de l'angle de Calage des pales ou d'orientation face au vent, alors que les grandes éoliennes utilisent des Systèmes de commande électroniques. Les différents types de protections utilisées par les Petits systèmes éoliens sont :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal ;
- Pas variable par pression du vent. Les pales en fibre se déforment et provoquent un décrochage;
- Déviation par rapport à l'axe du vent. Le rotor se trouve légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique.

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son Fonctionnement. Cette configuration basée sur la caractéristique de la vitesse. Le fait Qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette Configuration.

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les Machines synchrones et les machines asynchrones. [11].



Figure(I.7) conversion de l'énergie cinétique du vent [12].

I.2.3.3. Systèmes de stockage :

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

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène [1].

I.2.3.4. Convertisseur

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [12].

▪ Redresseur :

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement [1].

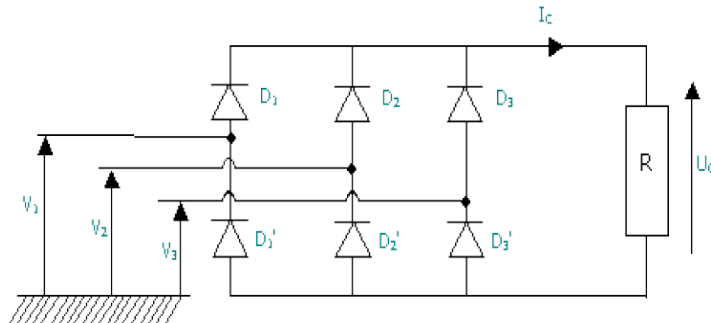


Figure (1.8) redresseur [8].

▪ **Les onduleurs**

. Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type Continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.

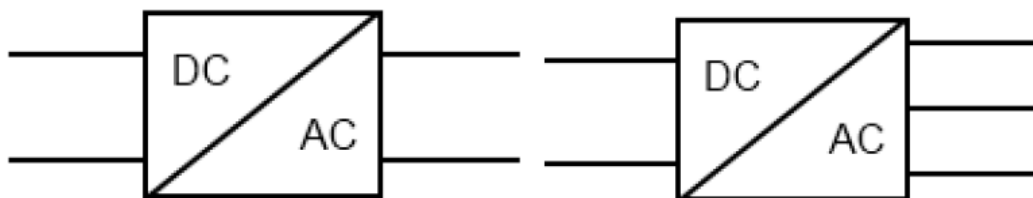


Figure (1.9) onduleur

✓ **Classification des onduleurs :**

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation :

- les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée
- les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle.

Chapitre I Description et principe de fonctionnement d'un Système hybride autonome éolien _ photovoltaïque

Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre

Ou selon la nature de la source continue

Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal

• Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [8].

▪ Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée [13].

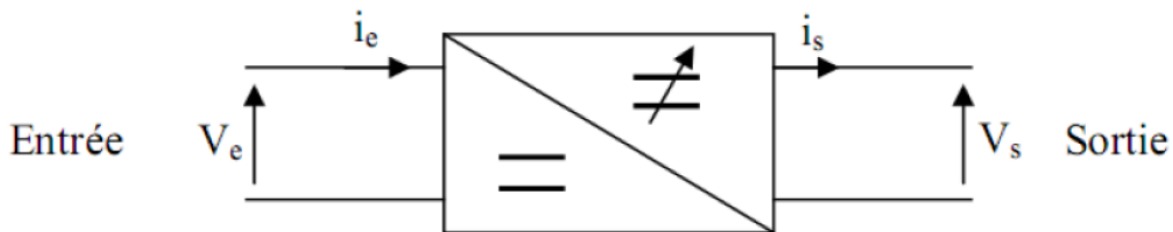


Figure (1.11) Hacheur [8].

I.2.3.5 Charges :

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont Les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système [12].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons généralement présenté un système hybride associé à deux systèmes importants pour la production d'énergie électrique.

Dans ce contexte, nous avons étudié les classifications, typologies des configurations d'un système hybride et les composants les plus importants éolienne, photovoltaïque, les convertisseurs, les charge et aussi comment les effets naturels transforment l'énergie électrique.

Dans ce but, les sources du S.H étudié sont modélisées dans le chapitre suivant.

Chapitre II

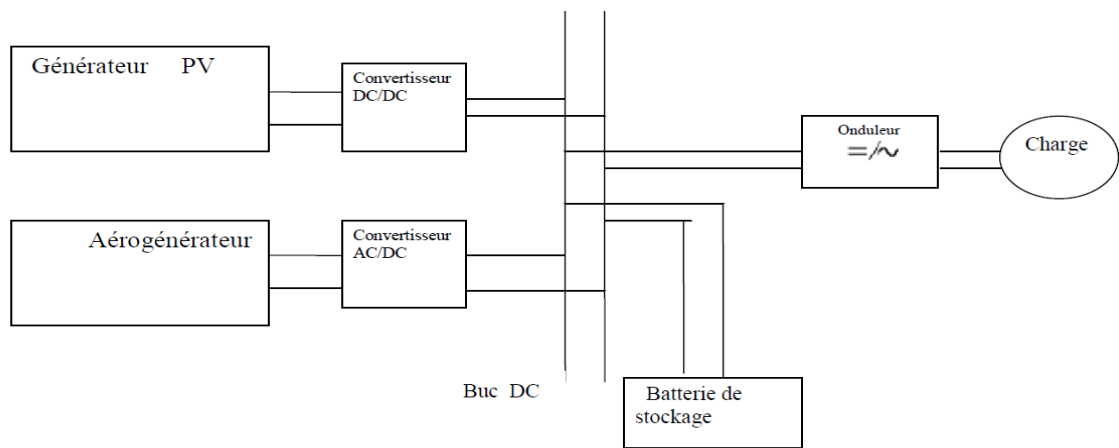
Modélisation d'un système hybride autonome

Eolien _ photovoltaïque

II .1 La modélisation d'un système hybride autonome éolien – photovoltaïque :

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique. elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de Certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système hybride éolien –photovoltaïque et la demande de l'utilisateur [13].



Figure(II.1) :système hybride complète

II.2 Modelisation du champ photovoltaïque

II.2.1 Modèle électrique de la cellule pv

Le circuit équivalent le plus simple pour la modélisation d'un panneau solaire est une source de courant en parallèle avec une diode.

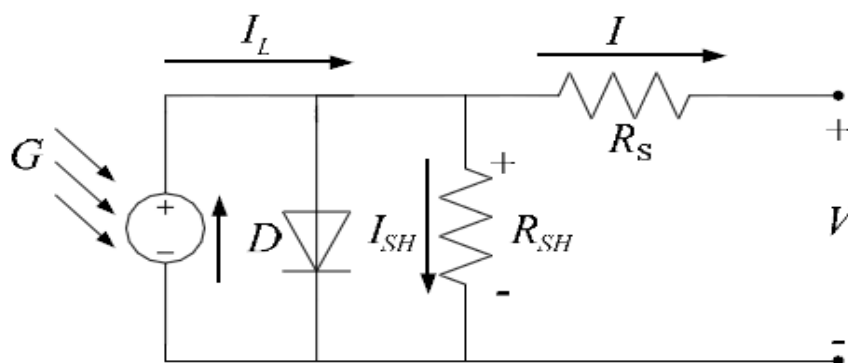


Figure (II.2) : Circuit équivalent pour modéliser un panneau solaire

Le courant produit est influencé par plusieurs paramètres :

- L'intensité de la lumière
- Température
- Résistances en série
- Le facteur de la diode (du système)
- Le rendement du système

Hypothèse :

- 1- La résistance R_{SH} est négligeable (égale à 0).
- 2- Panneau solaire idéal [14].

Équations :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(v + I r_s)}{n * k * T}} - 1 \right) \dots \dots \dots (\text{II.1})$$

Influence de la température sur le courant photovoltaïque :

$$I_L = I_L(T1) + k_0(T - T1) \dots \dots \dots (\text{II.2})$$

$$I_L(T1) = I_{SC}(T1, nom) \frac{G}{G_{nom}} \dots \dots \dots (\text{II.3})$$

$$k_0 = \frac{I_{SC}(T2) - I_{SC}(T1)}{T2 - T1} \dots \dots \dots (\text{II.4})$$

$$I_0(T1) = \frac{I_{SC}(T1)}{e^{\frac{q * V_{CO}(T1)}{n * k * T1}} - 1} \dots \dots \dots (\text{II.5})$$

Le courant de court-circuit $I_{SC}(T1)$ est le courant maximal produit lors d'un court-circuit, lorsque $V=0$ à la température désirée.

La tension en circuit ouvert s'obtient ainsi :

$$V_{CO} = \frac{n * k * T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \dots \dots \dots (\text{II.6})$$

La tension de sortie en fonction de la température et du courant :

$$V = \frac{\text{puissance}}{\text{courant de sortie}} = \frac{n * k * T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \dots \dots \dots (\text{II.7})$$

II.2.2. Paramètre des cellules photovoltaïques

- Le courant de court-circuit $I_{SC}(T1)$ est le courant maximal produit lors d'un court-circuit, lorsque $V=0$ à la température désirée.
- La tension en circuit ouvert s'obtient ainsi [14] :

$$V_{CO} = \frac{n * k * T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \dots \dots \dots (\text{II.8})$$

La tension de sortie en fonction de la température et du courant :

$$V = \frac{\text{puissance}}{\text{courant de sortie}} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) \dots \dots \dots \text{(II.9)}$$

- Facteur de forme

On appelle facteur de forme *FF* (*filling factor*), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{sc} \cdot V_{co}$ où [15]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} I_{sc}} \dots \dots \dots \text{(II.10)}$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

- **Rendement énergétique maximum η_m :**

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) [13]

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_M V_M}{S \Phi} \dots \dots \dots \text{(II.11)}$$

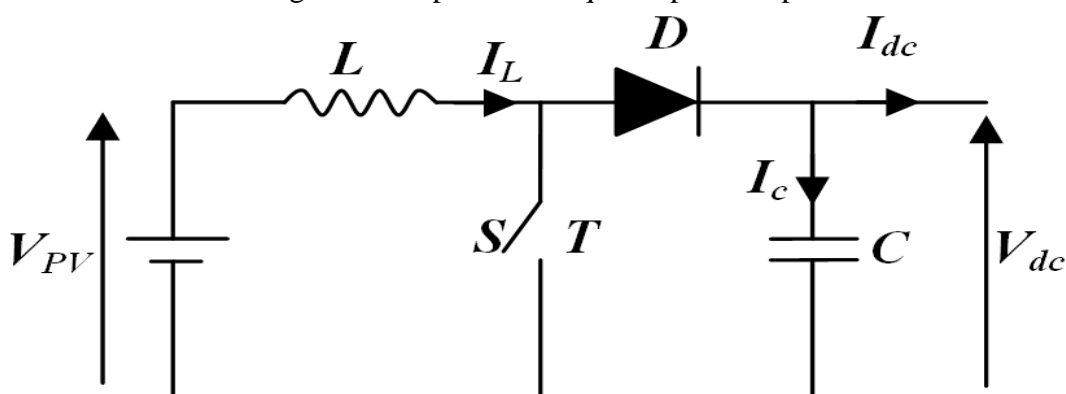
II.2.3 Modélisation de l'hacheur survolteur

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source,

II.2.3.1. Principe de fonctionnement

La figure (II.5) représente le principe de fonctionnement d'un hacheur survolteur qui est utilisé pour :

- adopté le niveau de tension.
- fait fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale.



Figure(II.3) l'hacheur survolteur

La modélisation de ce convertisseur basé sur l'analyse des différentes séquences de Fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande *S*.

Comme résultats on a deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur *T*, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

-a $0 < t < \alpha T$

- Lorsque (T) est fermé et (D) ouvert :

$$v_{PV} = L \frac{di_L}{dt} \dots \dots \dots (II.12)$$

$$0 = c \frac{dv_{dc}}{dt} + I_{CH} \dots \dots \dots (II.13)$$

-a $\alpha T < t < T$

Lorsque (T) est ouvert et (D) fermé :

$$v_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + v_{dc} \dots \dots \dots (II.14)$$

$$I_L = c \frac{dv_c}{dt} + I_{CH} \dots \dots \dots (II.15)$$

II.2.3.2. Commande du hacheur survolteur

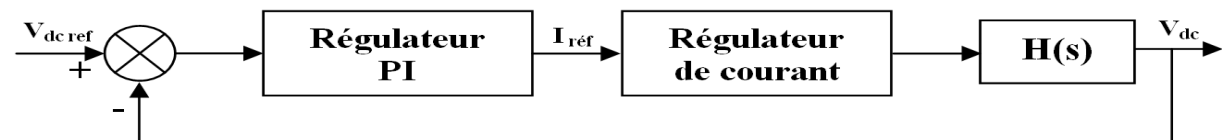
Concernant la commande du hacheur survolteur (figure II.3), on a mis en place :

- une commande de type cascade
- une régulation du courant dans la bobine par hystérésis
- une boucle de régulation de la tension V_{dc} .

A partir de l'erreur sur la consigne de courant et après passage dans un relais pour être entre 0 et 1 et ce signal sert directement de commande pour l'interrupteur (T) (figure II.3).

Notons que la boucle de tension assure une tension constante en sortie du convertisseur.

Dans la structure cascade, elle permet de générer la consigne de la boucle de courant. Cette boucle de tension doit être lente par rapport à la boucle de courant. Le correcteur choisi est de type proportionnel intégrale PI (figure II.4). [15]



Figure(II.4) régulation de la tension du bus continu

$$H(s) = \frac{2v_{pv}}{c.s} \dots \dots \dots (II.16)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut

$$F_{TBO}(s) = k_1 \left(1 + \frac{1}{k_2} \right) \left(\frac{2v_{pv}}{c.s} \right) \dots \dots \dots (II.17)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donc :

$$f_{tbf} = \frac{f_{tbo}(s)}{1+f_{tbo}(s)} = \frac{1+k_2*s}{\frac{c.k_2}{2.k_{VPV1}}+k_2*s+1} \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

Soit les paramètres du régulateur de tension :

$$k_1 = \frac{c.w}{V_{pv}} \text{ et } k_2 = \frac{2.\varepsilon}{w} \rightarrow k_p = \frac{c.w}{v_{pv}} \text{ et } k_i = \frac{c.w^2}{2\varepsilon v_{pv}} \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

Typiquement on prend :

$$W = \frac{w_{mes}}{100} \text{ et } \varepsilon = 0.7 \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

II.3. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air (ρ), la surface balayée par le rotor (s) et la vitesse du vent (V_{vent}). La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. La configuration du système étudié est constituée d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur(R) entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain (G), comme le montre la (figure II.5) suivant :

[16].

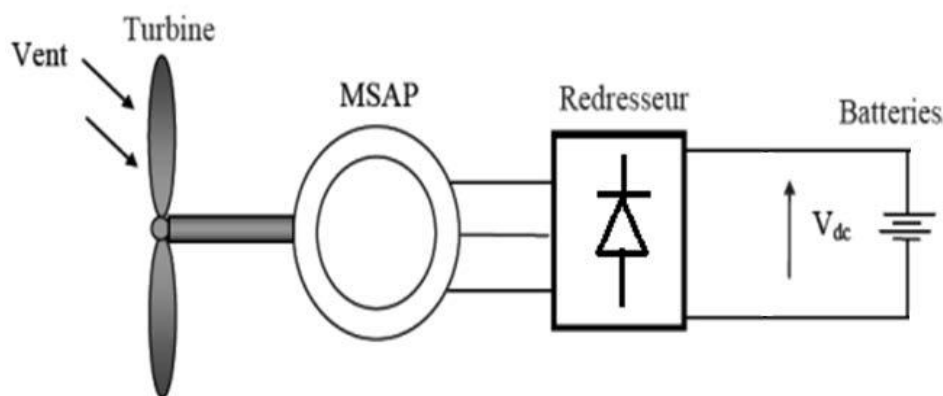


Figure (II.5) chaîne de conversion éolienne [15].

II.3.1. Modélisation de la partie mécanique

II.3.1.1 Modélisation du vent :

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée d'un système de conversion éolienne. Elle est souvent représentée sous forme d'une fonction scalaire temporelle $V = f(t)$. La puissance du vent est définie comme suit [17] :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \dots \dots \dots \text{(II.21)}$$

$$S = \pi R^2 :$$

II.3.1.2. Modélisation de la turbine

L'énergie cinétique est donnée par :

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_v^2 \dots \dots \dots \text{(II.22)}$$

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. Etudions l'éolienne présentée (figure 2.2). D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est :

$$p_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v_v^3 \dots \dots \dots \text{(II.23)}$$

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine. La puissance mécanique de la turbine éolienne est alors :

$$p_{tur} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v_v^3 \dots \dots \dots \text{(II.24)}$$

Le coefficient de puissance (C_p) représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [20, 21] : le dimensionnement de l'angle d'orientation de la pale (β), et du coefficient de vitesse spécifique λ (le ratio de vitesse). Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la pale et la vitesse de vent comme :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{v} \dots \dots \dots \text{(II.25)}$$

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante:

$$C_p(\lambda_i) = C_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - C_3 \times \beta - C_4 \right) \times \exp\left(-\frac{c_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \times \lambda \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{0.08 \times \beta + \lambda} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

Avec :

C1 = 0.5179 ; C2 = 116 ; C3 = 0.4 ; C4 = 5 ; C5 = 21 ; C6 = 0.0068.

Le coefficient de puissance Cp (C opt=0.43) ; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ. (voir chapitre 3) [16]

II.3.2. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice [17].

$$T_t = T_e G \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

$$\Omega_t = \Omega G \dots\dots\dots(\text{II.29})$$

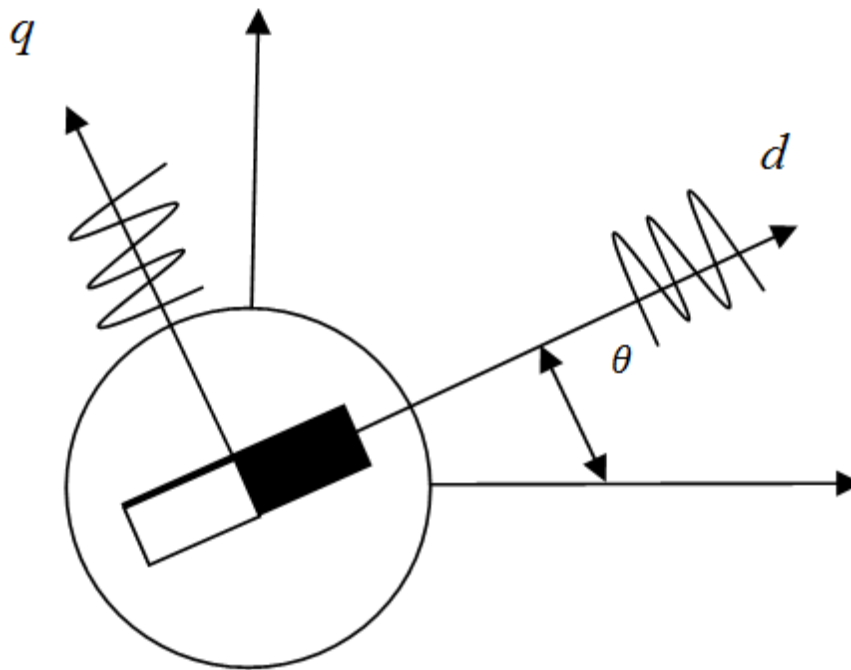
II.3.4. Modélisation de la partie électrique

II.3.4.1. Modèle de la machine synchrone a aimant permanent

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour L'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Une transformation triphasée – biphasé est nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations) [15].

Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices Suivantes:

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires.



Figure(II.6)

Les équations : [18].

$$u_{sd} = -R_S * i_{sd} - l_d \frac{d}{dt} * i_{sd} + \omega r * l_q * i_{sq} \dots \dots \dots (II.30)$$

$$u_{sq} = -R_S * i_{sq} - l_q \frac{d}{dt} * i_{sq} + \omega r * l_d * i_{sd} + \omega r * f_{ie} \dots \dots \dots (II.31)$$

$$C_e = \frac{3}{2} * p [(l_q - l_d) * i_{sq} * i_{sd} + i_{sq} * f_{ie} \dots \dots \dots (II.32)$$

$$C_m - C_e - F\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \dots \dots \dots (II.33)$$

II.3.5 Modélisation des convertisseurs :

Nous verrons donc dans cette partie, le fonctionnement des convertisseurs d'électronique de Puissance. La structure choisie nécessite un redresseur qui a été choisi comme étant un pont de diode triphasé, un onduleur qui permettra de recréer un réseau triphasé. [19]

II.3.5.1. Modélisation du redresseur de tension :

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, commutation instantanée [20].

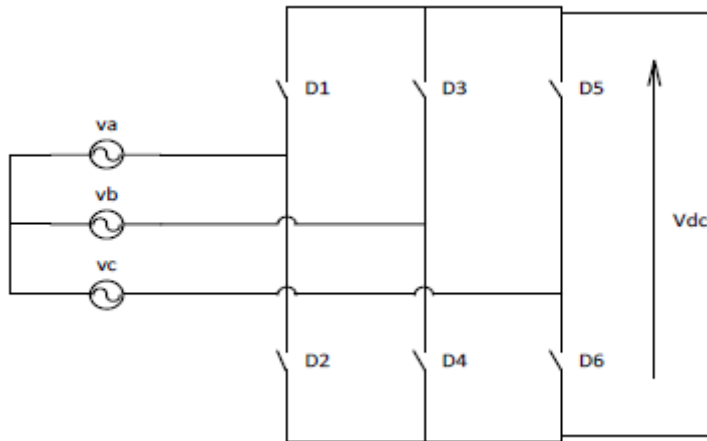


Figure (II.7) : Redresseur triphasé à six diodes

$$D_{ab} = 1 \{ D_1 = \text{est passante} \quad ; D_{ba} = 1 \{ D_3 = \text{est passante} \\ \{ D_4 = \text{est passante} \quad \quad \quad \{ D_5 = \text{est passante} \}$$

$$D_{ac} = 1 \{ D_1 = \text{est passante} \quad ; D_{ca} = 1 \{ D_5 = \text{est passante} \\ \{ D_6 = \text{est passante} \quad \quad \quad \{ D_2 = \text{est passante} \}$$

$$D_{bc} = 1 \{ D_3 = \text{est passante} \quad ; D_{cb} = 1 \{ D_4 = \text{est passante} \\ \{ D_6 = \text{est passante} \quad \quad \quad \{ D_5 = \text{est passante} \}$$

La tension du bus continu est donnée alors par :

$$v_{dc} = D_{ab}(v_a - v_b) + D_{ba}(v_b - v_a) + D_{ca}(v_c - v_a) + D_{ac}(v_a - v_c) + D_{bc}(v_b - v_c) + D_{cb}(v_c - v_b) \dots \dots \dots \text{(II.34)}$$

II. 3.5. 2 Modélisation du l'onduleur de tension :

L'onduleur de tension peut être représenté selon la figure (4), où T_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) sont les interrupteur statique. On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables (s_a, s_b, s_c) en fonction de l'état des commutations dans les trois branches [20]

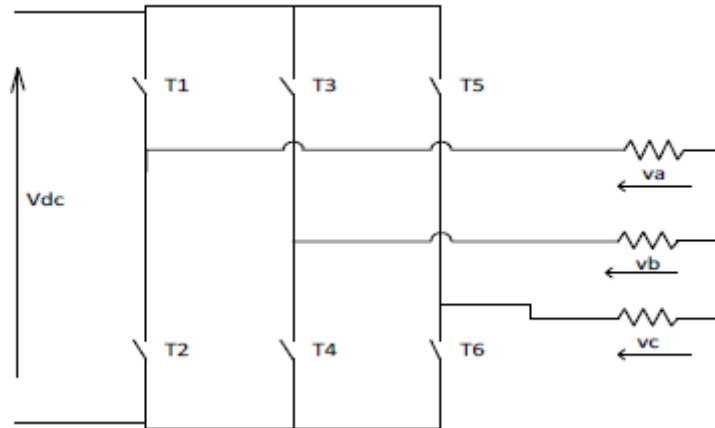


Figure II.8 onduleur

Branche1 :

$s_a = 0$ si $T1$ est en position *off* et $T2$ est à *on*.
 $s_a = 1$ si $T1$ est en position *on* et $T2$ est à *off*.

Branche2 :

$s_b = 0$ si $T3$ est en position *off* et $T4$ est à *on*.
 $s_b = 1$ si $T3$ est en position *on* et $T4$ est à *off*.

Branche 3 :

$s_c = 0$ si $T5$ est en position *off* et $T6$ est à *on*.
 $s_c = 1$ si $T5$ est en position *on* et $T6$ est à *off*.

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

$$v_{a'} = \frac{1}{3} * (u_{ab} - u_{ca}) = \frac{v_{dc}}{3} (2 * s_a - s_b - s_c) \dots \dots \dots (II.35)$$

$$v_{b'} = \frac{1}{3} * (u_{bc} - u_{ab}) = \frac{v_{dc}}{3} (2 * s_b - s_c - s_a) \dots \dots \dots (II.36)$$

$$v_{c'} = \frac{1}{3} * (u_{ca} - u_{bc}) = \frac{v_{dc}}{3} (2 * s_c - s_a - s_b) \dots \dots \dots (II.37)$$

II.6. Modélisation de système de stockage :

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varie de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Il existe plusieurs modèles de la charge de batterie [13]

• **Modèle de CIEMAT :**

Ce modèle est basé sur le schéma électrique du modèle électrochimique de la batterie Celle-ci est alors décrite par deux éléments, une source de tension et une résistance interne R_i dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres (température, et état de charge) [21]

Le modèle mathématique donné par l'équation (II.36), décrivant aux mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge est donné ci-après :

$$u_{bat} = nb * Eb \pm nb * Ri * I_{bat} \dots \dots \dots (II.38)$$

E_b : La force électromotrice, elle est fonction de l'état de charge, de la batterie noté (EDC)

R_i : résistance interne d'une cellule de la batterie, elle est variable en fonction de l'état de charge

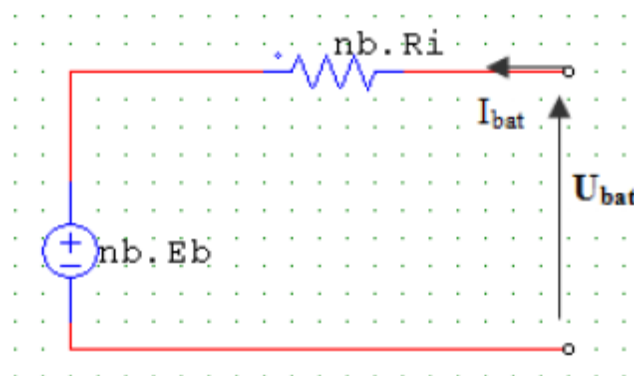


Figure (II.9) : schéma équivalent de la batterie

Equation de modèle CIEMAT :

✓ **La capacité :**

Le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge I_{moy} est donné par l'équation suivante :

$$C_{bat} = C_{10} \frac{1.67}{1+0.67*\left[\frac{I_{moy}}{I_{10}}\right]^{0.9}} + 1 + 0.005\Delta T \dots \dots \dots (II.39)$$

C_{10} : C'est la capacité de la batterie de déchargée 10 heures

I_{10} : Courant de la décharge en 10 heures

ΔT : L'échauffement de la batterie

✓ **L'état de charge :**

La capacité C_{bat} sert de référence pour son évaluation, il est formulé en fonction de la quantité de charge manquant a la batterie 'Qd'

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \dots \dots \dots (II.40)$$

L'évaluation temporelle de Qd dépend du mode de fonctionnement de la batterie

$$Q_d = I_{bat} * t \dots \dots \dots (II.41)$$

Avec t la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat}

On définit aussi l'état de décharge de la batterie (profondeur de décharge),il est complémentaire a l'état de charge

$$EDD = 1 - EDC \dots \dots \dots (II.42)$$

✓ **Resistance de la batterie :**

La résistance interne de la batterie n'est pas une valeur constante, elle varie selon l'état de charge

a. résistance en décharge :

l'equation de la résistance de la batterie pendant la décharge est la suivante :

$$R_d = \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}^{1.3}|} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \dots \dots \dots (II.43)$$

b. résistance en charge :

$$R_c = \frac{1}{c_{10}} \left(\frac{6}{1 + |I_{bat}^{0.86}|} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \dots \dots \dots (II.44)$$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un système hybride autonome (éolien-photovoltaïque) avec batterie de stockage. Une explication des paramètres des cellules photovoltaïques a été donnée. Ainsi la chaîne éolienne (turbine, machine synchrone à aimant permanent) et le convertisseur électronique de puissance (hacheur survolteur, redresseur et onduleur triphasé) ont été présentés.

Chapitre III

*Simulation d'un système hybride autonome éolien-
photovoltaïque*

III.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté la simulation d'un système hybride à l'aide du logiciel matlab sumilink , et voir l'importance de l'influence de la variation de la température et l'ensoleillement sur le bon fonctionnement de chaine photovoltaïque , la procédure a été faite pour la chaine éolienne (influence de la variation de vent et la vitesse de rotation)

III.2 Simulation des panneaux photovoltaïques :

Simuler le comportement de la tension, du courant et de la puissance de sortie du module (MSX-60) pour une intensité d'ensoleillement fixé à 1000 W/m². La température est fixée à 25 c⁰ (à l'aide du matlab script voir l'annexe 1)

III.2.1 Influence de température

➤ **Résultat de la simulation :**

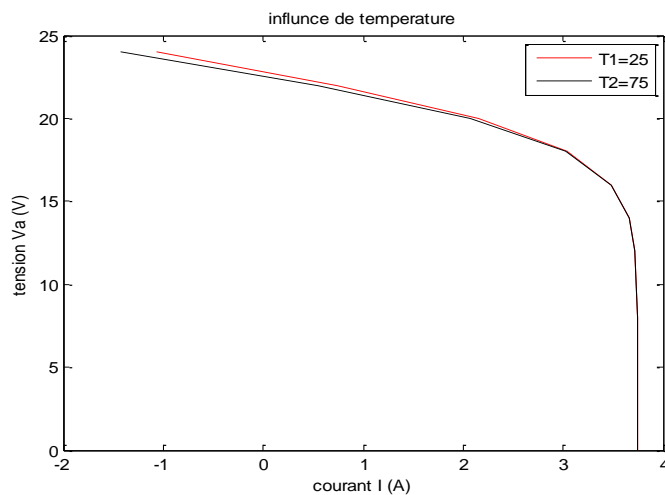


Figure III.1 Courant de tension

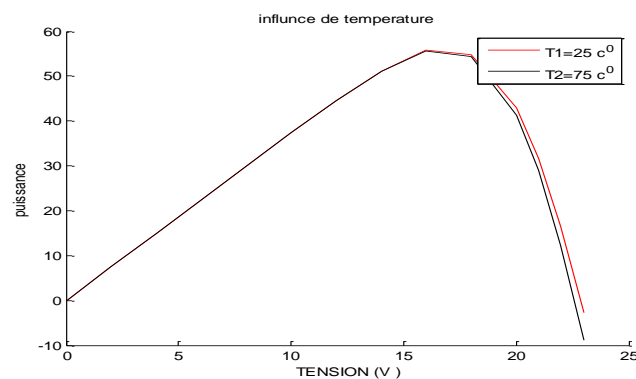


Figure III.2 Tension de puissance

Explication :

Pour la figure (III.1) , les caractéristiques de la tension et du courant V(I) en fonction de température, on remarque pour une grande valeur de la température, le courant atteint une valeur maximale plus grande, mais la tension de cellule est relativement faible.

Nous concluons que le courant et la tension ont une relation directe.

➤ **Résultat de la simulation :**

III.2.2 Influence de l'ensoleillement :

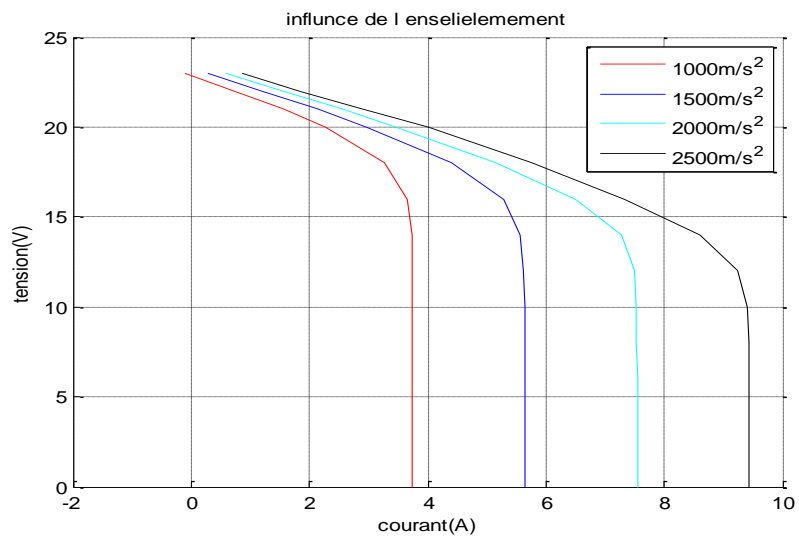


Figure III.3 courant de tension

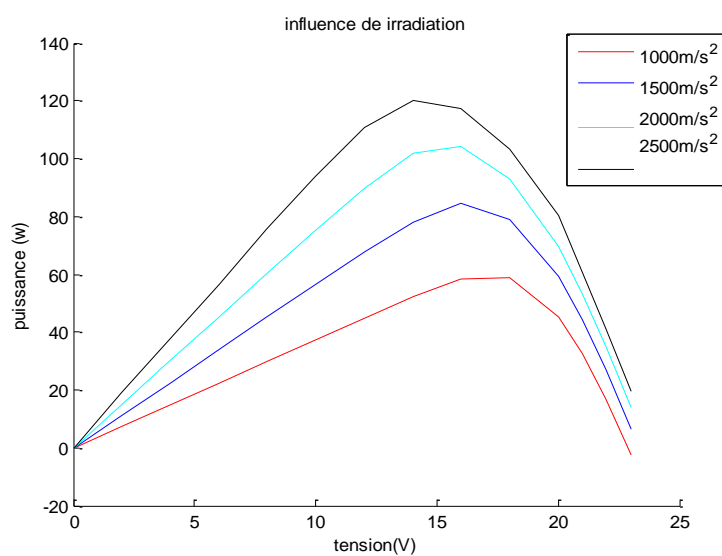


Figure III.4 puissance de tension

Explication :

L'évolution des caractéristiques de tension courant en fonction de l'ensoleillement nous permet de voir la relation proportionnelle l'ensoleillement, quant l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ceci donne un bon rendement. La même chose pour la puissance qui est montrée dans la figure (III.4).

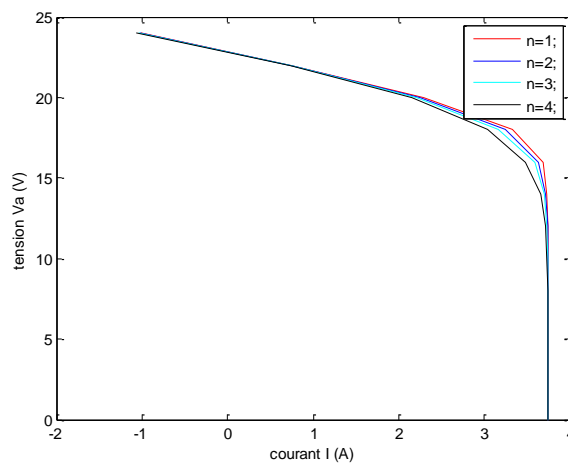
III.2.3. Influence de facteur qualité :**➤ Résultat de simulation :**

Figure III.5 Courant de tension (facteur de qualité variable)

Explication :

Le facteur de qualité varie selon le type et la matière de fabrication de cellule. On remarque d'après le résultat de la figure (III.5), le facteur de qualité est très proche de 1.

III.3.Câblage de système photovoltaïque autonome (avec charge résistive)

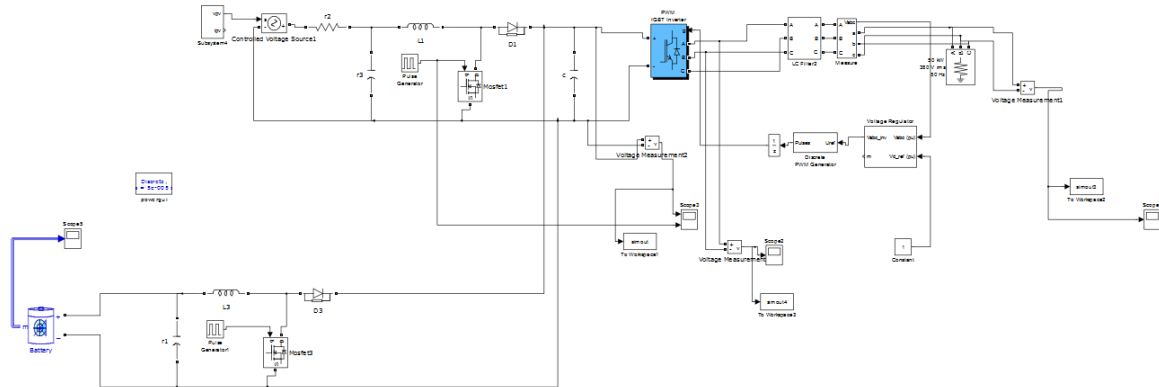


Figure III.6 Système photovoltaïque autonome

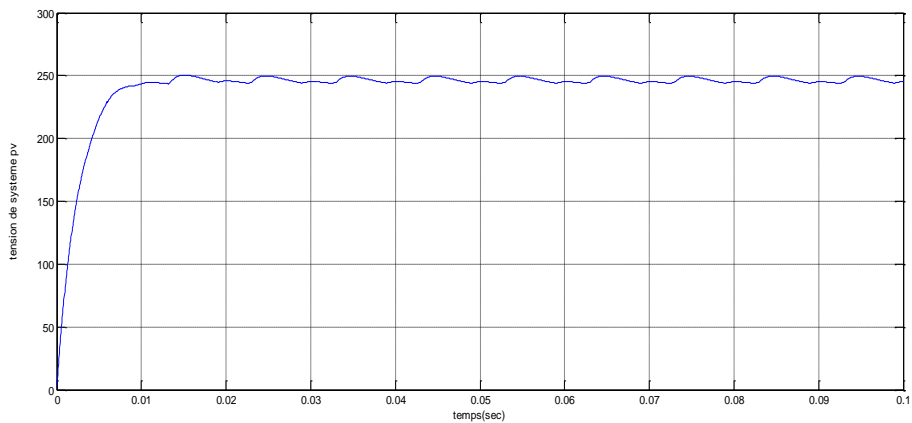


Figure III.7 La tension de sortie de l'hacheur survolteur

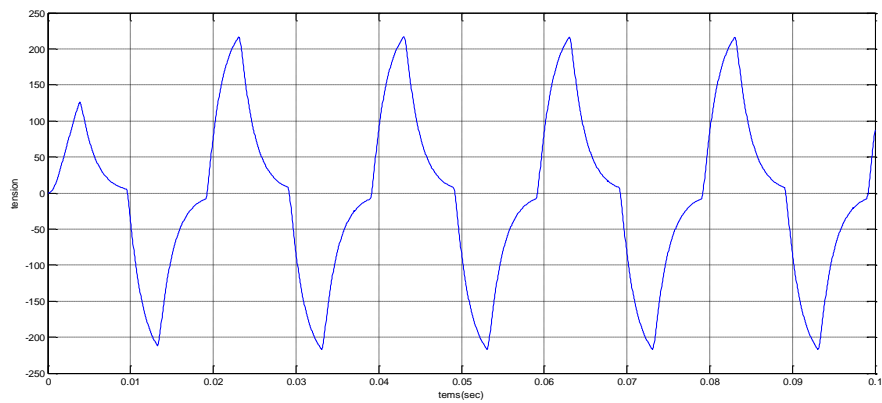


Figure III.8 Tension de sortie en charge résistive

III.4 Simulation de système éolienne

III .4.1 : Simulation de turbine :[11]

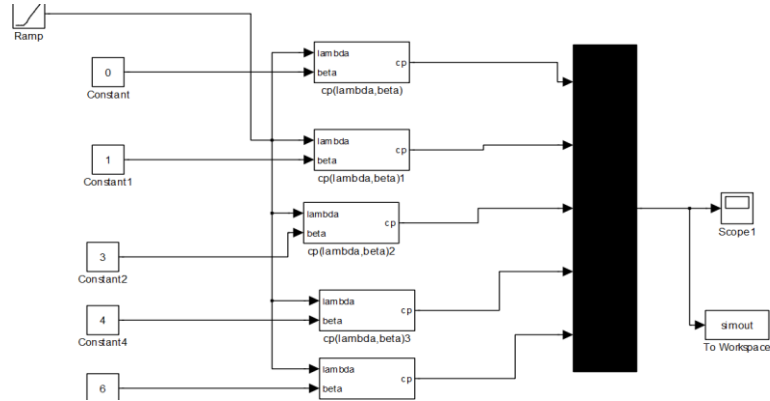


Figure III.9 Schéma bloc de la turbine

➤ **Résultat de simulation :**

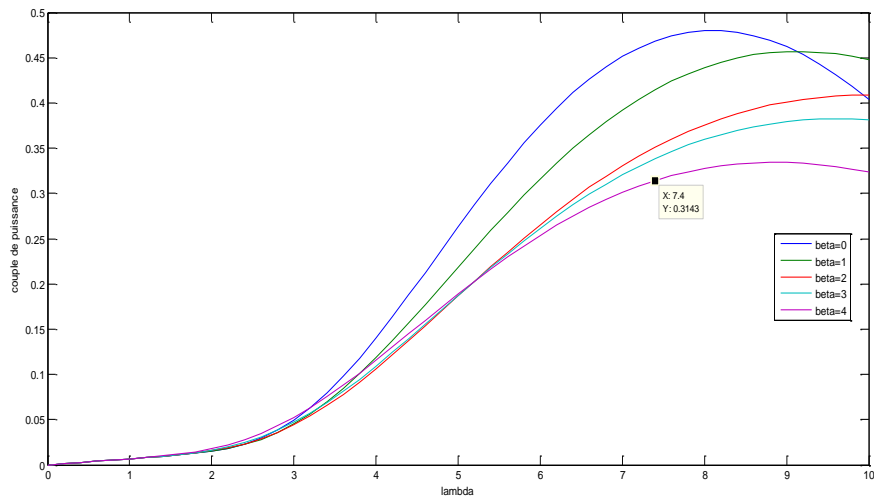


Figure III.10 Coefficient de puissance

Explication :

Pour la figure (III.10) le coefficient de la puissance en fonction de la vitesse spécifique (λ) , on remarque que le coefficient de puissance augmente si la vitesse spécifique est plus grande. Quand on diminue l'angle d'orientation de pale (beta), le coefficient de puissance augmente, exemple :

L'angle (beta= 0),cp=0.46 ;

L'angle (beta =4) ,cp=0.2 ;

Nous concluons que l'angle et cp ont une relation directe.

III.4.2 simulation machine synchrone aiment permanent [18]

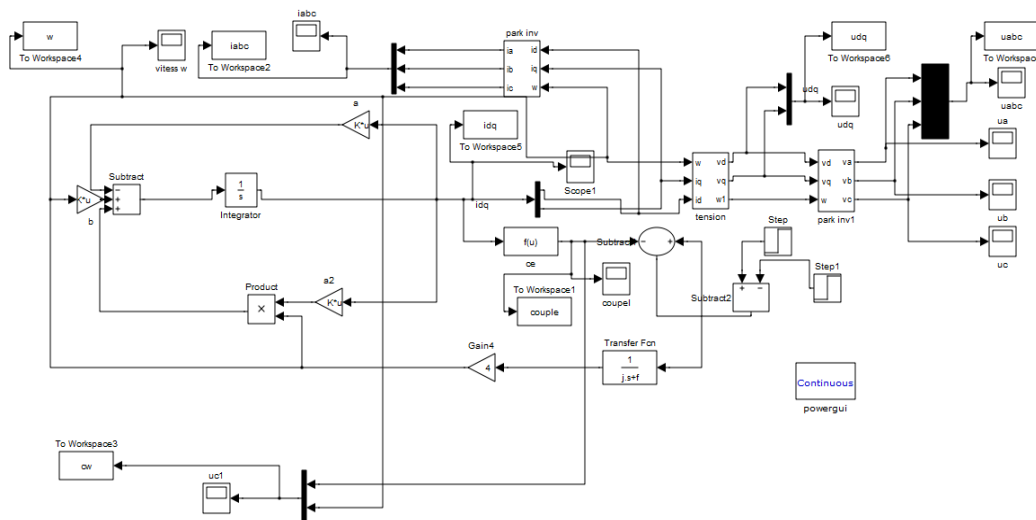


Figure III.11 schéma bloc de la machine synchrone aiment permanent

➤ Résultat de la simulation de la partie mécanique ;

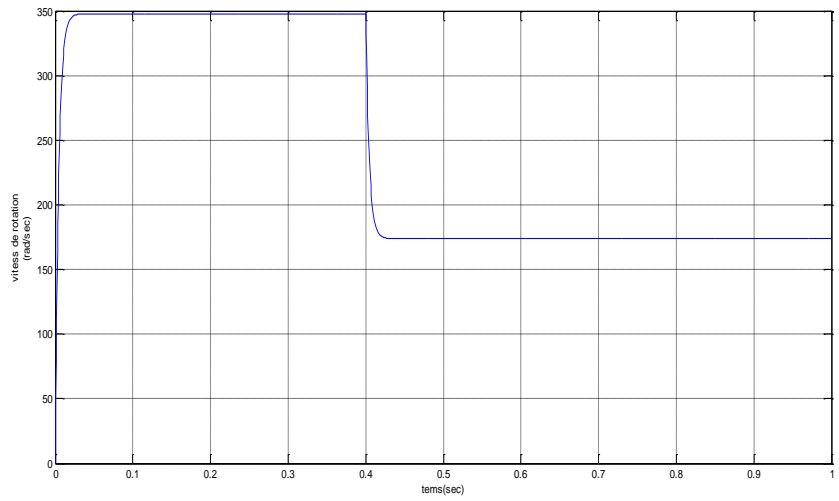


Figure III.12 Vitesse de rotation

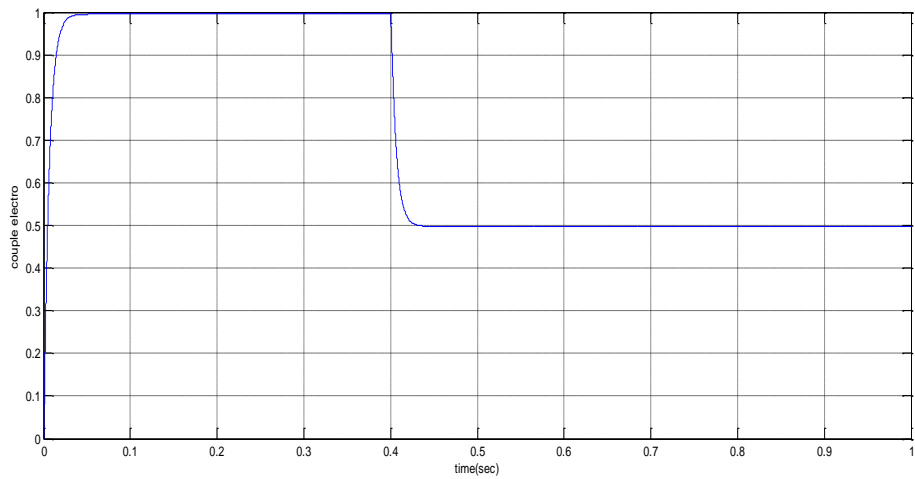


Figure III.13 Couple electro

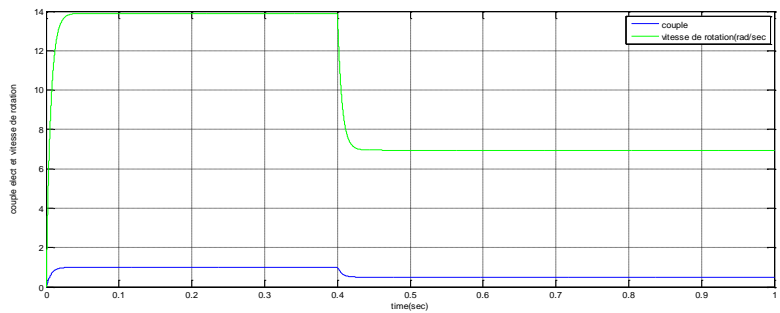


Figure III.14 Vitesse de rotation et couple

➤ **Résulta de la simulation la partie électrique :**

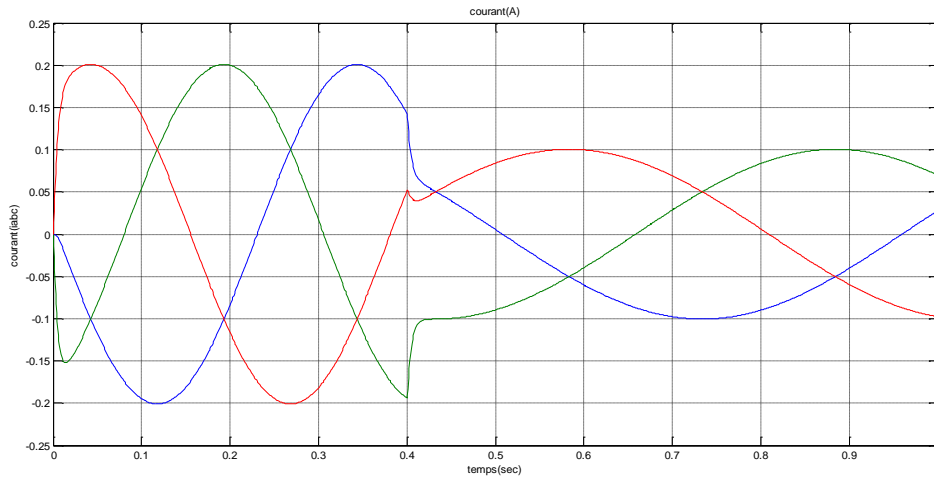


Figure III.15 Courant triphasé (iabc (A))

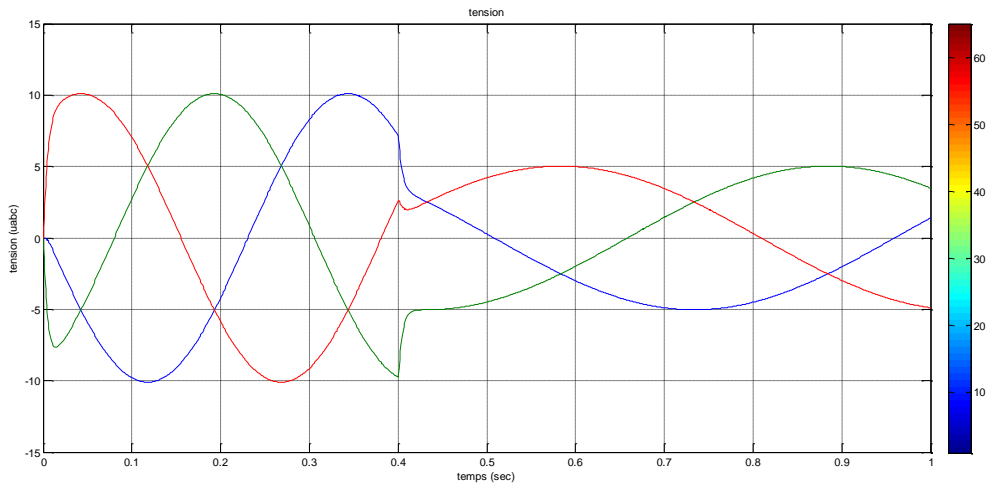


Figure III .16 Tension triphasé (u abc(V))

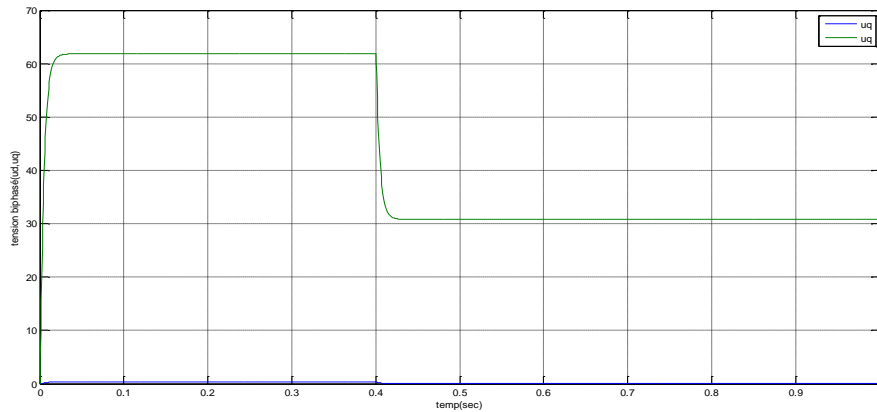


Figure III.17 Tension biphasé (u qd) (pour le repère de Park)

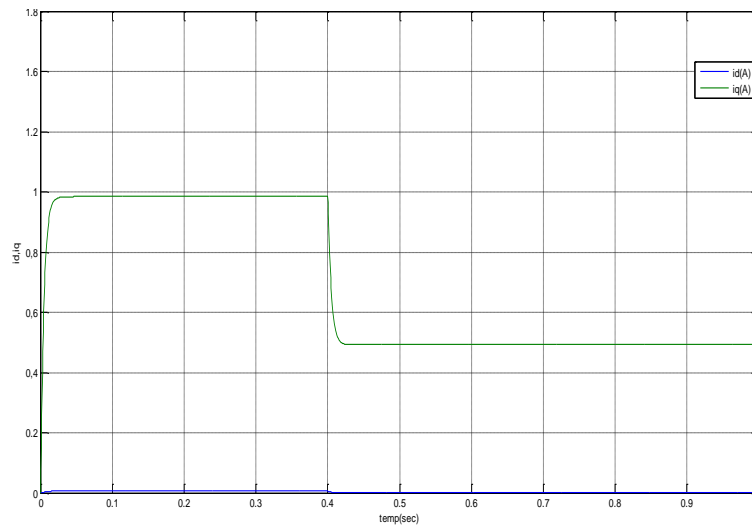


Figure III.18 Courant biphasé (i_{dq}) (repère de Park)

Explication :

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (figure III.11 et III.15). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme ce qui se traduit par de faibles tensions et courants représentés sur les figure(III.8) cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. On diminuant le couple moteur de 6.28N.m à 4.2 N.m, la vitesse mécanique varie de 277 rd/s jusqu'à 185rd/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17V à 51.6V et de 1.54A à 1.03A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

III.5.Câblage de système éolienne autonome (avec charge résistive)

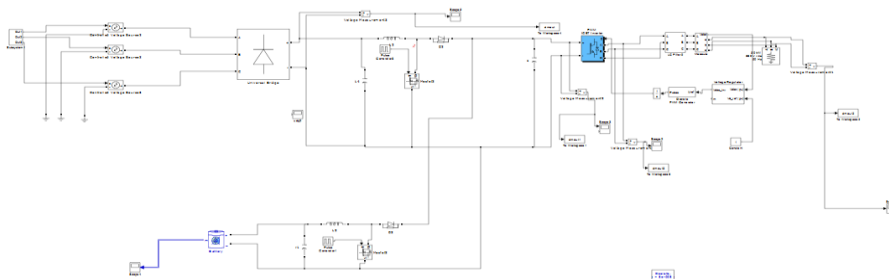


Figure III.19 Schéma block de système éolien autonome

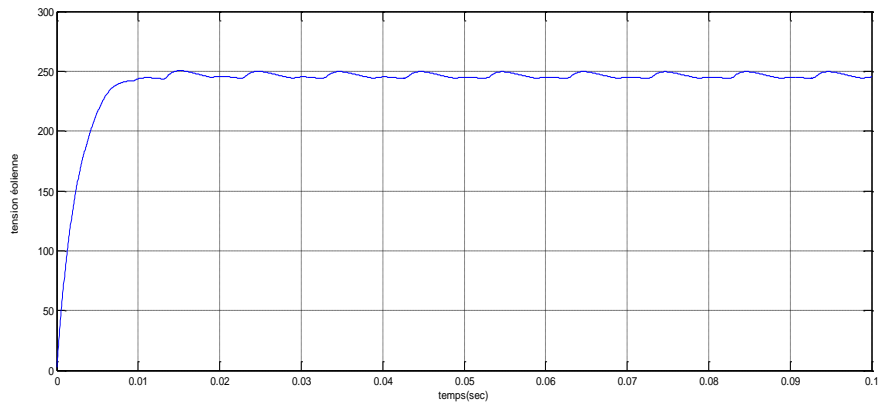


Figure III.20 La sortie de l'hacheur

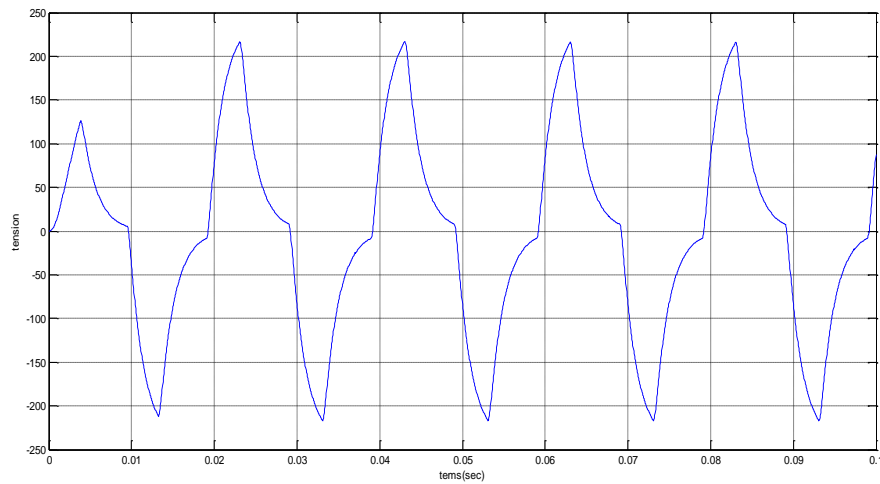


Figure III.21 Tension de sortie de la charge résistive

III.6 câblage de système hybride autonome (éolienne _ photovoltaïque)

Le schéma Matlab/Simulink de la figure (III.22) représente le système global éolien photovoltaïque avec stockage.

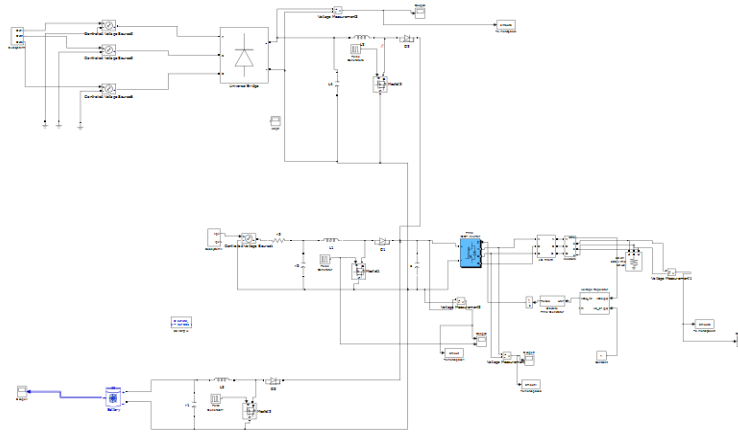


Figure III.22 schéma block de système hybride

➤ **Resultat de simulation :**

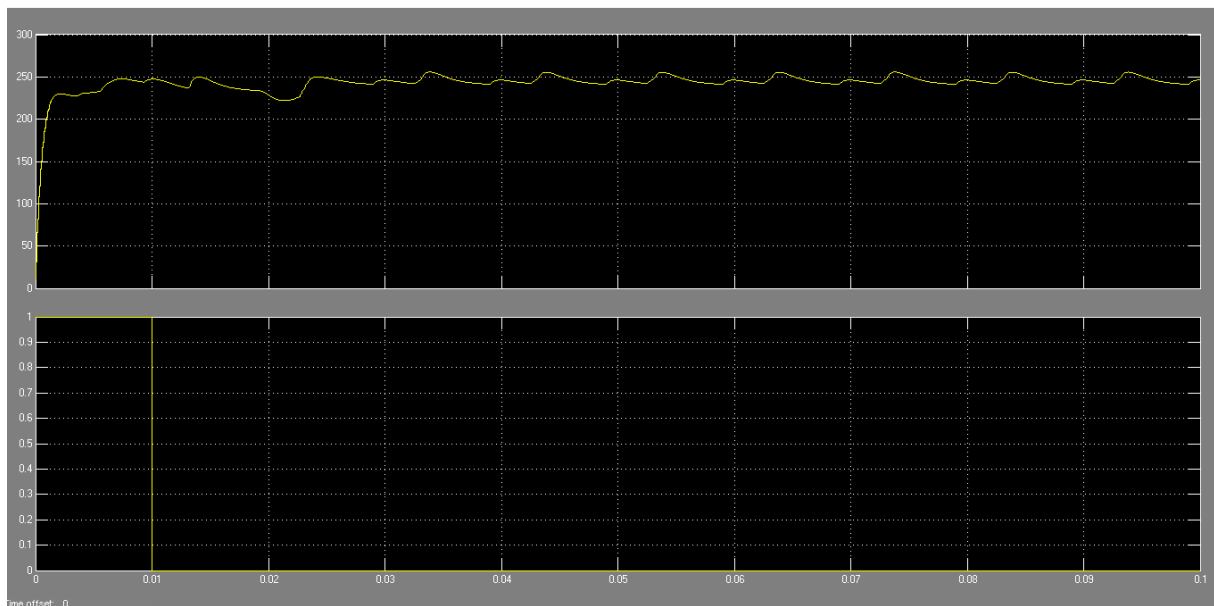


Figure III.23 bus continu

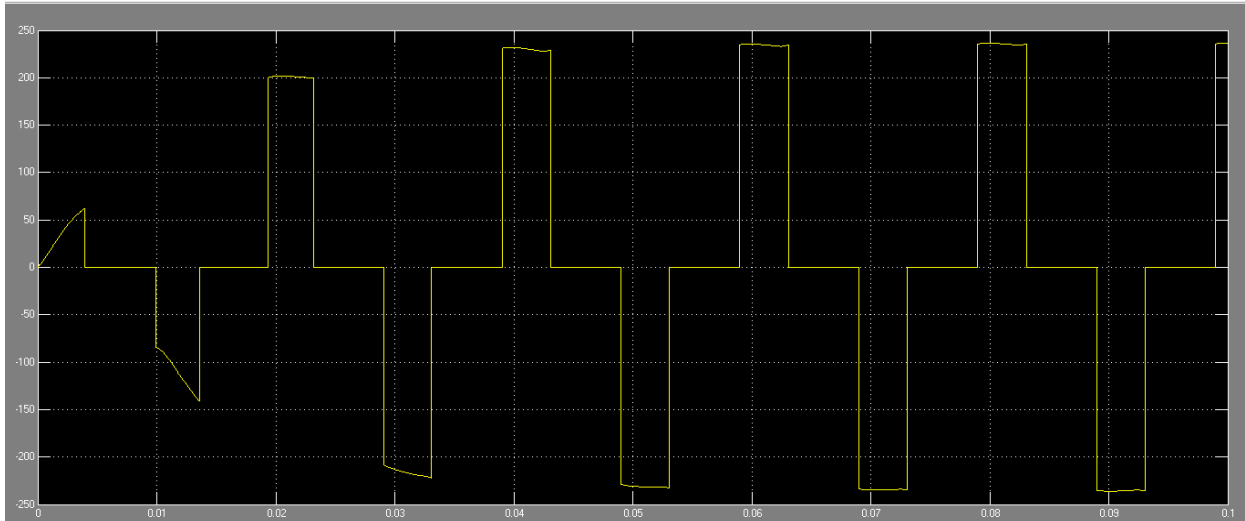


Figure III.24 Tension de sortie l'onduleur

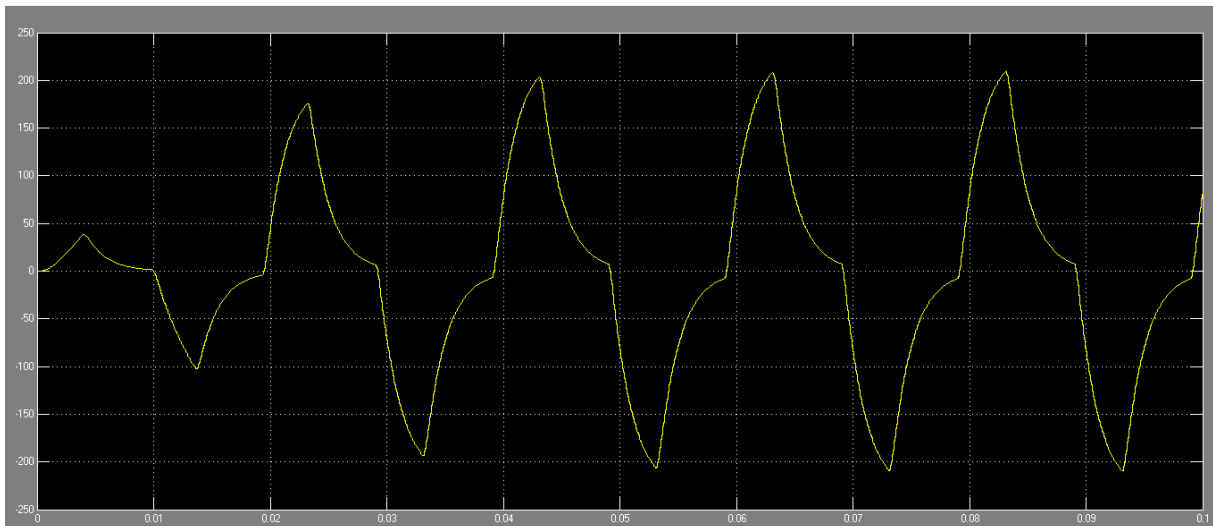


Figure III.25 Tension de sortie de charge résistive

Explication :

À partir des résultats de la simulation du système hybride autonome montré dans la figure précédente (III.22), nous observons la sortie de la tension augmente du bus continu (0 0,001) et (0,00 1 0,1). La stabilité de la tension et après la transformation de la tension continue à une tension alternative de l'onduleur montrés dans la figure (III. 24) on observe le signal de la tension sinusoïdale augmentée à 220 V.

III.7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation de système hybride indépendant et les résultats de chaque générateur avec stockage, concluant que les changements naturels tels que le vent et le soleil sont d'une grande importance pour l'amélioration du rendement et de la production d'énergie électrique.

Conclusion générale

Le système hybride autonome est une solution idéale pour l'alimentation en énergie électrique des régions peu peuplées et riches en énergie renouvelable (ensoleillement et vent).

Dans ce mémoire ; nous avons vu les typologies de configurations et les classifications d'un système hybride d'une façon générale, le principe fonctionnement de chaque générateur : éolien et photovoltaïque et enfin, définir les convertisseurs et les éléments de stockage.

On a aussi présenté la modélisation mathématique et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque ainsi que la modélisation de partie mécanique (turbine) et la partie électrique de générateur éolien et les équipements de puissance (redresseur, onduleur, hacheur survolteur).

La dernière partie a été consacrée à la simulation (matlab / simulink), de système hybride autonome. L'influence de la température et l'ensoleillement de la cellule photovoltaïque ainsi que l'influence de vent et vitesse de rotation de générateur éolien ont été bien étudiée.

Perspectives :

Pour un développement futur on souhaite :

- 1- Réaliser un prototype hybride.
- 2- Appliquer des différentes stratégies de commande (**MPPT**...).
- 3- Faire des applications avec convertisseur **DC/DC** pour le moteur à courant continu et convertisseur **DC/AC** pour le moteur à courant alternatif.
- 4- Le commander à distance grâce à un réseau de capteur sans fil.

Bibliographie

- [1] Borni Abdelhalim; << Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique>> Soutenu le 12 / 03 / 2015 ; thèse doctorat science en électrotechnique
- [2] Abdoul Karim Traoré <<Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour application agricoles>> Juillet 2016, mémoire présenté a l'université du Québec a trois –rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique
- [3] Jacques Duval << systèmes d'énergie hybrides solaire pv >> asprom-paris 24-25november 2010
- [4] [http://www.sdmo.com/FR/telecoms-solution-4.html\(19/11/2018](http://www.sdmo.com/FR/telecoms-solution-4.html(19/11/2018) a 21 :15)
- [5] Ludmil Stoyanov <<Etude de différentes structures de systèmes Hybrides à sources d'énergie renouvelable>>le 28 octobre 2011 Thèse préparée en cotutelle et soutenue pour l'obtention du grade de Docteur en énergétique mention : Energétique et Docteur de L'université technique de Sofia Mention : Electrotechnique, Electronique et Automatique
- [6] David Blaise TSUANYO <<Approches technico-économiques d'optimisation des systèmes énergétiques décentralisés: cas des systèmes hybrides PV/Diesel>> université de perpignan via domitia Soutenu le 17 juin 2015
- [7] M. SADAoui Elias et MEDDOURI Mustapha<<Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque-Eolien)>> Université Abderrahmane Mira – Bejaia Promotion 2012
- [8] Mr. MAHAMMEDI Abdellatif<< étude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque >> université Ferhat Abbas-Sétif 1 UFAS (Algérie) Soutenu 15/12/2014
- [9] Mr. FELLAH Boumediene<< Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah>> soutenu en octobre 2012 devant la commission d'examen université Abdou –Baker Belkaid et Tlemcen
- [10] Belhadj Mohammed << Analyse et Conception d'un Système autonome de captage solaire hybride (photovoltaïque/thermique) à Concentration>> l'Université Tahri Mohammed, Béchar Soutenu le -- / --/ 2017

- [11] Baghdadi Fazia << Modélisation et simulation des Performance d'une installation hybride de conversion d'énergie renouvelables>>Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU Soutenu le : 26 /09 /2011
- [12] Bounaceur Amin <<Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie>> Université Kasdi Merbah Ouargla soutenue le 07 / 06 / 2015
- [13] HASSINI née BELGHITRI HOUDA << Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque >> Unité de recherches matériaux et énergies renouvelables soutenue 2010
- [14] Sébastien Poulin Dessureault Jérémie Bédard << étude et réalisation d'un système hybride d'alimentation domestique autonome en énergie>> université du Qeubec
- [15] ZIGHA ALI << Etude et simulation d'un système hybride photovoltaïque – éolien>> Promotion 2013/2014 universite Constantine I,
- [16] MAKHLOUF Zineb << Contrôle de Puissances d'une Génératrice dans une Chaîne de Production d'Énergie Eolienne>> universite badji mokhtar annaba année 2018
- [17] MEZZAI Sonia ; TADJINE Katia << Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) Promotion Juin 2015 Université Abderrahmane Mira-Bejaia
- [18] Rachid abdessemed,déplômé de l'école polytechnique de kiev est professeur a l'université de batna ,ou il dirige de laboratoire de recherche en électronique (leb)et travaille sur la conception et le contrôle des machine électrique ,la fiabilité et les énergies renouvelables]<<modélisation et simulation des machines électriques>>
- [19] Ivan Kravtsoff. Optimisation d'un système hybride de génération d'énergie électrique permettant de minimiser la consommation et l'empreinte environnementale.. Autre. Supélec , 2015. Français.
<NNT : 2015SUPL0015>. HAL Id: <tel-01331563>
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01331563> Submitted on 14 Jun 2016
- [20] Mr. Bencherif bilal #1,Pr. Benalla hocine *2<< Modélisation et Simulation d'une Chaîne de Conversion Eolienne>> université mentouri de Constantine Algérie faculté des science de l'ingénieur département d'électronique
- [21] Mazouz Karim << étude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque>> université Abderrahmane mira Bejaia

ANNEXE

ANNEXE 1 : programme script en matlab de la simulation de cellule pv

```
Va = [0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24];
Suns = [1];
TaC = [0];
A = 2;
n=2;
Vg= 1.12;
Ns=36;
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
T1=25+273;
VocT1 = 21.06/Ns;
IscT1 = 3.80;
T2=75+273;
VocT2= 17.05/Ns;
IscT2 = 3.92;
TaK = 273+TaC ;
% declaration
K0 = (IscT2-IscT1)/(T2-T1);
ILT1= IscT1*Suns;
IL=ILT1+K0.*(TaK-T1);
I0T1=IscT1/(exp((q*VocT1)/(n*k*T1))-1); % courant
I0=I0T1*(TaK/T1).^(3/n).*exp(-q*Vg/(n*k)).*((1./TaK)-(1/T1)) % courant
Xv= I0T1*q/(n*k*T1)*exp(q*VocT1/(n*k*T1));
dVdIVoc = -1.15/Ns;
Rs = -dVdIVoc - 1/Xv;
VtTa = n*k*TaK/q ;
Vc= Va/36;
ILT2= IscT2*Suns;
IL1=ILT2+K0.*(TaK-T2);
I0T2=IscT2/(exp((q*VocT2)/(n*k*T2))-1);
I01=I0T2*(TaK/T2).^(3/n).*exp(-q*Vg/(n*k)).*((1./TaK)-(1/T2));
Xv1= I0T2*q/(n*k*T2)*exp(q*VocT2/(n*k*T2));
Rs1 = -dVdIVoc - 1/Xv1
Ia=zeros(size(Vc));
Ia1=zeros(size(Vc));
% pas=0.001;
for j=1:5
Ia = Ia - ((IL-Ia-I0.*(exp((Vc+Ia.*Rs)./VtTa)-1))./(-1-
(I0.*Rs.*(exp((Vc+Ia.*Rs)./VtTa))./VtTa)))
Ia1= Ia1 - ((IL1-Ia1-I01.*(exp((Vc+Ia1.*Rs1)./VtTa)-1))./(-1-
(I01.*Rs1.*(exp((Vc+Ia1.*Rs1)./VtTa))./VtTa)))
% Vc= Vc+pas
end
% hold on;
figure(1)
plot(Ia,Va,'r',Ia1,Va,'k')
xlabel(' courant I (A) ');
ylabel(' tension Va (V) ');
title('influence de temperature') [ Sébastien Poulin Dessureault Jérémie Bédard<<
étude et réalisation d'un système hybride d'alimentation domestique autonome en énergie>>
université du Québec]
```

ANNEXE 2 : parameter de module pv Mx60[14] :

Typical peak power(pp)	60w
Voltage peak power (vpp)	17.1v
Current peak power(ipp)	3.5A
Short-circuit current (Isc)	3.8 A
Open-circuit voltage(Vco)	21.1v
Temperature coefficient of open_circuit voltage $-(80+-10)mv/c$	$-(80+-10)mv/c$
Temperature coefficient of short –circuit current $(0.0065+-0.015)\%/c$	$(0.0065+-0.015)\%/c$
NOCT	49C

ANNEX 3 : Parameter de la machine synchrone a aiment permanent [18]

R_s	0.895
L_d	0.012
L_q	0.0211
j	0.00141
f	0.001
p	3
φf	0.9
R_{ch}	50
L_{ch}	0.002
A1	$[(R_s+R_{ch})/(L_d+L_{ch}),0 ;0,(R_s+R_{ch})/(l_q+l_{ch})]$;
A2	$[0,(l_q+l_{ch})/(l_q+l_{ch}) ;-(l_d+l_{ch})/(l_q+l_{ch}),0]$;
B	$[0 ;fif/(l_q+l_{ch})]$;

Annexe 3 : paramètre de la turbine

LAMBDA	8.1
BETA 1	0
BETA 2	3
BETA 3	2
BETA 4	4
C1	0.5176
C2	116
C3	0.4
C4	5
C5	21
C6	0.0068
PUISSANCE	5 KW