

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'Ingéniorat

Département : Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

Etude d'une Station de Pompage

Présentés Par:

- DJEBBARI Mohamed Islam
- HRARTIA Choukri

Encadrant : KSENTINI Abdelhamid

Grade : MCB

Université : UBMA

### Jury de Soutenance:

MESBAH Tarek	MCA	UBMA	Président
KSENTINI Abdelhamid	MCB	UBMA	Encadrant
ABDERREZEK Abdallah	Pr	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020



**Université Badji Mokhtar- Annaba**



**Faculté des sciences de l'ingénierie**

**Département d'Electrotechnique**

**PROJET DE FIN D'ETUDE**

**En vue de l'obtention du Diplôme Master En Electrotechnique.**

**Option : Réseaux Electriques**

**THEME :**

**Etude d'une station de pompage**

**Présentés par :**

**Djebbari Mohamed Islam & Hrantia Choukri**

**Encadré par :**

**M<sup>r</sup>. Ksentini Abdelhamid**

**Résumé :**

L'utilisation du photovoltaïque dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coût élevé. Dans le but d'augmenter le rendement de ces systèmes. Une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge permet de diminuer le coût de l'installation. Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil. Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

**Mots clés :** Panneaux photovoltaïque, Energie solaire, Modélisation, Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Pompe centrifug



Université Badji Mokhtar- Annaba



Faculté des sciences de l'ingénierat

Département d'Electrotechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDE**

En vue de l'obtention du Diplôme Master En Electrotechnique.

Option : Réseaux Electriques

**THEME :**

**Etude d'une station de pompage**

Présentées par :

Djebbari Mohamed Islam & Hrantia Choukri

Encadré par

M<sup>r</sup> : Ksentini Abdelhamid

**ملخص :**

يعد استخدام الطاقة الشمسية في مواقع معزولة لتطبيقات مختلفة ، مثل ضخ المياه ، من الإهتمامات الرئيسية للأشخاص في البلدان النامية الذين يحصلون على مياه آمنة للشرب. لكن المولدات الكهروضوئية لها عيبان رئيسيان هما العائد المنخفض والضريبة عالية. من أجل زيادة أداء هذه الأنظمة. التكيف السليم بين المولد الشمسي والحمل يقلل من تكلفة التركيب. يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بالنمذجة والمحاكاة والتحجيم وتحقيق نظام الضخ الكهروضوئي الذي يعمل بالشمس. يتكون هذا النظام من مجموعة من العناصر المتفاعلة ؛ وهي الألواح الكهروضوئية ، ومحول التيار الكهربائي ، والمحرك غير المتزامن ، ومضخة الطرد المركزي ، والدائرة الهيدروليكية.

**كلمات البحث:** الألواح الضوئية ، الطاقة الشمسية ، النمذجة ، المحاكاة ، الحد الأقصى لتتبع نقطة القدرة، مضخة الطرد المركزي.

## *DÉDICACE*

Je tiens à dédier ce mémoire : A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limites.

- A mes chères frères Tarek et Khalil et ma chère sœur Nour.
- A mes grands-pères et mes grand-mères.
- A toute ma famille ...
- A tous mes chers amis ...
- A notre encadreur Dr. Ksentini Abdelhamid qui nous a

soutenu pendant tout le long de notre travail.

➤ A mon chère Ami et binôme Choukri pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passé ensemble.

- A toute la promotion d'Electrotechnique - 2020 ...
- A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail ...

*Mohamed...*

# Dédicace

*Je Dédie Ce Modeste Travail*

- *A Ma Mère, Source Du Plus Grand Soutien, Pour Bonté, Et La Précieuse Tendresse, Je Te Témoigne Respectueusement Ma Reconnaissance, Mon Amour Et Ma Gratitude Pour Tout Ce Que Tu As Fait Pour Moi Depuis La Naissance.  
Merci A Vous Et Que Dieu Vous Accorde Une Longue Vie.*
- *A Mes Sœurs : Asma, Malak.*
- *A Mes Grands Peres.*
- *A tout la faïlle.*
- *A Mes Amis : Radja, Rania, Hamza, Aïment.*
- *A Mon Binôme : DJEBARI MOHAMED EL ISLAM*
- *A Tous Qui Cognaient Choukri.*

# REMERCIEMENTS

*Avant tout, nous tenons tout d'abord à remercier notre Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En Second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur, pour sa présence et son pragmatisme exemplaire qui a donné un véritable sens à notre travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du **jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs à qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.*

*Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui n'ont pas été citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.*

*Merci à tous et à toutes*

<b>Sommaire.</b>		
Résumé		I
Dédicace		III
Remerciement		V
Introduction général		1
<b>Chapitre I</b>		
I.1	Introduction.	03
I.2	Définition de l'énergie	04
I.2.1	Les source d'énergies	04
I.2.2	Energie primaire	05
I.2.3	Energie secondaire	05
I.2.4	Energie final	05
I.2.5	Energie utile	06
I.3	Les sources d'énergies renouvelables.	
I.3.1	Energie éolienne	06
I.3.1.2	Comment ça March	07
I.3.1.3	La quantité d'électricité produit une éolienne	
I.3.1.4	Classification des turbines éoliennes	08
I.3.1.5	Les avantage et les inconvénients de l'énergie éolienne	10
I.3.2	L'Energie hydraulique	11
I.3.2.1	Définition	11
I.3.2.2	Les avantage et les inconvénients de l'énergie hydraulique.	12
I.3.3	La biomasse	13
I.3.3.1	Définition	13
I.3.3.2	Les avantage et les inconvénients de l'énergie biomasse	14
I.3.4	Energie des mers	14
I.3.4.1	Définition	15
I.3.4.2	Les avantage et les inconvénients de l'énergie de mers	15
I.3.5.1	Energie géométrique	16
I.3.5.2	Les avantage et les inconvénients de l'énergie géométrique	16
I.3.6.1	Energie solaire	17
I.3.6.2	Les avantages de l'énergies solaire	17
I.4	Conclusion	18
<b>Chapitre II</b>		
II.1	Introduction	19
II.1.1	L'Energie solaire thermique	19
II.1.2	Utilisation de l'Energie solaire thermique	20
II.2	Energie solaire photovoltaïque	20
II.2.1	Rayonnement solaire	20
II.2.2	Spectre du rayonnement	22
II.3	Les déférant systèmes autonomes	22
II.3.1	Les systèmes autonomes avec stockage	22
II.3.1.1	Les systèmes autonomes sans stockages	23
II.3.2	Système photovoltaïque couple au réseau	23

II.4	Les systèmes de pompage photovoltaïque	24
II.4.1	Le générateur photovoltaïque	25
II.4.1.1	Fabrication des cellules solaires	25
II.4.1.2	Les types des cellules photovoltaïque	26
II.5	Liaison des cellules photovoltaïque	29
II.5.1	Groupement en série	29
II.5.2	Groupement en parallèle	30
II.5.3	Groupement en mixte	31
II.6	Le groupe motopompe	33
II.6.1	Classification selon la conception de la pompe	33
II.6.2	Caractéristique couple au débitent fonction de la vitesse	34
II.6.3	Classification selon les types de moteur	35
II.6.3.1	Moteur à courant continu	35
II.6.3.2	Moteur a courant alternatif	36
II.6.4.1	Les moteurs synchrones	36
II.6.4.2	Les moteurs asynchrones	36
II.6.5	Les convertisseurs DC-DC	37
II.6.5.1	Convertisseur Buck	38
II.6.5.2	Convertisseur boost	38
II.6.5.3	Convertisseur Buck-boost	38
II.6.6	Les onduleurs	39
II.7	Commande MMPT	39
II.7.1	Introduction	39
II.7.2.1	Principe de la commande de MPPT	40
II.7.3.	Différent commande de MPPT	40
II.7.3.1	Commande perturbe & observe	40
II.7.3.2	Méthode de perturbation et commande	40
II.8	Conclusion	42
Chapitre III		
III.1	Introduction.	44
III.2	Description du système à étudier	44
III.3	Modélisations du système photovoltaïque	45
III.3.1	Cellule photovoltaïque idéal	45
III.3.2	Cellule photovoltaïque réel	46
III.3.3	Caractéristique d'un module	47
III.3.4	Caractéristique $I_{pv}$ ( $V_{pv}$ ) et $P_{pv}$ ( $V_{pv}$ ) dans des condition STC	48
III.3.5	Influence De L'ensoleillement Sur Les Caractéristique de module photovoltaïque	49
III.3.6	Influence de la température sur la caractéristique du module photovoltaïque	50
III.4	Modélisation des convertisseurs statiques	51
III.4.1	Modélisation de l'hacheur élévateur (boost)	51
III.4.2	Modélisation mathématique du convertisseur Buck-boost	52
III.4.3	Modélisation de l'onduleur de tension a MLI	53
III.5	Principe de fonctionnement de MPPT	56
III.6	Modelé dynamique du moteur asynchrone	58

III.7	Modelé de la pompe centrifuge	59
III.8	Conclusion	61
<b>Chapitre IV</b>		
IV	Résultat du simulation	62
Conclusion générale		
	Références	

## *Liste des figures*

<i>N°</i>	<i>Figures</i>	<i>Page</i>
	<b>Chapitre I : Les Energies Renouvelables.</b>	01
I.1	Energies Renouvelables	02
I.2	Les Différentes Energies Renouvelables	02
I.3	Eolienne	03
I.4	Eolienne A Axe Horizontal	04
I.5	Eolienne A Axe Vertical	04
I.6	Energie Hydraulique	05
I.7	Perte De L'hydraulique Dans La Production Mondial D'électricité	05
I.8	Bilan De Cycle Biomasse	06
I.9	Energie Marine	
I.10	Energie Géothermie	06
I.11	Energie Solaire	06
	<b>Chapitre II : Energie photovoltaïque.</b>	08
II.1	Types De Rayonnement Solaire Reçus Au Sol	08
II.2	Intensité De L'ensoleillement	09
II.3	Diagramme D'une Installation Photovoltaïque Autonome Avec Stockage	10
II.4	Diagramme D'une Installation Photovoltaïque Autonome Sans Stockage	11
II.5	Système PV Couplés Aux Réseaux	11
II.6	Schéma Général D'un Système De Pompage Photovoltaïque	11
II.7	Enchaînement Des Etapes De Fabrication D'un Module Photovoltaïque Au Silicium Cristallin	12
II.8	Cellule Au Silicium Monocristallin	13
II.9	Cellules Poly Cristallines	13
II.10	Silicium Amorphe	15
II.11	Association Des Modules En Série	17
II.12	Caractéristique Résultante D'un Groupement En Série De Ns Cellules Identiques	18
II.13	Association Des Modules En Parallèle	18
II.14	Caractéristique Résultante D'un Groupement En Parallèle De Ns Cellules Identiques	18
II.15	Association Mixte Des Modules	19
II.16	Caractéristique Résultante D'un Groupement Mixte	22
II.17	Classification Des Pompes	22
II.18	Schéma D'une Pompe Centrifuge	22
II.19	Schéma D'une Pompe Volumétrique	22
II.20	Caractéristiques D'une Pompe Volumétrique	23
II.21	Moteur A Courant Continu	24
II.22	Moteur Synchrone	25
II.23	Moteur Asynchrone	26
II.24	Symbole D'un Convertisseur DC-DC	27
II.25	Schéma De Bas D'un Convertisseur Buck	27

II.26	Hacheur Parallèle	28
II.27	Convertisseur Buck-Boost	28
II.28	Conversion DC / AC	29
II.29	Caractéristique Ppv (Vpv) D'un Panneau Solaire	29
II.30	L'algorithme De La Méthode De Perturbation Et D'observation	
	<b>Chapitre III : Modélisations et commande du système pompage.</b>	31
III.1	Schéma Descriptif De Système De Pompage Photovoltaïque	32
III.2	Schéma D'une Cellule Photovoltaïque Idéale	33
III.3	Schéma D'une Cellule Photovoltaïque Réelle	36
III.4	Exemple De Caractéristique Courant-Tension D'un Module PV	37
III.5	Influence De L'ensoleillement Sur La Caractéristique Ipv (Vpv)	39
III.6	Influence De L'ensoleillement Sur La Caractéristique Ppv (Vpv)	40
III.7	Influence De La Température Sur La Caractéristique Ipv (Vpv)	40
III.8	Influence De La Température Sur La Caractéristique Ppv (Vpv)	42
III.9	Circuit Electrique Du Convertisseur DC-DC (Boost)	42
III.10	Circuit Electrique Du Convertisseur DC-DC (Buck-Boost)	43
III.11	Circuit Electrique De L'onduleur	43
III.12	La Caractéristique I-V	44
III.13	Chaîne Élémentaire De Conversion Photovoltaïque	45
III.14	Recherche Et Recouvrement Du Point Puissance Maximale (A) Suite A Une Variation D'éclairement, (B) Suite A Une Variation De Charge, (C) Suite A Une Variation De Température	45
III.15	Représentation Schématique De La Machine.	47
	<b>Chapitre IV : Résultats de Simulation.</b>	47
IV.1	Système Photovoltaïque Pompage D'eau	49
IV.2	Caractéristique (Puissance- Tension)	49
IV.3	Caractéristique Courante Tension	52
IV.4	Caractéristique Puissance Tension	52
IV.5	L'évolution De Courant De Sortie Par Rapport Au Temps	52
IV.6	L'évolution De Tension De Sortie Par Rapport Au Temps	53
IV.7	L'évolution De Puissance Par Rapport Au Temps	53
IV.8	La Caractéristique De Tension Avant Et Après L'utilisation De Convertisseur DC/DC	54
IV.9	Schéma Bloc De L'onduleur Triphasé	55
IV.10	Tension Simple De Phase « A » Générées Par L'onduleur MLI	55
IV.11	Blocs De Simulation Du Moteur Asynchrone Sous Matlab/Simulink	56
IV.12	Les Courants Triphasés Statoriques	57
IV.13	Les Courants Triphasés Statoriques	57
IV.14	La Caractéristique De Vitesse Rotorique Par Rapport Au Temps	58

# **Introduction générale**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter.

Par ailleurs, 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 de sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse.

A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu : il faut souvent la stocker et parfois la transformer.

### **Problématique des sites isolés en Algérie et solutions possibles**

Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel (groupe électrogène) est la source principale d'énergie électrique. Pour ces régions, le carburant est généralement plus cher car il faut prévoir des coûts de transport additionnels vers ces endroits isolés, parfois difficilement accessibles. C'est pourquoi l'utilisation des sources d'énergies renouvelables comme GPV, est appelée à jouer un rôle Essentiel permettant d'optimiser les systèmes de production d'électricité :

- Assurant une protection de l'environnement notamment en éliminer les émissions de CO<sub>2</sub>.
- Améliorant le rendement.

-Diversifiant la sécurité d'approvisionnement, sachant que la source solaire est gratuite et inépuisable.

**Objectif d'un système pompage photovoltaïque en l'Algérie [2]**

Le réseau Algérien se compose d'un réseau interconnecté au nord et de plusieurs réseaux isolés construits autour des parcs de production à base de groupes diesel au sud. Le parc de production diesel est réparti à travers le sud du pays sur plus de 22 sites, sachant que ce système de production a généré un grand taux de mission de l'effet de serre CO<sub>2</sub> et surtout une grande consommation de fuel. Pour l'année 2015, le rapport prévoit une baisse des émissions de carbone de 0.6% par rapport à 2014. « En cette période de négociation d'un nouveau régime climatique lors de la Conférence mondiale sur le réchauffement climatique (COP21) devant freiner les émissions de carbone de 40 à 70% d'ici 2050 et de 100% d'ici 2100. C'est dans cet objectif que s'insère mon mémoire avec l'utilisation du système de pompage photovoltaïque pour éliminer le taux CO<sub>2</sub> généré par les groupes diesels dans les sites isolés.

# *Chapitre I : Les Energies Renouvelables*

## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issue directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants, liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émission de CO<sub>2</sub>, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles.



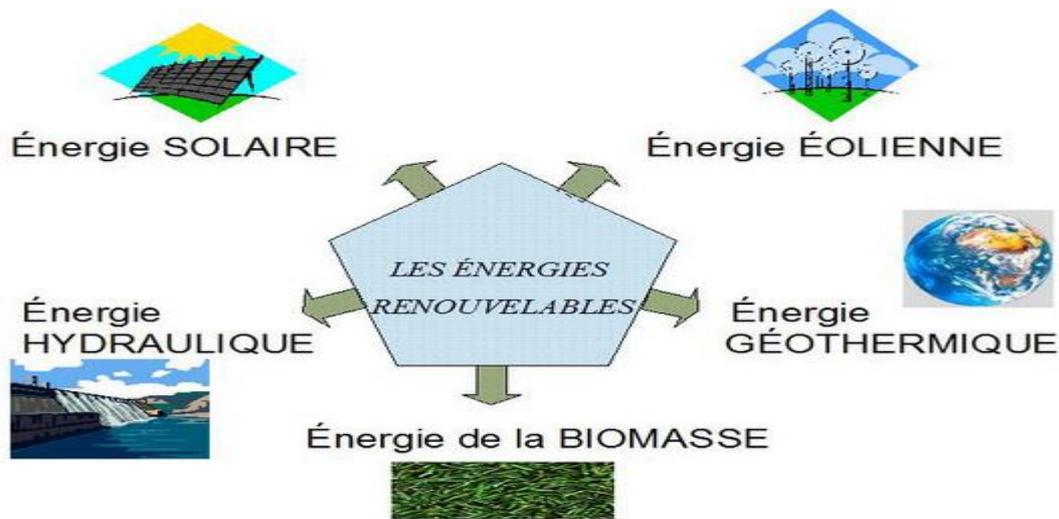
*Figure I.1 : Energies Renouvelables.*

Les principales énergies renouvelables sont :

- La puissance hydraulique
- L'énergie biomasse
- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie géothermique
- L'énergie de la mer

Les différentes sortes d'exploitation :

- Le vent (les éoliennes)
- Le soleil (les panneaux photovoltaïques et les panneaux solaires)
- L'eau (l'hydraulique)
- La végétation (la biomasse)



*Figure I.2 : Les Différentes Energies Renouvelables.*

## I.2- Définition de l'énergie [3]

L'énergie (du grec : force en action) est ce qui permet d'agir : sans elle, rien ne se passe, pas de mouvement, pas de lumière, pas de vie !

Au sens physique, l'énergie caractérise la capacité à modifier un état, à produire un travail entraînant du mouvement, ou générant un rayonnement électromagnétique, de la lumière, par exemple - ou de la chaleur. Toute action ou changement d'état nécessite que de l'énergie soit échangée. Elle est obtenue par la combustion de carburants ou de combustibles (pétrole, essence, gazole, fioul, gaz, charbon, bois, etc...), par l'utilisation de l'électricité ou de forces naturelles comme le vent ou l'énergie solaire. L'énergie peut donc se présenter sous plusieurs formes qui peuvent se transformer ; par exemple, production d'électricité à partir du gaz, de pétrole ou de charbon dans une centrale thermique, ou le chauffage d'une maison à partir d'électricité ou de fioul domestique. Dans le système international, l'énergie s'exprime en joules, mais dans le langage courant, elle s'exprime plus souvent en kilowattheure (kWh). Quant à la tonne d'équivalent pétrole<sup>1</sup> (tep), elle permet généralement aux spécialistes et aux économistes de comparer les différentes sources d'énergie entre elles. Il existe en fait de nombreuses formes d'énergie. Ainsi, l'énergie cinétique, par exemple, est une forme d'énergie liée au mouvement d'un corps. Elle est proportionnelle au carré de sa vitesse. La combustion, quant à elle, permet de récupérer l'énergie potentielle chimique contenue dans un combustible. Les panneaux solaires captent l'énergie lumineuse pour la transformer en énergie électrique.

**I.2.1- Les sources d'énergie**

Les énergies sont également parfois classées en fonction de leur source. On peut parler des énergies fossiles - tirées du charbon ou du pétrole, par exemple -, de l'énergie nucléaire - qui provient de réactions nucléaires -, ou encore des énergies renouvelables, qui sont naturellement régénérées comme l'énergie solaire ou l'énergie éolienne. Sur terre, nous disposons d'une multitude d'agent énergétique de qualité différente. On entend par le terme 'agent énergétique' toute les sources d'énergie primaire qui peuvent être utilisé pour satisfaire les besoins du consommateur. Parmi ces agents énergétiques, on distingue les énergies renouvelables des énergies non renouvelables. Nous verrons plus tard dans ce cours la signification plus approfondies de ces deux termes. Avant d'aller plus loin, il me semble utile d'expliquer certain terme pour éviter toute confusion.

**I.2.2- Energie primaire :[4]**

Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être utilisable et transportable facilement. Il s'agit donc d'une énergie que l'on prélève de l'environnement physique naturel (sol, atmosphère, espace). Ce sont par exemple le pétrole, le charbon, le gaz naturel, le bois, le fioul, l'uranium, l'eau, le soleil, le vent, la biomasse etc.

**I.2.3- Energie secondaire :[5]**

Il s'agit de l'énergie qui provient de la transformation d'énergie primaire. Cette énergie est souvent plus facile à stocker, transporter et utiliser que les sources d'énergie primaire. Ce processus est nécessaire pour pouvoir utiliser l'énergie dans les machines et les installations. C'est pour cette raison que les formes d'énergie secondaire sont appelées « vecteurs énergétiques » ; c'est le cas notamment de l'électricité avant le transport, des carburants pétroliers raffinés (essence, gasoil) ou encore, à l'avenir, de l'hydrogène.

Lors de la transformation, il y a toujours une part d'énergie qui se dégrade et qui n'est pas utilisé. On l'appelle la perte énergétique.

**I.2.4- Energie finale :**

L'énergie finale est l'ensemble des énergies délivrées prêtes à l'emploi à l'utilisateur  
Final : le litre d'essence sans plomb à mettre dans sa voiture, l'électricité disponible à sa prise, etc. De par la diversité de ses usages, l'énergie finale adopte de multiples formes : énergie électrique, énergie thermique, énergie mécanique... Cette énergie finale n'est qu'une fraction de

l'énergie primaire initiale, une fois que celle-ci a été transformée en énergie secondaire, stockée, transportée et enfin distribuée au consommateur final. Ce sont par exemple le gaz naturel à l'entrée dans la chaudière, l'énergie électrique mesurée par le compteur électrique, Etc.

Dans un circuit court, par exemple un chauffe-eau solaire individuel, la quantité d'énergie finale est plus proche de celle de l'énergie primaire.

### **I.2.5- Energie utile :[5]**

Il s'agit de l'énergie finale transformée chez le consommateur. Celle-ci lui permet de satisfaire ses besoins. Par exemple la température du salon, le niveau d'éclairage, etc.... Différents scénarios basés sur l'efficacité énergétique et les données socio-économiques sont ensuite établis afin de prévoir l'évolution de la demande à moyen et long terme et d'estimer les besoins en énergie des consommateurs.

## **I.3- Les sources d'énergie renouvelable.**

### **I.3.1- Energie éolienne.[6]**

- **Définition**

L'énergie éolienne est l'énergie produite par les vents. Elle est fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité.

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production en tout lieu capée sur les places. Elle entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique produite par l'éolienne. La production dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

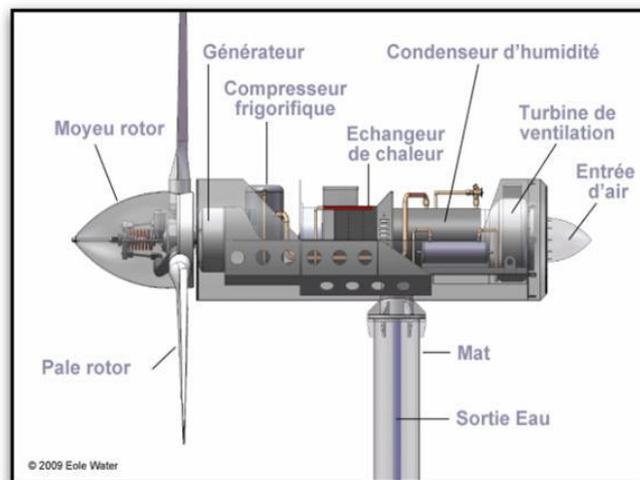
*Figure.I.3 : Eolienne.*



### I.3.1.2- comment ça marche : [7]

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est composée des principaux éléments suivants :

1. un mât, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts ;



*Figure.I.4 : Le dispositif mécanique.[7]*

2. une nacelle, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;

3. le rotor, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice.

4. Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque

ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison. Il y est élevé à une tension supérieure (20 000 V) afin d'être injecté sur le réseau national.

### **I.3.1.3- La quantité d'électricité produit une éolienne :**

Une éolienne d'une puissance de 2 Mégawatts produit annuellement environ 4.400 Mégawatheures.

### **I.3.1.4 Classification des turbines éoliennes : [8]**

Les moteurs éoliens utilisés pour capter l'énergie du vent peuvent être classés en deux catégories distinctes :

A-1) Les machines à axe horizontal :

- Rotor avec pâles.
- Transmission mécanique avec arbre plus boîte de vitesse.
- Génératrice.
- Nacelle qui supporte le rotor.
- Système d'orientation.
- Mât qui rapporte la nacelle.
- L'axe du générateur.
- Les machines à vent classiques.
- Les éoliennes lentes.
- Les éoliennes rapides.



*Figure.I.5 : Eolienne A Axe Horizontal.*

- Les machines à axe vertical :
  - Les machines à traînées différentielles.
  - Les machines à écran.
  - Les machines à clapets battants.
  - Les machines à pales tournantes.
  - Les machines à variations cycliques d'incidences, à aubes fixes et aubes mobile.



*Figure.I.6 : Eolienne A Axe Vertical.*

**I.3.1.5. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.****• Avantage**

- 1/ L'énergie éolienne préserve les sources hydriques.
- 2/ L'énergie éolienne est compatible avec d'autres utilisations des terres et peut servir de stimulus au développement de l'économie rurale.
- 3/ L'énergie éolienne ne produit pas d'émissions nocives d'origine hydrique ni de déchets solides toxiques.
- 4/ L'énergie éolienne est entièrement renouvelable, hautement fiable et très efficace.
- 5/ L'énergie éolienne est l'une des sources les plus économiques de nouvelle production d'électricité à grande échelle.
- 6/L'énergie éolienne compense pour les émissions d'autres sources d'énergie, ce qui réduit notre rapport aux changements climatique mondiaux.

**• Inconvénients**

- 1/ Comme la plupart des aménagements réalisés par l'homme, les éoliennes contribuent à la modification des paysages.
- 2/ Nombreuse étude sont nécessaires avant de pouvoir réaliser un projet.
- 3/ Certaines éoliennes émettent des nuisances sonores, mais les nouvelles générations sont peu bruyantes.
- 4/ Les éoliennes peuvent avoir des impacts sur le milieu naturel (les oiseaux, flores, faunes sauvage...)
- 5/ L'énergie produite par les parcs éoliens ne peut être stockée. Elle nécessite un raccordement au réseau électrique, ce qui peut poser problème.
- 6/ La production d'une éolienne est variable.
- 7/ Les travaux d'installation d'un parc éolien nécessitent des démarches spécifiques pour le transporter le montage.
- 8/ Le raccordement pose quelquefois des problèmes : l'isolement des parcs éoliens le rend souvent coûteux (longueur de ligne à enterrer) et il est tributaire de travaux de renforcement du réseau de distribution en cas de besoin.
- 9/ Si la production d'une éolienne est variable, elle est prévisible, ce qui est très avantageux. Il peut arriver, que certains jour les éoliennes ne tournent pas.
- 10/ Lorsque la production dépasse la consommation le stockage est encore déficèle.

### I.3.2- L'énergie hydraulique [9]

#### I.3.2.1. Définitions

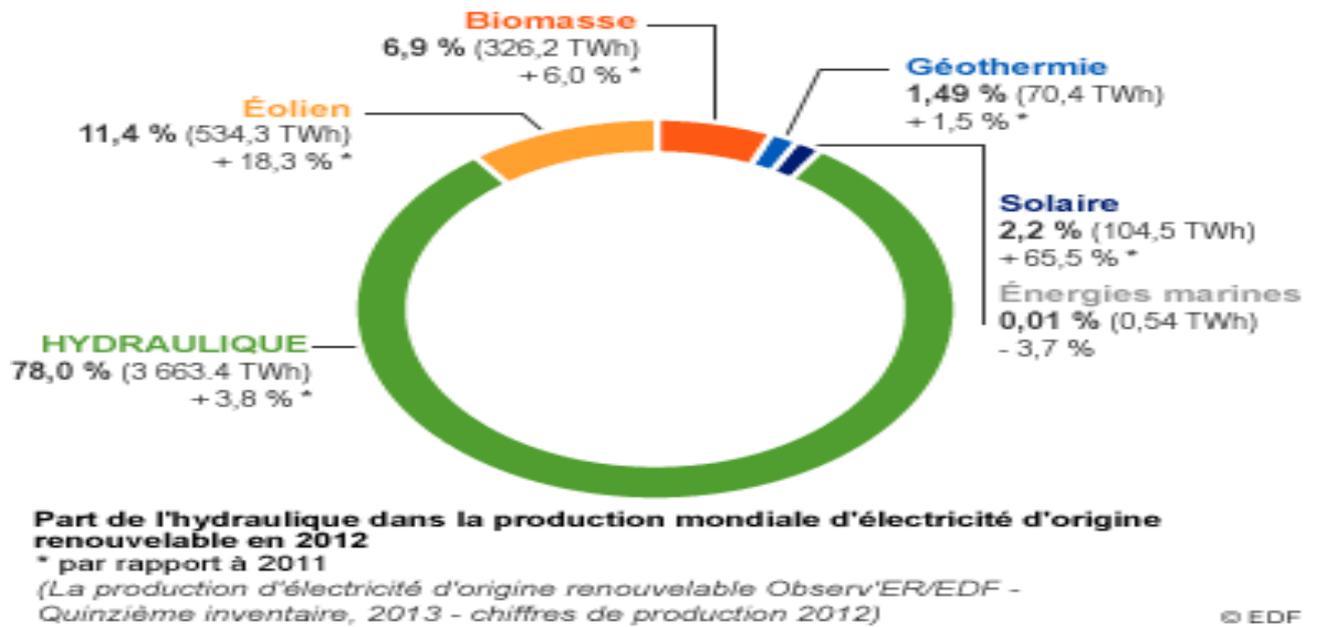
L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.



*Figure.I.7 : Energie Hydraulique.*

La production mondiale d'électricité en **2012** a représenté un total de **22 613 Th** dont la majeure partie est issue de la thermique à flamme essentiellement du fait du développement industriel de pays tels que la Chine qui dispose de grandes réserves de charbon. L'hydraulique est la **2ème** source d'énergie. Parmi les énergies renouvelables, l'hydraulique occupe la 1ère place.

L'hydroélectricité constitue la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (**16,3 % en 2011**) derrière le charbon (**40,6%**) et le gaz (**22,2%**).



**Figure.I.8 : Perte De L'hydraulique Dans La Production Mondiale D'électricité.[10]**

### I.3.2.2. Les avantages et les inconvénients de l'énergie d'hydraulique.

- **Les avantages**

- 1/ Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante).
- 2/ C'est une énergie propre et inépuisable sans émission de fumées et pollution, et qu'est le moins chère car retour d'investissement est très rapide.
- 3/ La gestion des cours d'eau permet le contrôle des crues.
- 4/ En période de sécheresse, on lâche de l'eau.
- 5/ En période d'inondation, on retient le sur plus d'eau.

- **Les inconvénients**

- 1/ Les plus gros barrages peuvent noyer des surfaces très importantes, pouvant comprendre des zones d'habitation (déplacement de population). Ils peuvent mettre en péril les écosystèmes locaux (faune et flore).
- 2/ Les barrages peuvent s'ensaver car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous les éléments charriés par les cours d'eau.
- 3/ Le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peut provoquer des dégâts considérables en aval du barrage (raz-de-marée).

### I.3.3- La biomasse [11]

#### I.3.3.1. Définition

On appelle les énergies biomasse tous les matériaux d'origine biologique employés comme combustible pour la production de chaleur, d'électricité, de gaz et de carburants. Le bois, le biogaz et les biocarburants (ou agro carburants) sont les principales énergies biomasse. Toutes ces énergies sont renouvelables, émettent moins de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère à l'utilisation et permette, quand cela est possibles, l'exploitation des ressources locales.

Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le Boisset les biocarburants. La biomasse peut produire de l'énergie par combustion dans une chaudière.

Elle peut aussi produire par méthanisation du biogaz, qui sera converti en énergie. Des procédés permettent aussi la production de biocarburants à partir de colza ou de betteraves (diester, méthanol...).

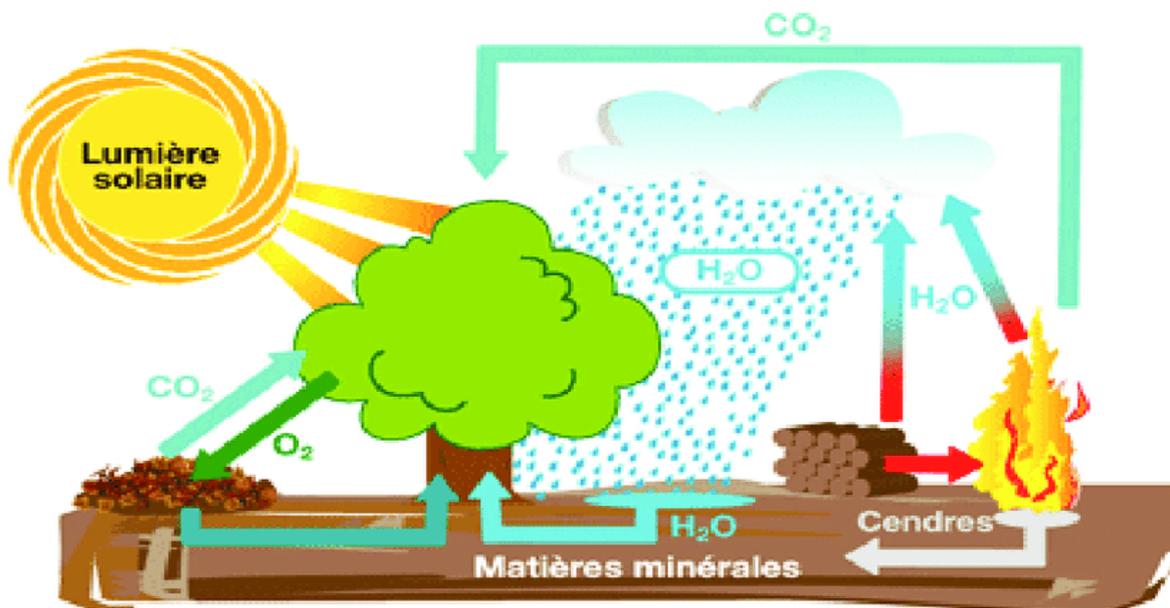


Figure.I.9 : Bilan De Cycle Biomasse.[12]

**I.3.3.2. Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse.****• Les avantages**

- 1/ C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- 2/ Biodégradable rapidement.
- 3/ Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- 4/ La biomasse est disponible partout.
- 5/ La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables.
- 6/ Elle dégage autant de CO<sub>2</sub> qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO<sub>2</sub> lors de la photosynthèse).
- 7/ La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

**• Les inconvénients**

- 1/ Leur rendement énergétique est assez faible.
- 2/ Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- 3/ Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- 4/ Provoque la pollution des eaux et des sols.

Les couts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

**I.3.4- L'énergie des mers ou énergie marine [13]****I.3.4.1. Définition**

La filière des énergies marines appelées aussi des océans ou thalasso-énergies, comprend le développement des technologies et la maîtrise et l'exploitation des flux d'énergie naturelle fournie par les mers et les océans. On recense : la houle des vagues, l'énergie des courants, l'énergie des marées et l'énergie thermique des mers (ETM) qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des profondeurs. L'hydroélectricité marine fait appel à des techniques connues : usine marémotrice de la rance (barrage marémoteur) ou en pleine expérimentation : houlà générateurs (systèmes à colonne d'eau axillante, système à déferlement), hydrolienne (hélices sous-marines ou éoliennes sous-marines), ailes planes battantes oscillantes, roues à aubes flottantes .....



*Figure.I.10 : Energie Marine.*

#### **I.3.4.2. Les avantages et les inconvénients de l'énergie marine.**

- **Les avantages**

- 1/ Les hydroliennes ne sont pas polluantes, c'est une énergie renouvelable.
- 2/ C'est une énergie constante et fiable et inépuisable.
- 3/ Les hydroliennes sont plus petites et moins visibles que les éoliennes, de plus elles ne font pas de bruit.
- 4/ Les courants marins sont relativement constants et leurs variations sont facilement prévisibles.

- **Les inconvénients**

- 1/ Les hydroliennes créent des zones de turbulences, ainsi elles empêchent la sédimentation de s'effectuer correctement et les végétaux ne peuvent pas développer.
- 2/ Des animaux marins peuvent se heurter aux hélices. De plus, la création de zones de turbulences peut empêcher le développement de la flore.
- 3/ Le cout de production est élevé.
- 4/ Difficultés d'accès.

#### **I.3.5. L'énergie géométrique [14]**

##### **I.3.5.1. Définition**

L'énergie géothermique, c'est la chaleur stockée au-dessous de la surface du sol. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Ce que l'on appelle géothermie, c'est l'utilisation de cette chaleur. La chaleur terrestre est une source

d'énergie quasiment inépuisable mais elle reste un parmi les sources énergétiques renouvelables et qui dépend de la géographie de pays.

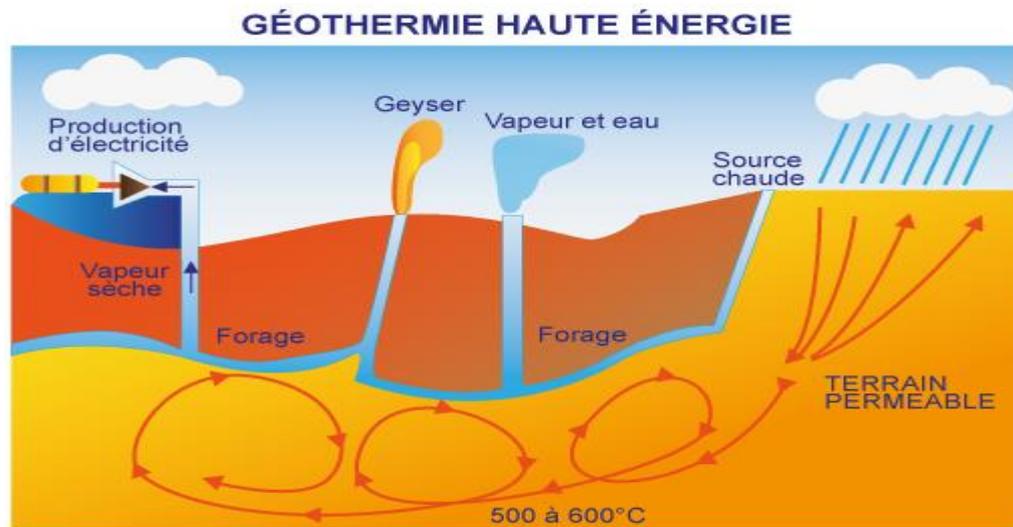


Figure.I.11 : Energie Géothermie. [15]

On distingue trois types de géothermie :

- 1/ La géothermie peu profonde à basse température
- 2/ La géothermie profonde à haute température.
- 3/ La géothermie très profonde à très haute température.

### I.3.5.2. Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermie.

- **Les avantages**

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne). Elle peut quand même contribuer à un réchauffement local des milieux là où les calories seront reléguées si elles le sont massivement.

- **Les inconvénients**

- 1/ Les forages pour accéder à cette ressource sont souvent très coûteux, car la production d'électricité nécessite de très hautes températures, donc de très grandes profondeurs. Il est par ailleurs légitime de s'interroger sur le coût énergétique de tels forages.
- 2/ L'implantation d'une centrale est un processus très long, d'abord à cause de la lourdeur de l'étude prospective à effectuer (études géologique, thermiques, détermination du lieu de

forage...), mais ensuite par la lourdeur de l'étape de forage ainsi que la période de rodage du dispositif.

3/ La réussite d'un projet de centrale n'est jamais assurée car les forages peuvent se révéler infructueux voir même dangereux, on parle de « risque géologique » (provocation de séisme notamment).

### **I.3.6- L'énergie solaire**

#### **I.3.6.1- Définition**

L'ENERGIE SOLAIRE est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur, cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables.



*Figure.I.12 : Energie Solaire.*

#### **I.3.6.2. Les avantages de l'énergie solaire.**

1/C'est une énergie renouvelable et écologique.

2/Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.

3/Source d'énergie inépuisable.

4/Une énergie propre et non polluante qui ne produit pas de gaz à effet de serre ou autres déchets toxiques pour l'environnement.

5/Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

6/La lumière ne coute rien

## **I.4.Conclusion**

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs :

- **Avantage :**
  - Plus les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée.
  - Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps.
  - Pas d'émission de CO<sub>2</sub> ; Pour la plupart des méthodes.
  - Coût au kWh fixe, faible et stable.
  - L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
  
- **Inconvénients**
  - Investissement important.
  - L'installation doit s'intégrer dans l'environnement.
  - Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire.
  - Projets de longue durée.
  - Le stockage de l'électricité.

Il ne faut pas oublier qu'il faut commencer par l'optimisation des consommations, ceci se réalise par une conception architecturale bioclimatique accompagnée par des équipements ménagers économes.

Une fois les consommations diminuées (mais pas le confort), nous pouvons envisager d'investir dans des systèmes de production d'énergie.

## *Chapitre II : Energie photovoltaïque*

## II-Introduction

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur  $10000 \text{ w/m}^2$  crête dans les zones tempérées et jusqu'à  $14000 \text{ w/m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée signalons dès à présent le flux solaire reçu au niveau de sol dépend de :

1. L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
2. La latitude du lieu de collecte, son degré de pollution ainsi que son altitude.
3. Le période de l'année.
4. L'instant considéré dans la journée.
5. La nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe dans le monde des zones plus favorisées que d'autres, du point de vue ensoleillement, répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des gisements solaires pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation.

L'énergie solaire est l'énergie dérivée du soleil. Le rayonnement solaire peut être utilisé de deux manières :

1. Soit en utilisant la chaleur ne produit pas le rayonnement : énergie thermique,
2. Soit en convertissant l'énergie solaire en électricité : c'est l'énergie photovoltaïque.

### II.1.1 L'énergie solaire thermique

Est dérivée du rayonnement du soleil qui augmente la température d'un corps exposé sous ce rayonnement. Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée dans la vie quotidienne. L'énergie solaire est essentiellement utilisée pour le chauffage de l'eau, de l'air, ou d'un bâtiment tout entier. Côté technique, deux méthodes sont appliquées pour transformer le rayonnement solaire en énergie thermique :

1. Soit en concentrant et en collectant la chaleur grâce à des panneaux noirs.
2. Soit en concentrant les rayons en un seul endroit.

Le principal intérêt de l'énergie solaire thermique, c'est sa simplicité : les panneaux destinés au chauffage sont simples, solides, résistants et durables.

### **II.1.2 -Les utilisations de l'énergie solaire thermique**

Cette énergie couvre en moyenne 50 % des besoins en chauffe-eau et autre complément de chauffage en France. L'installation se fait souvent sur la toiture d'une maison indépendante ou d'un bâtiment tout entier.

Il s'agit de capteurs vitrés dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement du soleil.

L'énergie solaire thermique est aussi utilisée pour les machines frigorifiques comme le réfrigérateur à absorption de gaz, les camping-cars et les caravanes.

## **II.2. Energie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules regroupés forment un champ photovoltaïque.

### **II.2.1. Rayonnement solaire [17]**

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

Le rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct ED est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

A) Le rayonnement diffus : Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

B) Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

C) Le rayonnement global : Le rayonnement global est subdivisé en rayonnement direct, diffus et reflété par le sol. Dans la Figure (1), est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre



Tahar Achour / Expert International & Consultant en Energie

Figure.II.1 Types de Rayonnement Solaire Reçus Au Sol.[17]

Dans la Figure. (2), ci-après, est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil

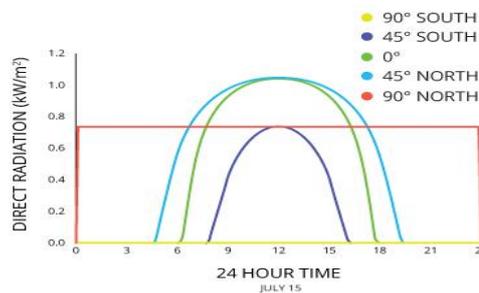


Figure.II.2. Intensité De L'enseillement.[17]

### II.2.2. Spectre du rayonnement [18]

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Sa distribution en énergie est répartie en :

- A) Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38$  mm 6.4%.
- b) Visible  $0.38 < \lambda < 0.78$  mm 48.0%.
- c) Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10$  mm 45.6%.

### II.3. Les différents systèmes photovoltaïques :

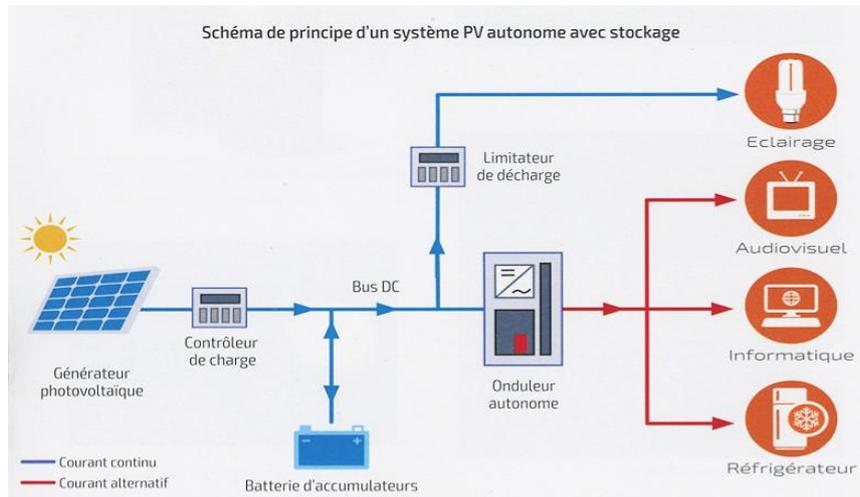
#### II.3.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes : [19]

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- A) Des Systèmes photovoltaïque autonomes avec stockage.
- B) Des Systèmes photovoltaïque sans stockage (au Fil du soleil).

##### II.3.1.1. Les systèmes autonomes avec stockage [20]

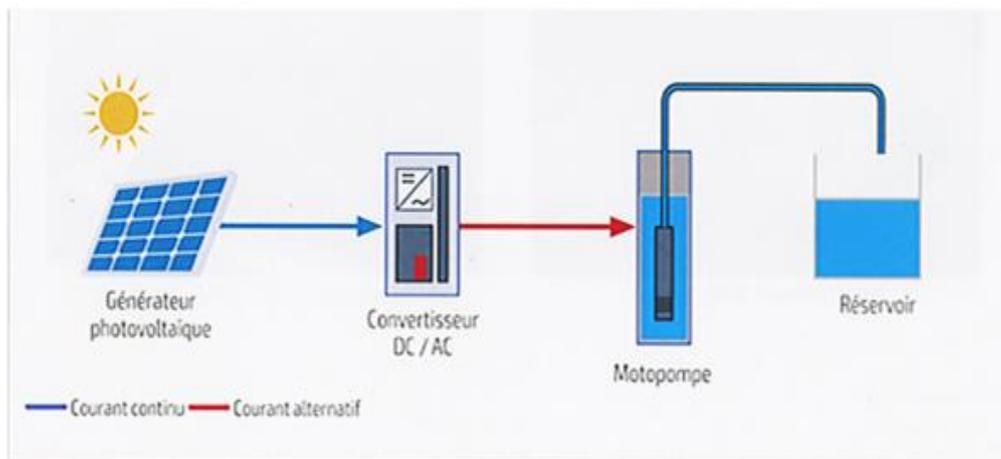
C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée, Figure. (3). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.



**Figure.II.3 : Diagramme D'une Installation Photovoltaïque Autonome Avec Stockage.**[21]

### II.3.1.2. Système autonome sans stockage

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par la Figure (4). La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.



**Figure.II.4 : Diagramme D'une Installation Photovoltaïque Autonome Sans Stockage.**[22]

### II.3.2. Systèmes photovoltaïque couplés au réseau [23]

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordée au réseau électrique.

L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique. La Figure (5) illustre le principe d'un système photovoltaïque connecté au réseau

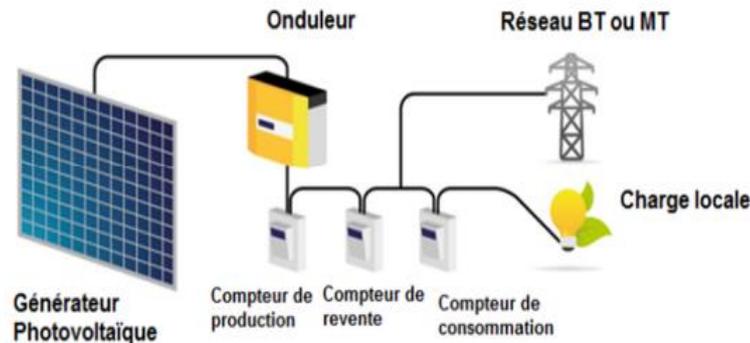
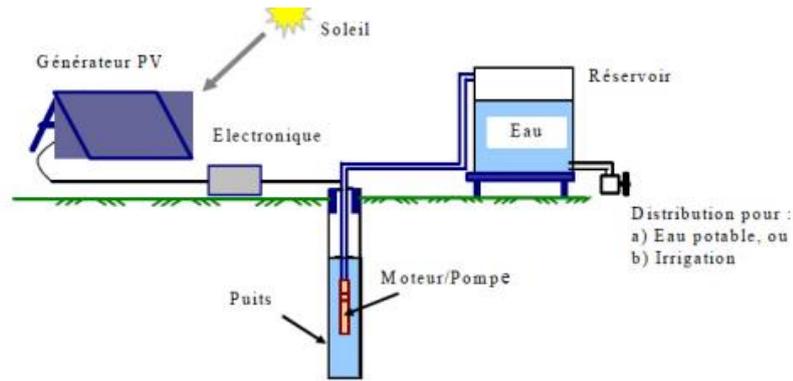


Figure. II.5 : Système PV Couplés Aux Réseaux.[23]

#### II.4. Les systèmes de pompage photovoltaïque [24]

Généralement, le pompage photovoltaïque fonctionne au fil du soleil c'est-à-dire sans stockage électrochimique. Ainsi, le pompage est sans doute l'une des plus pertinentes utilisations de l'énergie solaire photovoltaïque. Il offre une très grande simplicité d'exploitation et de fiabilité à moindre coût, qui l'ont avantage par rapport à l'utilisation de batteries d'accumulateurs.

L'évolution progressive, matériaux et des gammes de performances permet aujourd'hui de considérer le pompage solaire comme une technologie mature. Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un sous-système de pompage et un réservoir d'eau Figure. (6). Le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution adoptée par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation.



*Figure.II.6 : Schéma Général D'un Système De Pompage Photovoltaïque.[24]*

Le domaine d'application du pompage photovoltaïque est très large. Nous citons ci-dessous les applications d'alimentation en eau pour les besoins suivants :

- a. Habitations individuelles isolées,
- b. Habitations collectives isolées,
- c. Petite irrigation et irrigation moderne (Système goutte à goutte),
- d. Point d'eau pour abreuvement du bétail

Un système de pompage photovoltaïque est généralement constitué d'un :

- a. Générateur photovoltaïque.
- b. Groupe de motopompe.
- c. Système électronique et de commande.
- d. Système du stockage.

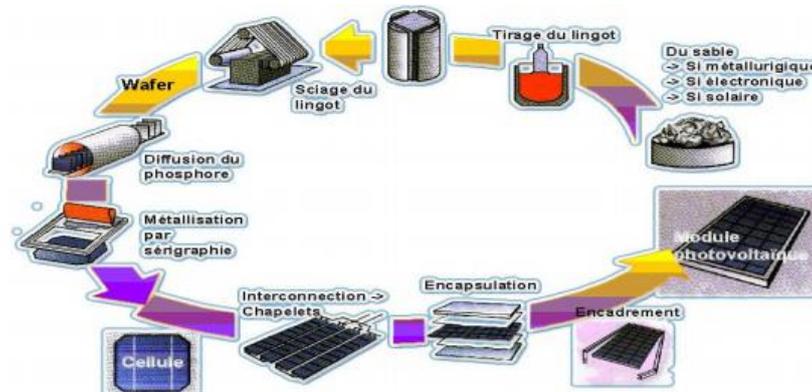
#### **II.4.1. Le générateur photovoltaïque.[19]**

##### **II.4.1.1. Fabrication des cellules solaires.**

Etant donné que le fonctionnement d'un capteur photovoltaïque ne génère pas de nuisance particulière, les impacts environnementaux se situent nécessairement en amont de la chaîne, au moment de la fabrication, et en fin de vie lors du démontage.

Il est donc utile de connaître les techniques de fabrication afin de bien identifier d'où proviennent et comment sont utilisés les différents flux de matières et d'énergie mis en jeu.

Cette partie déroule les étapes de fabrication d'un processus standard, c'est-à-dire le plus établi, chaque industriel développant bien entendu ses propres variantes.



*Figure.II.7 : Enchaînement Des Etapes De Fabrication D'un Module Photovoltaïque Au Silicium Cristallin.[19]*

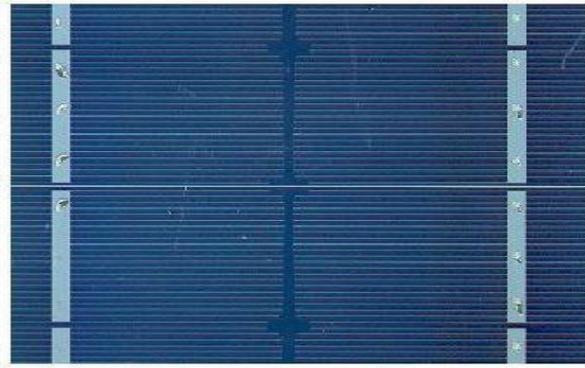
Comme on le voit sur la Figure. (7), un certain nombre d'étapes est nécessaire pour passer du quartz au module photovoltaïque fini. Le raffinage du silicium se fait en deux phases : tout d'abord l'extraction du silicium du minerai de quartz, puis la purification de ce silicium par diverses techniques. Une fois purifié, il sera mis sous forme de plaques et rendu actif par une succession de traitements spécifiques. Les cellules photovoltaïques seront alors assemblées et montées dans des modules.

#### **II.4.1.2. Les types des cellules photovoltaïques.[25]**

La cellule solaire ou photopile est un semi-conducteur sensible à la lumière, pour l'obtenir il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type p-n, dans un matériau de silicium.

##### **A) Les cellules monocristallines.**

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du au refroidissement du silicium.



*Figure.II.8. Cellule au Silicium Monocristallin.[26]*

**Rendement :**

- 12-19 % (On obtient ainsi une puissance de 120 à 190 WC par m<sup>2</sup>).

**Avantage :**

- Très bon rendement.

**Inconvénients :**

- Coût élevé.
- Rendement faible sous éclairage réduit.

**B) Les cellules poly cristallines :**

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.



*Figure.II.9 : Cellules Poly Cristallines.[26]*

**Rendement :**

- 11-15 % (On obtient ainsi une puissance de 110 à 150 WC par m<sup>2</sup>) Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins.

**Avantage :**

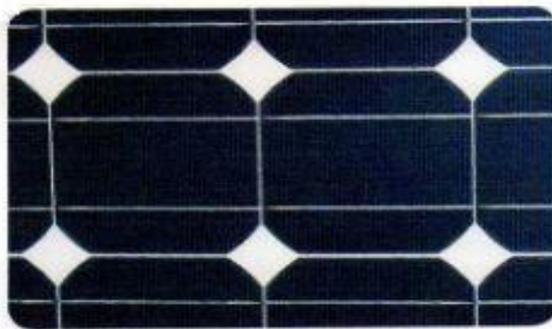
- Rapport performance/prix.

**Inconvénient :**

- Rendement faible sous éclairage réduit.

**C) Le silicium amorphe :**

Silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état Cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces.



*Figure.II.10 : Silicium Amorph.*[26]

**Rendement :**

- 60-70 WC/m<sup>2</sup>

**Avantage :**

- Moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur.

- Moins polluant à la fabrication (Ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers" (moins énergivores).

- Fonctionnent avec éclairage faible.

- Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température.
- Possibilité de créer des panneaux souples.

### Inconvénients :

- Rendement global plus faible.
- Rendement moindre sous éclairage direct.
- Diminution de performance avec le temps plus importante.

## II. 5 -Liaison des cellules photovoltaïque :

### II .5.1 -Groupement en série :[27]

Dans un groupement en série Figure. (II.11), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

La Figure. (II.12) montre la caractéristique résultante ( $I_s$ ,  $V_s$ ) obtenue par l'associant en série (indice s) de  $n_s$  cellules identiques ( $I_C$ ,  $V_{co}$ ).

Avec :

$I_{sc}=I_{cc}$ : le courant de court-circuit.

$V_{sco}=n_s V_{co}$ : la tension de circuit ouvert

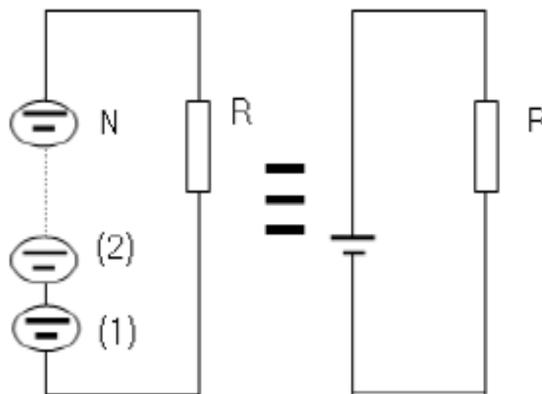


Figure. II.11 : Association Des Modules En Série.[27]

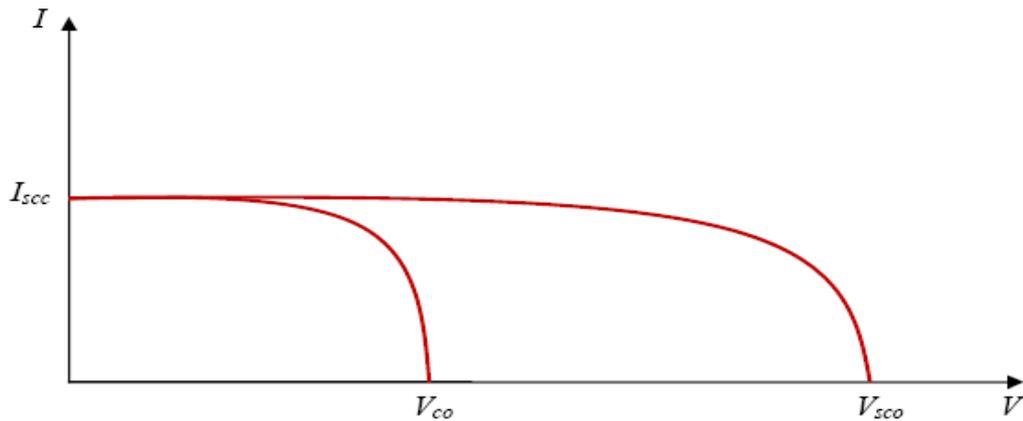


Figure.. II.12. Caractéristique Résultante D'un Groupement En Série De ns Cellules Identiques.[27]

**II .5.2 -Groupement en parallèle :**

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle Figure.(II.13.), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La Figure.(II.14) montre la caractéristique résultante (**I<sub>pcc</sub>**, **V<sub>pco</sub>**) obtenue en associant en parallèle (indice p) **np** cellules identiques (**I<sub>cc</sub>**,**V<sub>co</sub>**).

**I<sub>pcc</sub>**= **npI<sub>cc</sub>**: le courant de court-circuit.

**V<sub>pco</sub>**=**V<sub>co</sub>**: la tension de circuit ouvert.

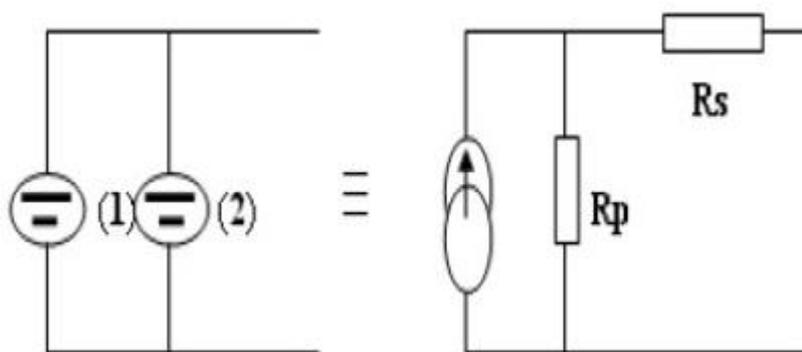
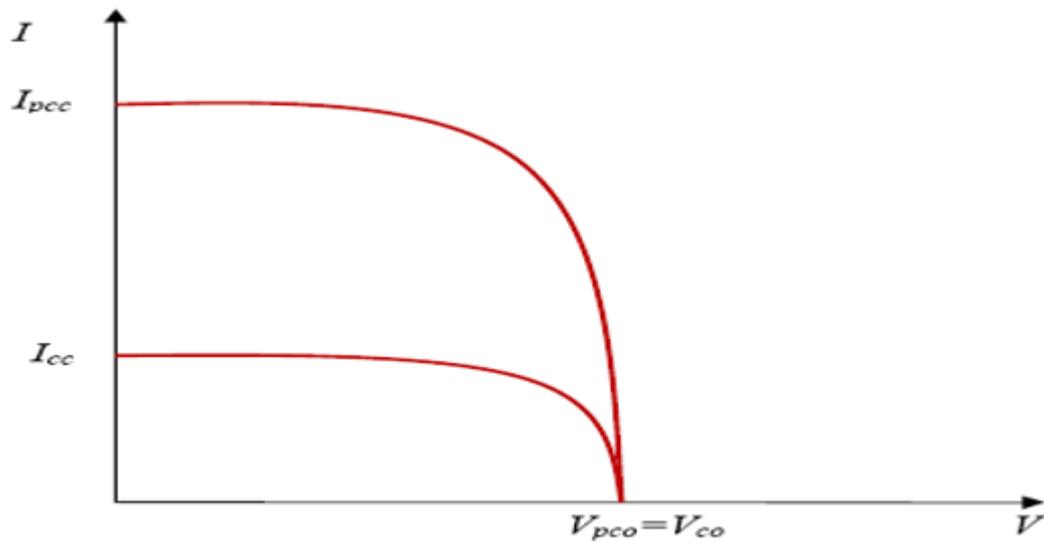


Figure.II.13. Association Des Modules En Parallèle.[27]



*Figure.. II.14 : Caractéristique Résultante D'un Groupement En Parallèle De  $n_s$  Cellules Identiques.[27]*

### II.5.3 -Groupement mixte (série-parallèle) :[27]

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques Figure.(II.15). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $n_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $n_p$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la Figure. (II.16),  $n_s$  et  $n_p$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

**$I_{gcc} = n_p \cdot I_{cc}$** : courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n \cdot V_{co}$ : tension du circuit ouvert du module résultant.

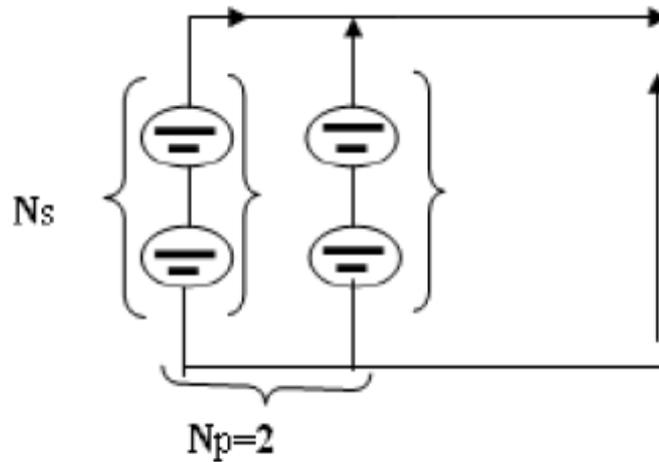


Figure. II.15. Association Mixte Des Modules.[27]

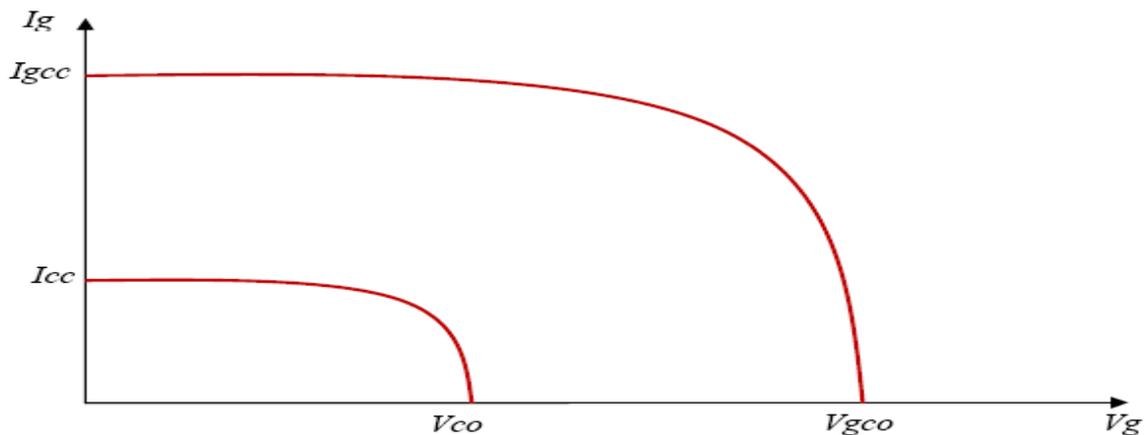


Figure.II.16. Caractéristique Résultante D'un Groupement Mixte.[27]

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

- **Avantage**

-Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.

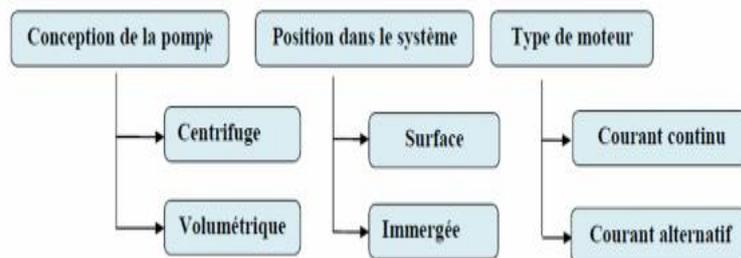
-Absence de bruit, de pollution et d'émissions.

-Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).

- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

## II.6. Le groupe de motopompe [28]

La classification des pompes peut se faire selon différents critères : conception de la pompe, sa position dans le système et le type du moteur utilisé.



*Figure.II.17. Classification Des Pompes.[28]*

### II.6.1. Classification selon la conception de la pompe :

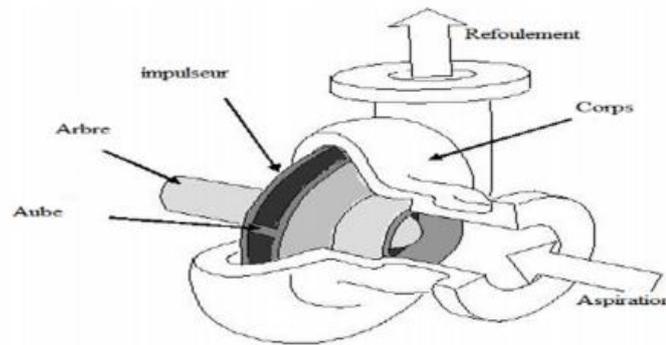
Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Il existe deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

#### a) Pompe centrifuge : [29]

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.

- la puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.



*Figure.II.18 : Schéma d'une Pompe Centrifuge.[29]*

### II.6.2. Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

- **Pompe volumétrique** : [29]

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.) Leurs principaux atouts sont les suivants :

1/Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup>/h) et aux grandes hauteurs.

2/Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique  $I=f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour palier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadéquation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

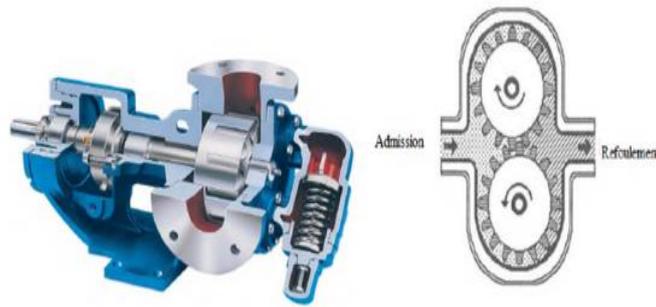


Figure.II.19 : Schéma d'une pompe volumétrique.[29]

Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

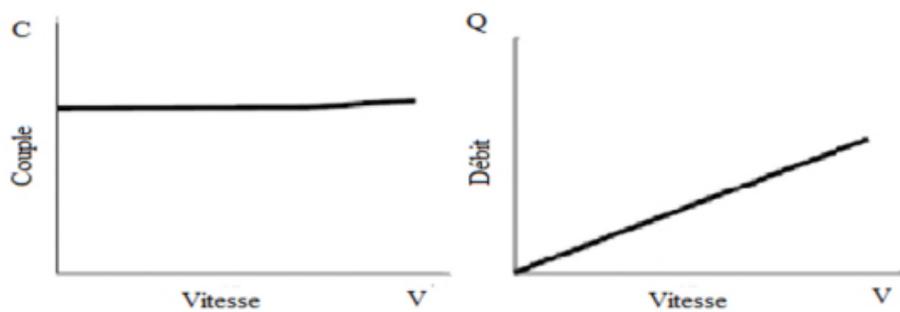


Figure.II.20 : Caractéristiques D'une Pompe Volumétrique.[29]

### II.6.3. Classification selon les types de moteur :

#### II.6.3.1. Moteur à courant continu [30]

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie.

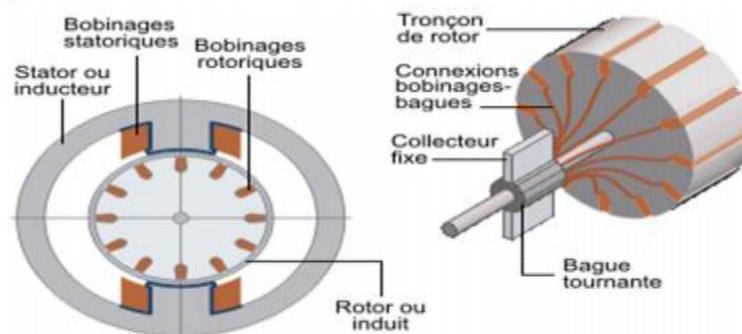


Figure.II.21 : Moteur A Courant Continu.[31]

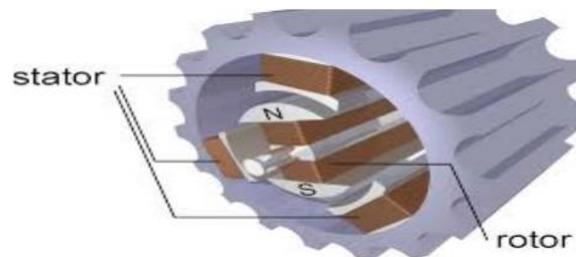
### II.6.3.2. Moteur à courant alternatifs : [30]

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de  $120^\circ$ ) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- \* Les moteurs synchrones.
- \* Les moteurs asynchrones.

### II.6.4.1. Les moteurs synchrones : [30]

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1 500 MW. Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.



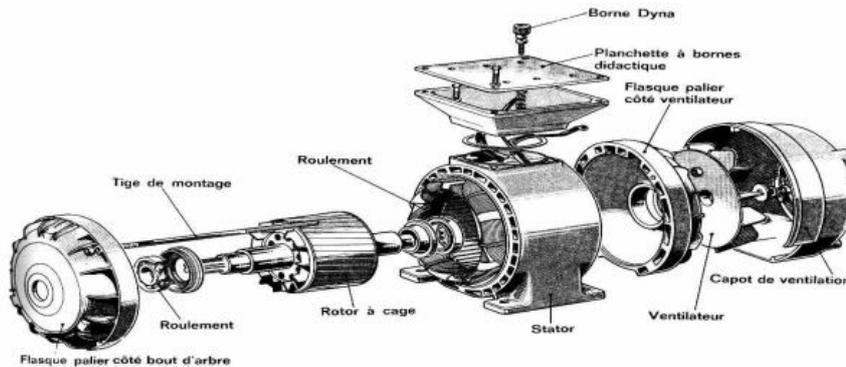
*Figure.II.22 : Moteur Synchrone.[31]*

### II.6.4.2. Les moteurs asynchrones [32]

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un

circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur.

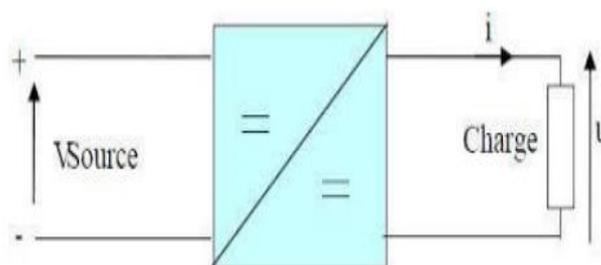


*Figure.II.23. : Moteur Asynchrone.[32]*

Dans ce travail, on utilise la machine asynchrone, parce qu'elle est la machine la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération et la moins coûteuse à la fabrication.

### II.6.5. Les convertisseur DC-DC (les hacheurs) [33]

L'hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Les hacheurs permettent donc d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension continue.



*Figure.II.24 : Symbole D'un Convertisseur DC-DC.[33]*

### II.6.5.1 Convertisseur Buck [34]

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC, La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur S peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

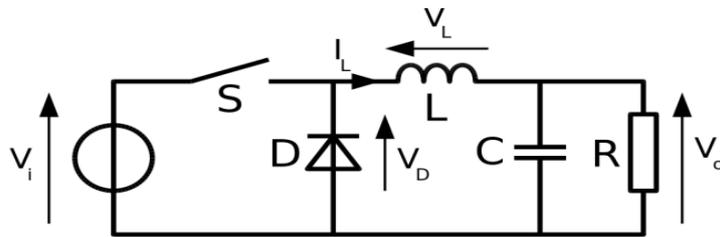


Figure. II.25 : Schéma De Bas D'un Convertisseur Buck.[34]

### II.6.3.2. Convertisseur Boost (Hacheur parallèle) [35]

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Son schéma est donné sur la Figure (II.26)

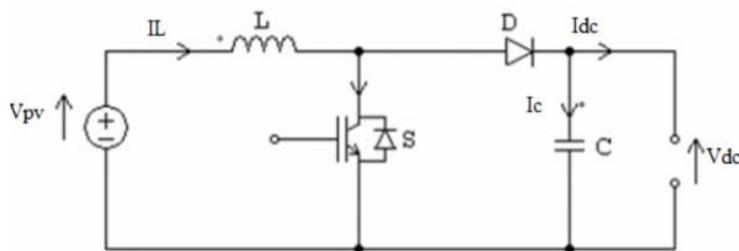


Figure.II.26 : Hacheur Parallèle.

### II.6.5.3. Convertisseur Buck-Boost [36]

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

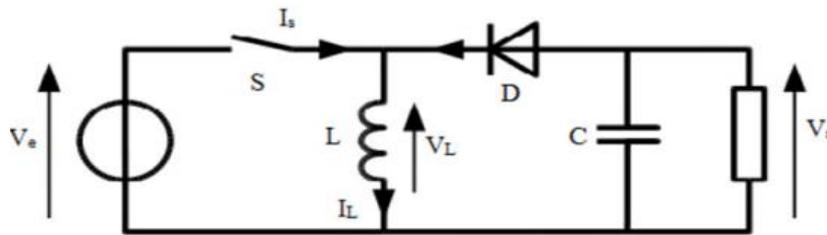


Figure.II.27 : Convertisseur Buck-Boost.[36]

### II.6.6. Les onduleurs : [37]

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande.

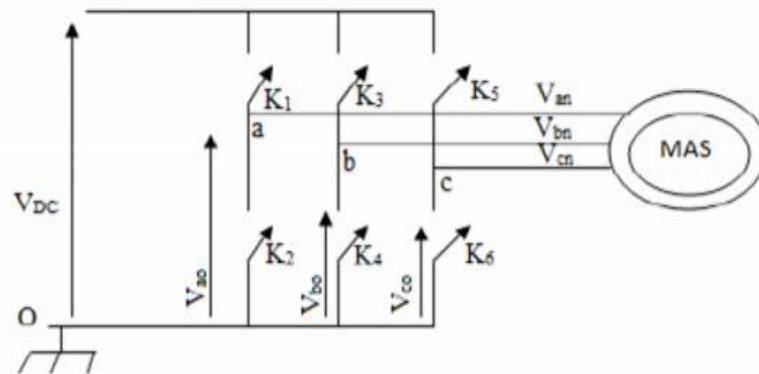


Figure.II.28 : Conversion DC / AC. [37]

## II.7 Commande MPPT [38]

### II.7.1. Introduction

La commande MPPT, (Maximum Power Point Tracking), est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale

de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [commande mppt]. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

### II.7.2.1. Principe de la commande MPPT

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{pv}$ , lorsque  $dppv/V_{pv}$  est positif ou en diminuant  $V_{pv}$ , lorsque  $dppv/V_{pv}$  est négatif. Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changement brutal d'ensoleillement ou de charge.

### II.7.3 Différentes commandes MPPT

#### II.7.3.1 Commande perturbé & observe (P&O) [38]

Cette commande est un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique

#### II.7.3.2. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes du panneau est augmentée du fait de la perturbation, la

perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

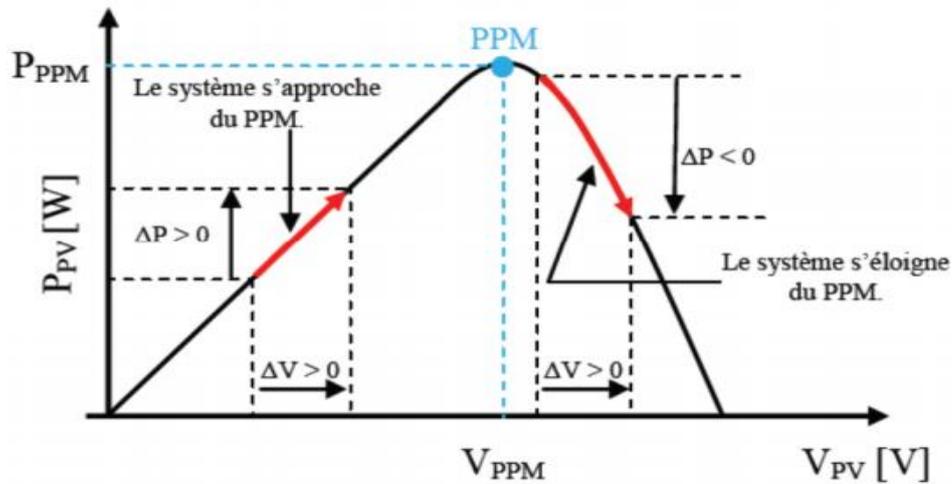


Figure. II.29 : Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) D'un Panneau Solaire.[36]

Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit :

La connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie. L'organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la Figure

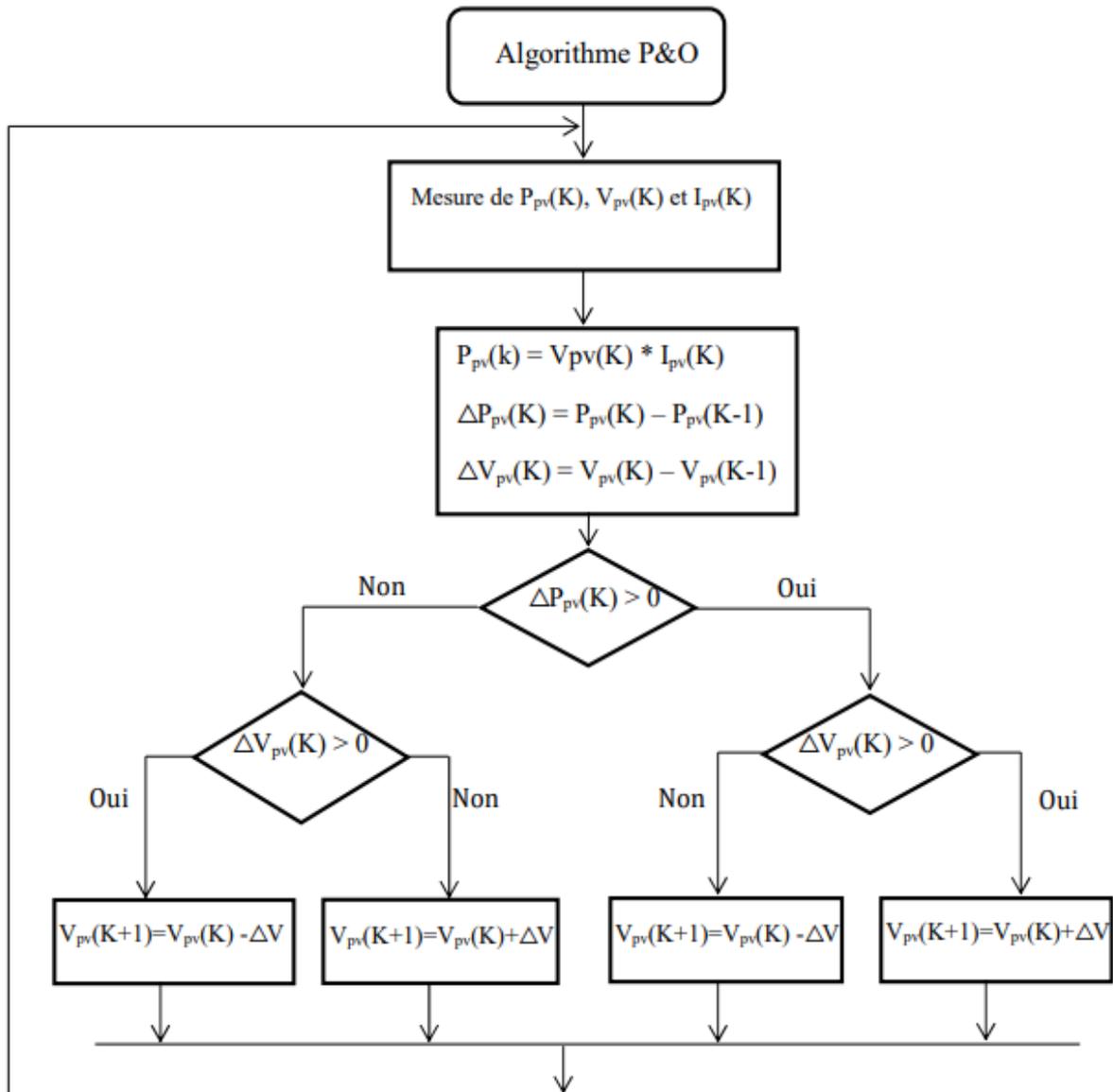


Figure. II.30 : L'algorithme De La Méthode De Perturbation Et D'observation.[36]

## II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, ainsi que les type des panneaux photovoltaïque. Ensuite parle sur le système pompage et les convertisseurs statique et à la fin je parle sur la commande MPPT.

## ***Chapitre III : Modélisation Et Commande du Système pompage***

### III.1. Introduction

La modélisation d'un système physique donnée consiste à établir son modèle mathématique afin de le simuler sous un logiciel mathématique et mieux comprendre son fonctionnement et de faciliter son dimensionnement. L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables afin de bien dimensionner le système global à étudier. Généralement, un système de pompage photovoltaïque est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur qui peut être un DC/DC(Hacheur) ou un DC/AC(Onduleur), un moteur et une pompe et enfin un réservoir d'eau pour le stockage. Nous définissons le sous-système de pompage l'ensemble des éléments qui sont : le convertisseur, le moteur et la pompe. Ce regroupement est dicté par le fait qu'en pratique ces éléments sont proposés ensemble par les fabricants des systèmes de pompage photovoltaïque. Ainsi donc, nous considérons dans notre modélisation que le système de pompage est constitué d'un générateur photovoltaïque et un sous-système de pompage.

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque. [40]

### III.2. Description du système à étudier [41]

Le système de pompage photovoltaïque avec batterie peut être comparé à une charge alimentée par une batterie qui est chargée par un générateur photovoltaïque. Ses éléments de base sont :

- **Les panneaux photovoltaïques** : permettent l'alimentation de la charge (motopompe) et le stockage (batterie).
- **La commande MPPT** : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV
- **La batterie** : alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- **Le système de gestion** : assure la gestion du flux d'énergie entre les différents composants et protège la batterie contre la surcharge et les décharges profondes.
- **Le convertisseur DC/DC** : fournit une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

- **Le convertisseur DC/AC** : fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.
- **Groupe motopompe** : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique.

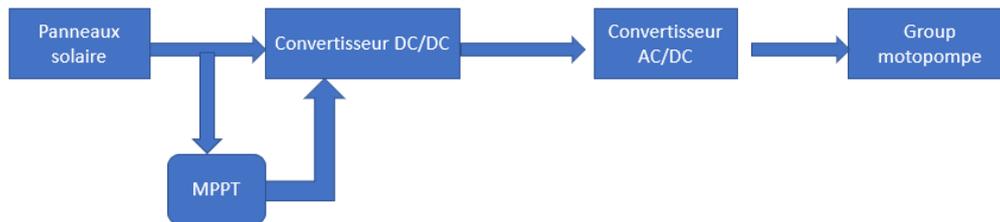


Figure.III.1 : Schéma Descriptif De Système De Pompage Photovoltaïque.

### III.3. Modélisation du système photovoltaïque :

#### III.3.1.1 Cellule photovoltaïque idéal [42]

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple Figure (III.2). Comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier débite d'une part de courant  $I_{pv}$  et le reste, le courant  $I_d$ , dans la diode.

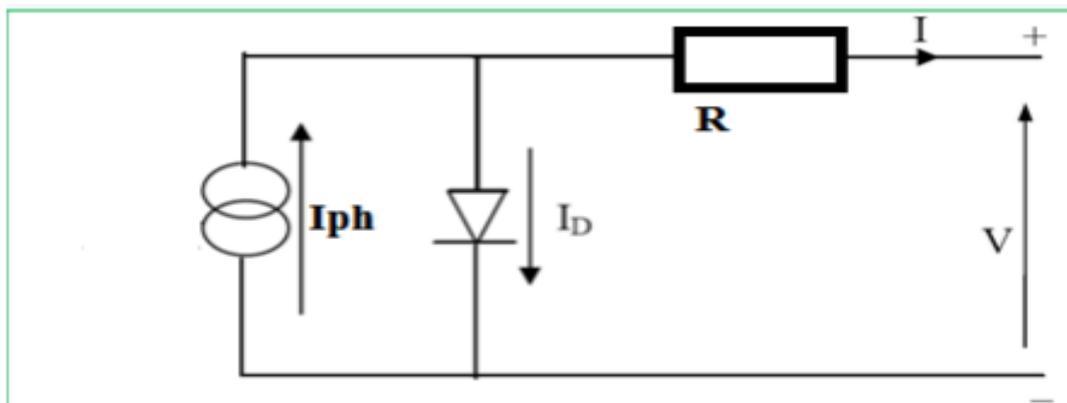


Figure. III.2 : schéma d'une cellule photovoltaïque idéale.

D'après les lois des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{III.1})$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (\text{III.2})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 * e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$I_0$  : Courant de saturation de la diode

$V_d$  : Tension au borne de la diode

$V_t$  :  $KT/q$  Potentiel thermique

$K$  : constante de Boltzman ( $1,381.10^{-23}$  Joule/Kelvin)

$q$  : charge d'électron =  $1,602.10^{-19}$  C

$T$  : température de la cellule en Kelvin

$I_{ph}$  : courant photonique Donc la relation (II.I) sera :

$$I = I_{ph} - (I_0 * e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (\text{III.4})$$

### III.3.1.2 Cellule photovoltaïque réel

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites .

On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$ .

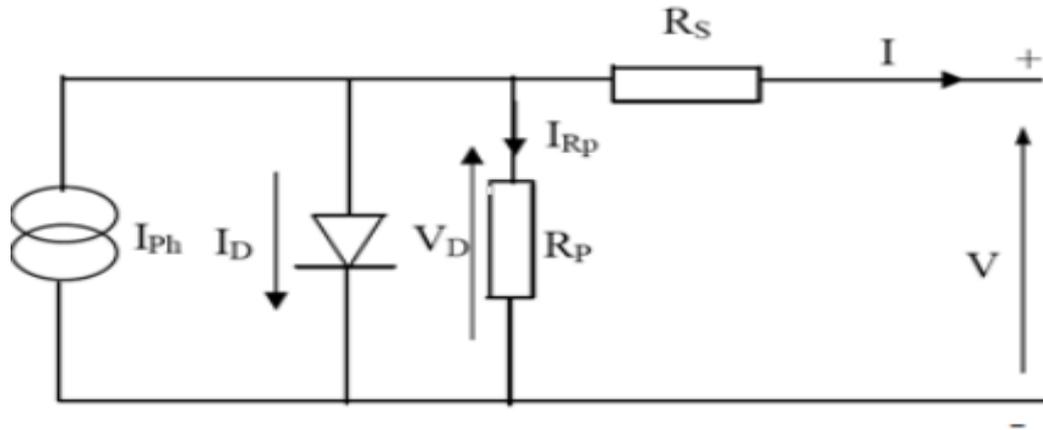


Figure.III.3 : Schéma D'une Cellule Photovoltaïque Réelle.

On a :

$$I = I_{ph} + I_d + I_p \quad (\text{III.5})$$

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{III.6})$$

$$I_d = I_0 \cdot e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} - I \quad (\text{III.7})$$

De (II.5) et (II.6) ; (II.7) devient :

$$I = I_{ph} - \left[ I_0 \times e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} - I \right] - \left[ \frac{V + R_s I}{R_p} \right] \quad (\text{III.8})$$

### III.3.2. Caractéristiques d'un module :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

♦ **La puissance de crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).

♦ **La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

♦ **Tension à vide,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

♦ **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

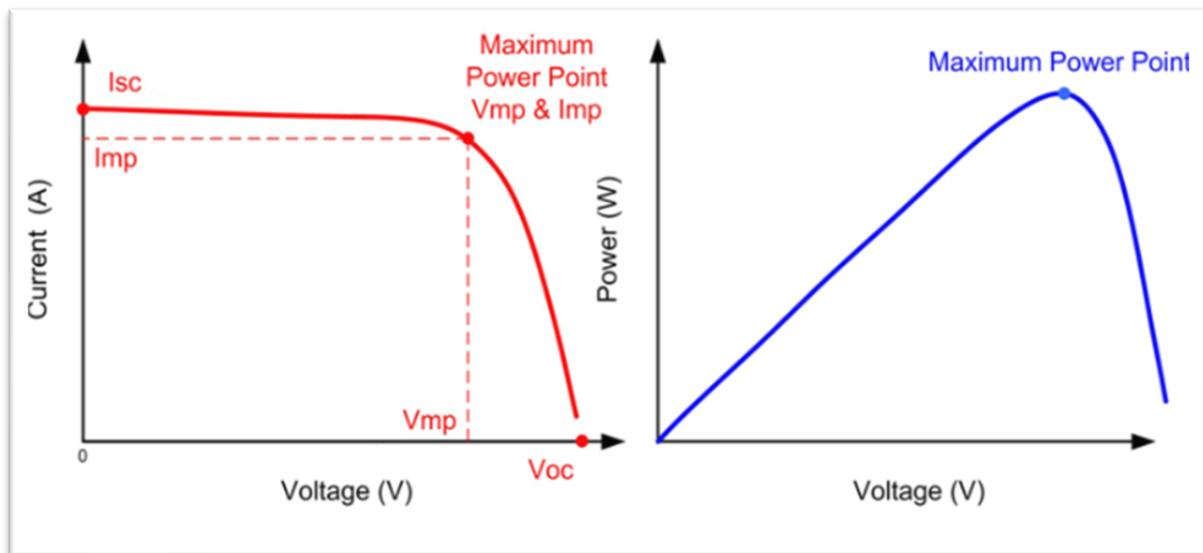
♦ **Point de fonctionnement optimum,  $P_m$  ( $V_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_{co}.I_m$

♦ **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

♦ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} .I_{cc}$

### III.3.3. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC : [43]

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement a ensoleillement  $G=1000W/m^2$  et a température  $T=25C$



*Figure.III.4 : Exemple De Caractéristique Courant-Tension D'un Module PV.[43]*

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode. Les résultats des caractéristiques Puissance-Tension et courant-Tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Les valeurs  $I_{sc}$ ,  $I_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$  ainsi que

$P_{max}$  sont les valeurs exactes du tableau donné précédemment. Nous allons passer dans ce qui suit à l'étude de l'influence des paramètres d'entrées : Température et Ensoleillement.

**III.3.3.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque**

Dans ce qui suit, la simulation ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ( $G = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) en maintenant la température constante  $T_a = 25^\circ\text{C}$ . Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant / tension Figure (III.5) ainsi que pour la caractéristique puissance / tension Figure (III.6)

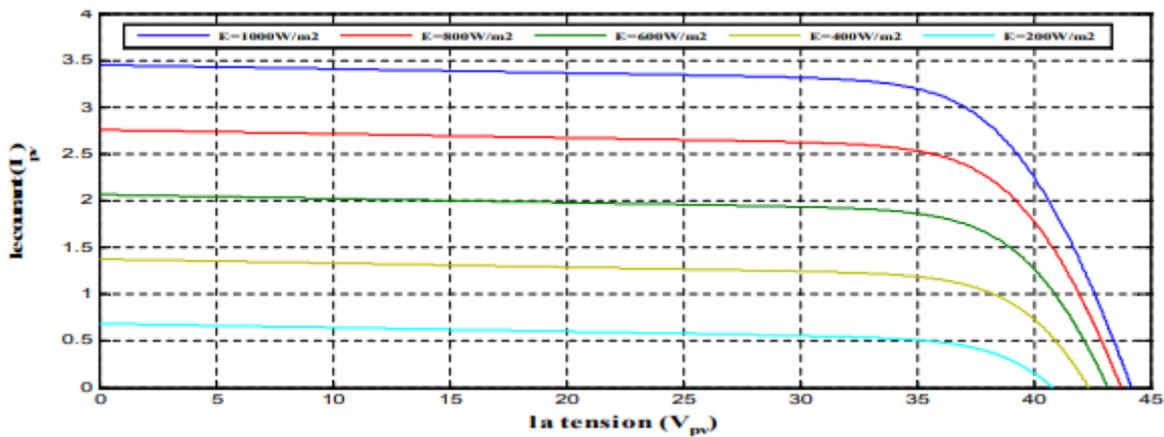


Figure. III.5 : Influence De L'ensoleillement Sur La Caractéristique  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ).

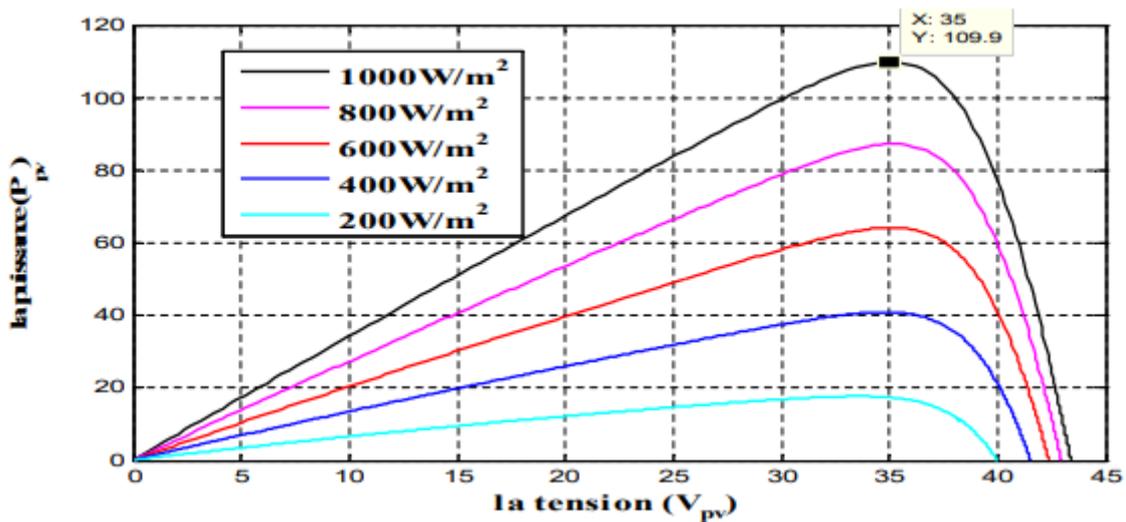


Figure.III.6 : Influence De L'ensoleillement Sur La Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ).

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivants :

1/ Le courant de circuit-ouvert  $I_{sc}$  et la puissance varie proportionnellement à l'ensoleillement  $G$ .

2/La tension à vide  $V_{oc}$  varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

### III.3.3.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque :

Nous allons effectuer d'autres test, mais cette fois ci en faisant varier la valeur de la température ambiante ( $T_a = 10, 20, 25, 30, 40, 45$  °C). Nous obtenons les courbes suivantes Figure (III.7) et Figure (III.8).

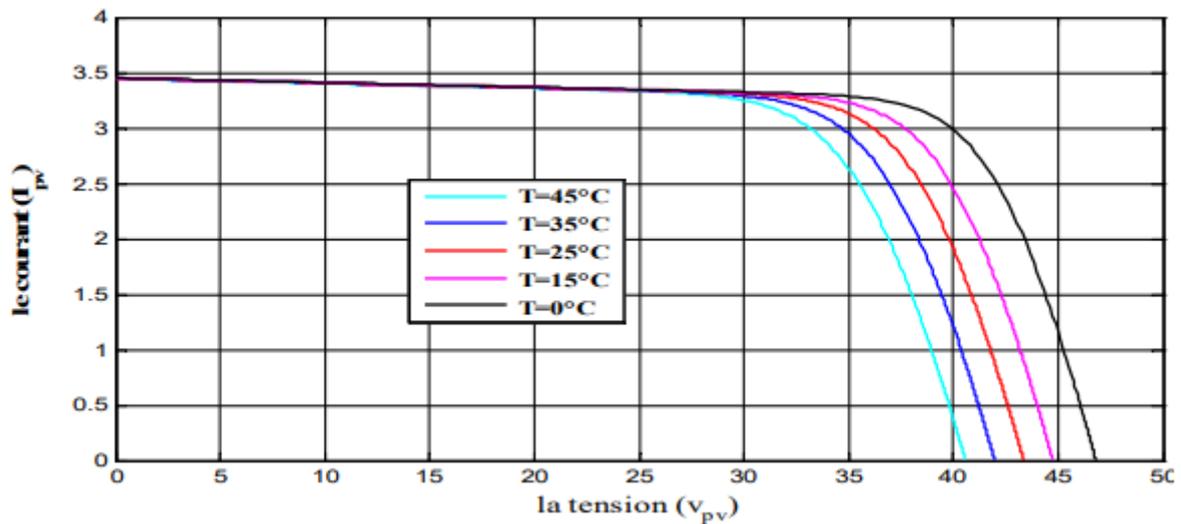


Figure.III.7 : Influence De La Température Sur La Caractéristique  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ).

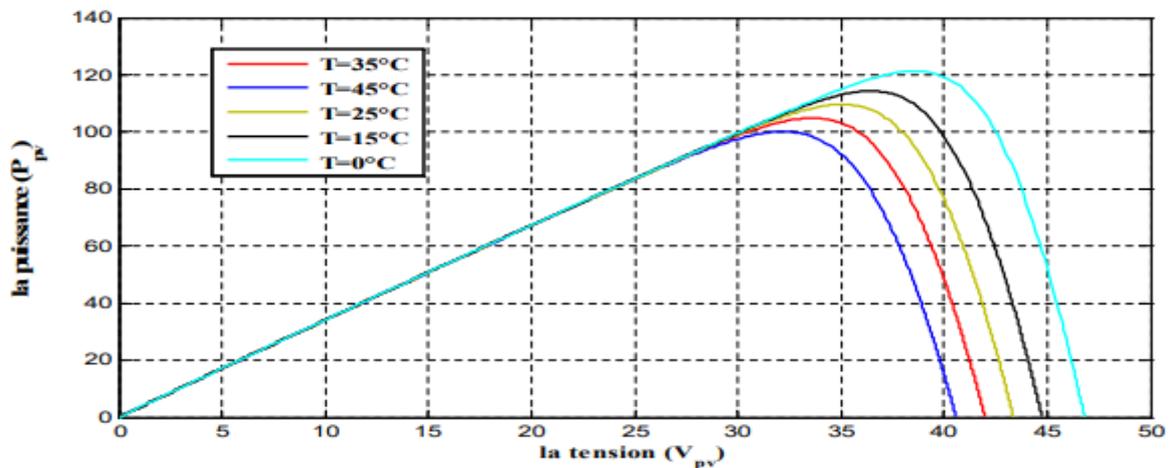


Figure. III.8 : Influence De La Température Sur La Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ).

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

1/ En faisant varier la température de 0°C à 35°C, nous remarquons que le courant de court circuit **I<sub>sc</sub>** et la puissance **P<sub>pv</sub>** est presque dépendant de la température.

2/ En revanche, la tension de circuit ouvert **V<sub>oc</sub>** diminue lorsque la température augmente.

• Discussion des résultats :

**A/ Influence de l'ensoleillement** : Une température de 25 °C est maintenue constante, l'ensoleillement (E) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les Figures (III.5) et (III.6).

On remarque :

1/ Que l'influence due à la baisse de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit **I<sub>sc</sub>**. Par contre la tension de circuit ouvert **V<sub>oc</sub>** diminue faiblement.

2/ Que le point de puissance optimale chute brusquement si l'ensoleillement diminue.

3/ Que le courant produit par la photopile **I<sub>ph</sub>** est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E. Par contre, la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est en fonction de la différence de potentiel de la jonction N-P du matériau lui-même.

**B/Influence de la température** : Pour un ensoleillement 1000W/m<sup>2</sup> maintenu constant, nous varions la température. Les Figures (II.7 et II.8) représentent les résultats de notre simulation obtenue. On remarque :

1/ Que le courant de court-circuit **I<sub>sc</sub>** est faiblement dépendant de la température, alors que la tension de circuit ouvert **V<sub>oc</sub>**, est très sensible à la variation de la température.

2/ Que l'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T.

## III.4. Modélisation des convertisseurs statiques

### III.4.1. Modélisation de l'hacheur élévateur de tension (Boost) [44]

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la

tension d'entrée [39]. La Figure (III.9) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

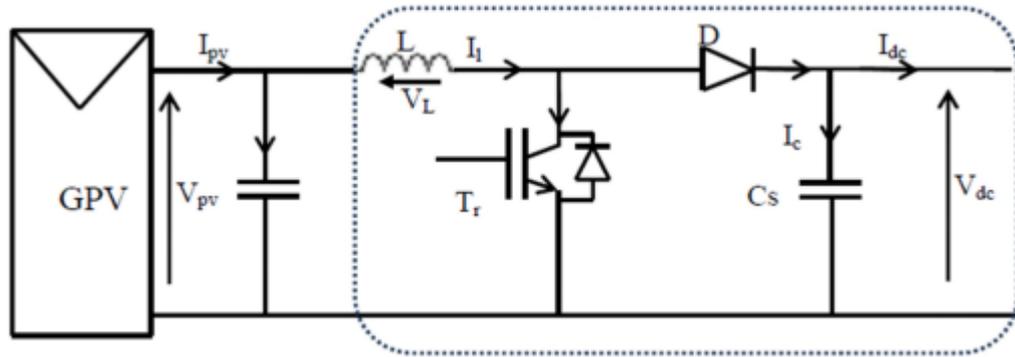


Figure.III.9 : Circuit Electrique Du Convertisseur DC-DC (Boost).[45]

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant ( $T_r$  est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha.T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, et compris entre  $0$  et  $1$ ). La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv}$ , le courant traversant l'inductance augmente linéairement. Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha.T$  à  $T$ . La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv} - V_{dc}$ , dans cette phase le condensateur  $C_s$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [45]. Les équations électriques de l'hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{III.9})$$

$$(1 - \alpha)I_l = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.10})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation :

$$V_{dc} = \frac{1}{(1 - \alpha)} V_{pv} \quad (\text{III.11})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1-a)I_1 \quad (\text{III.12})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

### III.4.2. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost : [46]

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [41]. Tandis que lorsque le transistor est fermé le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

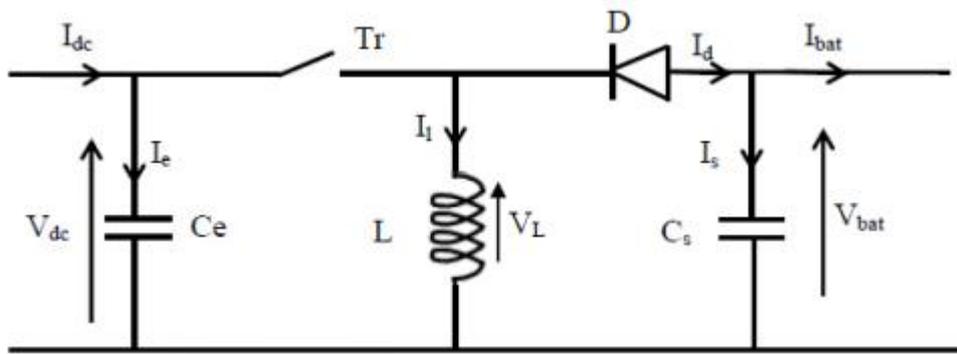


Figure.III.10 : Circuit Electrique Du Convertisseur DC-DC (Buck-Boost).[46]

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

$$V_{btt} = -\frac{a}{(1-a)}V_{dc} \quad (\text{III.13})$$

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

$$I_{batt} = -\frac{(1-a)}{a}I_{dc} \quad (\text{III.14})$$

### III.4.3. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI [47]

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Les onduleurs utilisés pour le pompage sont en général à fréquence variable, afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la Figure (III.11), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier. Pour simplifier l'étude on suppose que :

- 1/ La commutation des interrupteurs est instantanée.
- 2/ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- 3/ La charge est équilibrée, couplée en étoile.

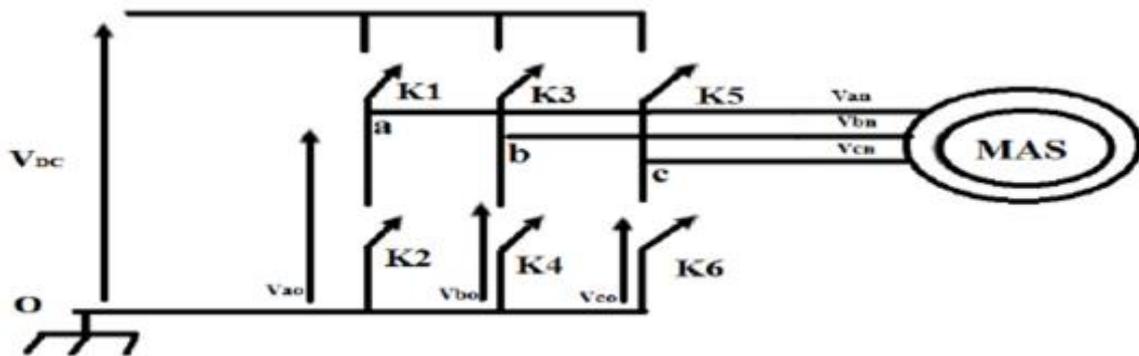


Figure. III.11 : Circuit Electrique De L'onduleur. [47]

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé : Les tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Avec :  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$  sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point milieu « O » d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de Châle comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Avec :  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et  $V_{no}$  est la tension du neutre de la charge par rapport au point fictif « O ».

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{III.17})$$

En remplaçant (III.13) dans (III.14) on aura

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{III.18})$$

En introduisant (III. 16) dans (III.18) on obtient :

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bo} = \frac{1}{3}(V_{ao} - 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{co} = \frac{1}{3}(V_{ao} - V_{bo} - 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Si est l'état de l'interrupteur  $K_i$  tel que :  $\begin{cases} S_i = 1, \text{ si } k_i \text{ ferme} \\ S_i = 0, \text{ si } k_i \text{ ouvert} \end{cases}$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

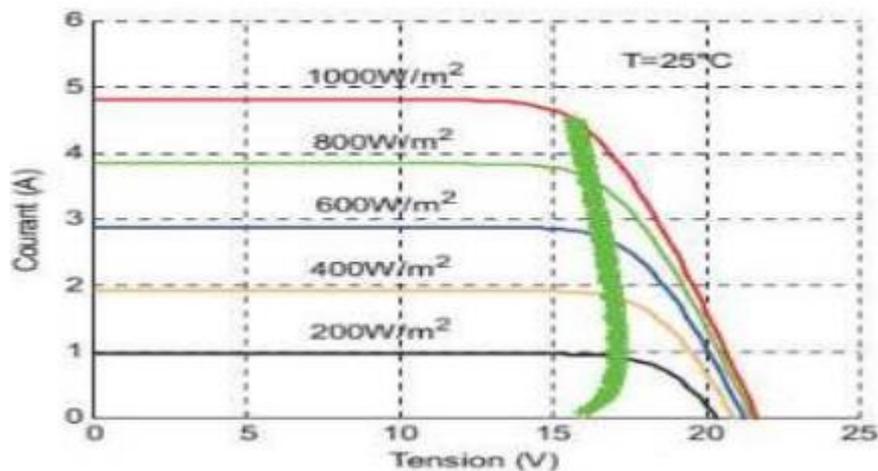
Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$IDC = S1 i_{a_{ch}} + S2 i_{b_{ch}} + S3 i_{c_{ch}} \quad (III.22)$$

Avec : S1, S2, S3 et des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.

### III.5. Principe de fonctionnement de MPPT [48]

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La Figure (III.16) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur. La Figure (III.17) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome.



*Figure. III.12: La Caractéristique I-V*

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes

performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

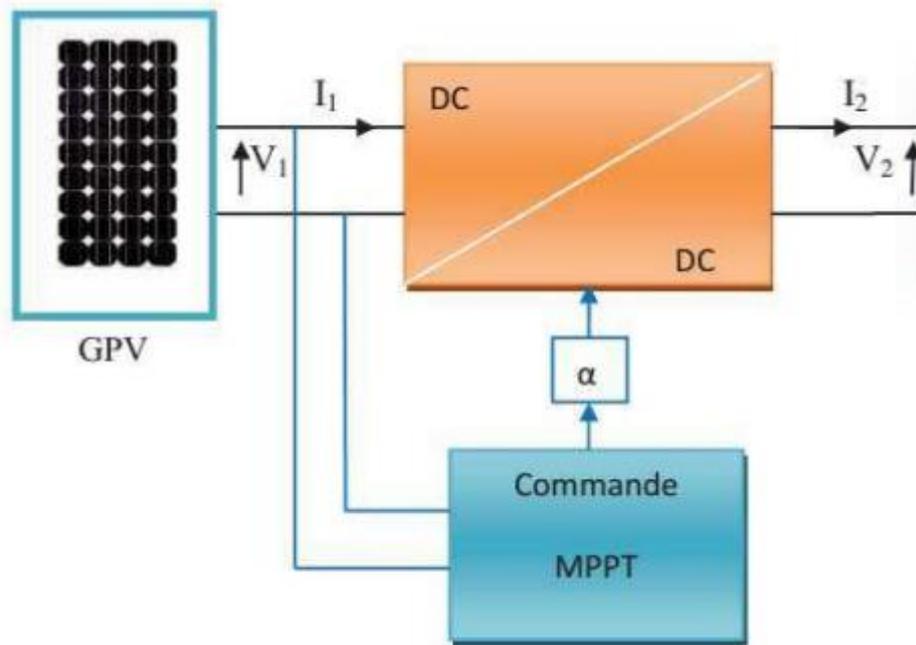
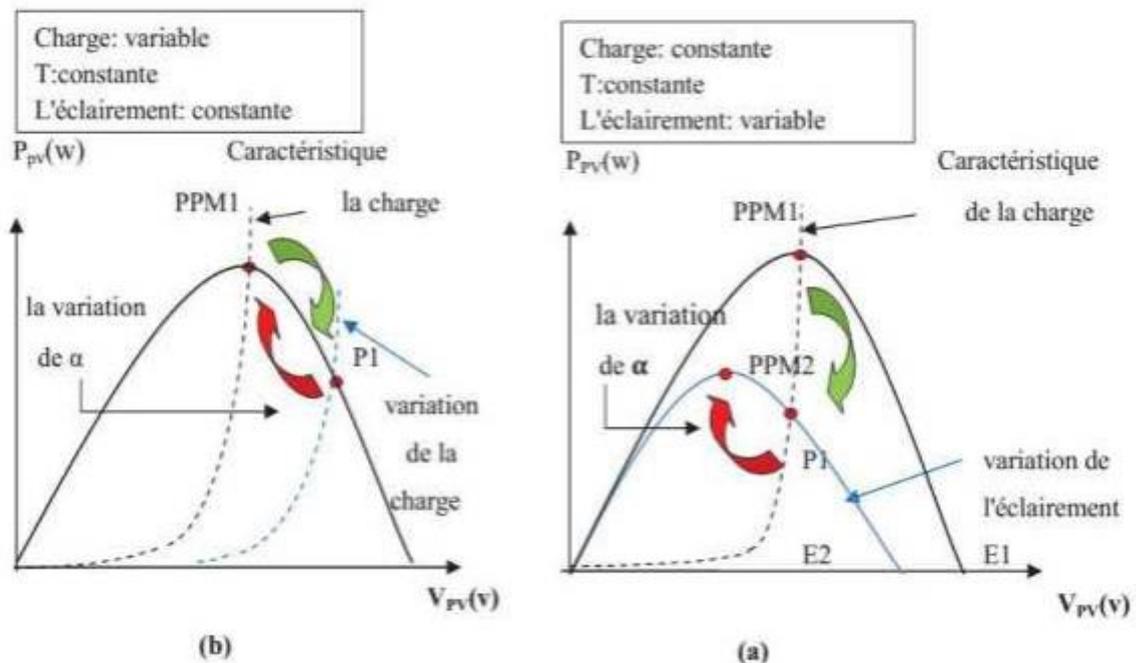
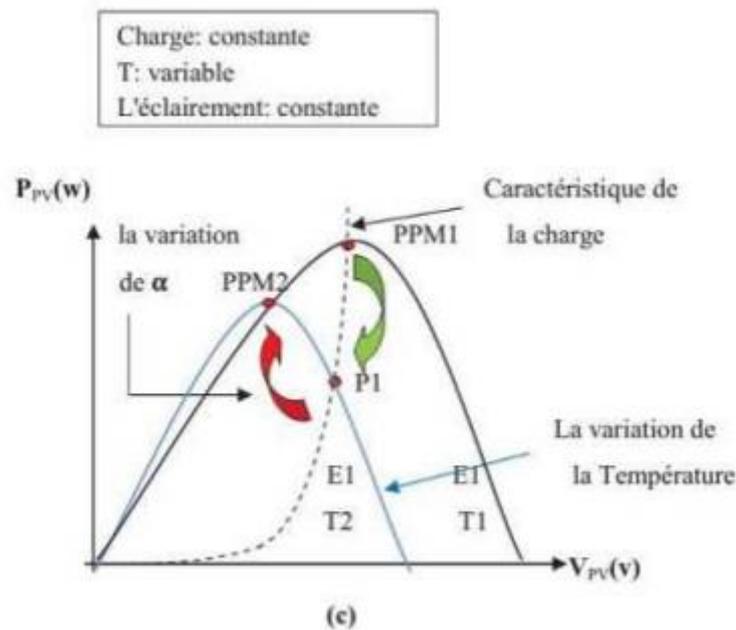


Figure.III.13 : Chaîne Élémentaire De Conversion Photovoltaïque.

La Figure III.18 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.





**Figure.III.14 : Recherche Et Recouvrement Du Point Puissance Maximale (A) Suite A Une Variation D'éclairement, (B) Suite A Une Variation De Charge, (C) Suite A Une Variation De Température.**

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lier aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande.

### III.6. Modèle dynamique du moteur asynchrone [49]

La MAS triphasés est représentée schématiquement par la Figure (III.15). Elle est munie de six enroulements.

- Le stator de machine est formé de trois enroulements fixes identiques décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et traversés par trois courants variables.

- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120°. Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

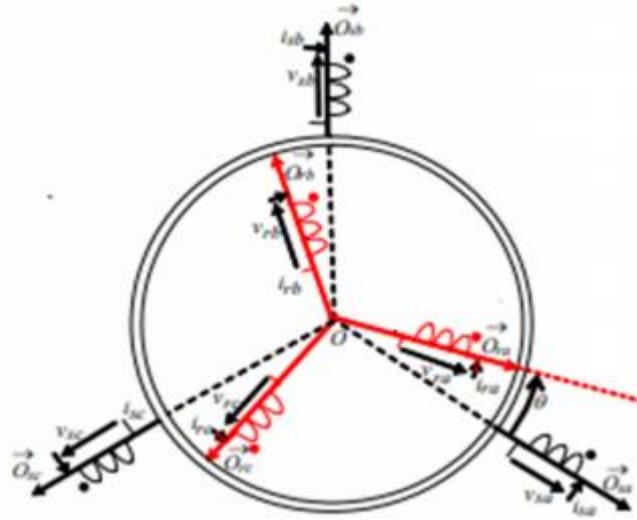


Figure.III.15 : Représentation Schématique De La Machine.[49]

La modélisation de ce type de moteur est traitée dans la majorité des cas dans le référentiel  $(\alpha, \beta)$  lié au stator ( $\omega_{\text{coor}}=0$ ), le système de l'équations est de la forme

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ U_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \\ 0 = U_{r\alpha} = R_r I_{r\alpha} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} + \varphi_{r\beta} \omega_r \\ 0 = U_{r\beta} = R_r I_{r\beta} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} + \varphi_{r\alpha} \omega_r \end{cases} \quad \text{(III.23)}$$

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \varphi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \varphi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{cases} \quad \text{(III.24)}$$

L'électromagnétique s'écrit comme suis :

$$C_e = \frac{3}{2} p M (i_{\alpha} \cdot i_{\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad \text{(III.25)}$$

Où ;

$U_{s\alpha}$ ,  $U_{s\beta}$  and  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  : Tensions satorique et courants dans le repère  $\alpha$ - $\beta$ , respectivement.

$R_s$ ,  $R_r$  : Résistance statorique et rotorique respectivement.

$L_s$ ,  $L_r$  : Inductance statorique et rotorique respectivement.

$\Psi$  : Flux.  $M$  : Mutuelle.

$\Omega_r$  : vitesse rotorique.

$C_e$  : Couple mécanique du moteur.

$P$  : Nombre paire de pole.

### III.7. Modèle de la pompe centrifuge [50]

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur [23 Hz set].

$$C_r = K_{ch} \cdot \omega^2 \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$K_{ch}$  désigne la constante de proportionnalité [(Nm/rad. s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>].

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge ( $Q$ ,  $H$  et  $P$ ) pour la vitesse  $N$ , les lois de similitude permettent de déterminer les performances ( $Q'$ ,  $H'$  et  $P'$ ) pour une vitesse  $N'$  en utilisant les relations suivantes :

$$Q' = Q \frac{N'}{N}, H' = H \left(\frac{N'}{N}\right)^2, P' = P \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \quad (\text{III.27})$$

Avec ;

$Q$  et  $Q'$  : Débits correspondants respectivement à la vitesse  $N$  et  $N'$ .

$H$  et  $H'$  : Hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse  $N$  et  $N'$ .

$P$ ,  $P'$  : Puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse  $N$  et  $N'$ .

**III.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur, système motopompe et commande MPPT est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits sur la base des modèles mathématiques. La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les modules solaires, avoir leurs caractéristiques et voire la performance de la commande MPPT, qui force le système PV à travailler autour de sa puissance maximale.

## ***Chapitre IV : Résultats de Simulation***

Sur l'environnement Matlab, nous avons défini chaque élément de notre système en se basant sur toutes les caractéristiques et les données fournies. Le modèle électrique du système de pompage photovoltaïque proposée est représenté dans la Figure IV.1

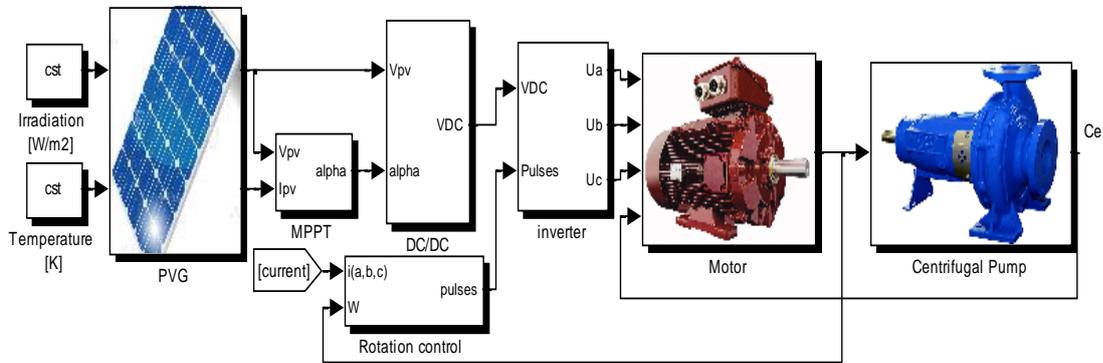


Figure.IV.1 : Système Photovoltaïque Pompage D'eau.

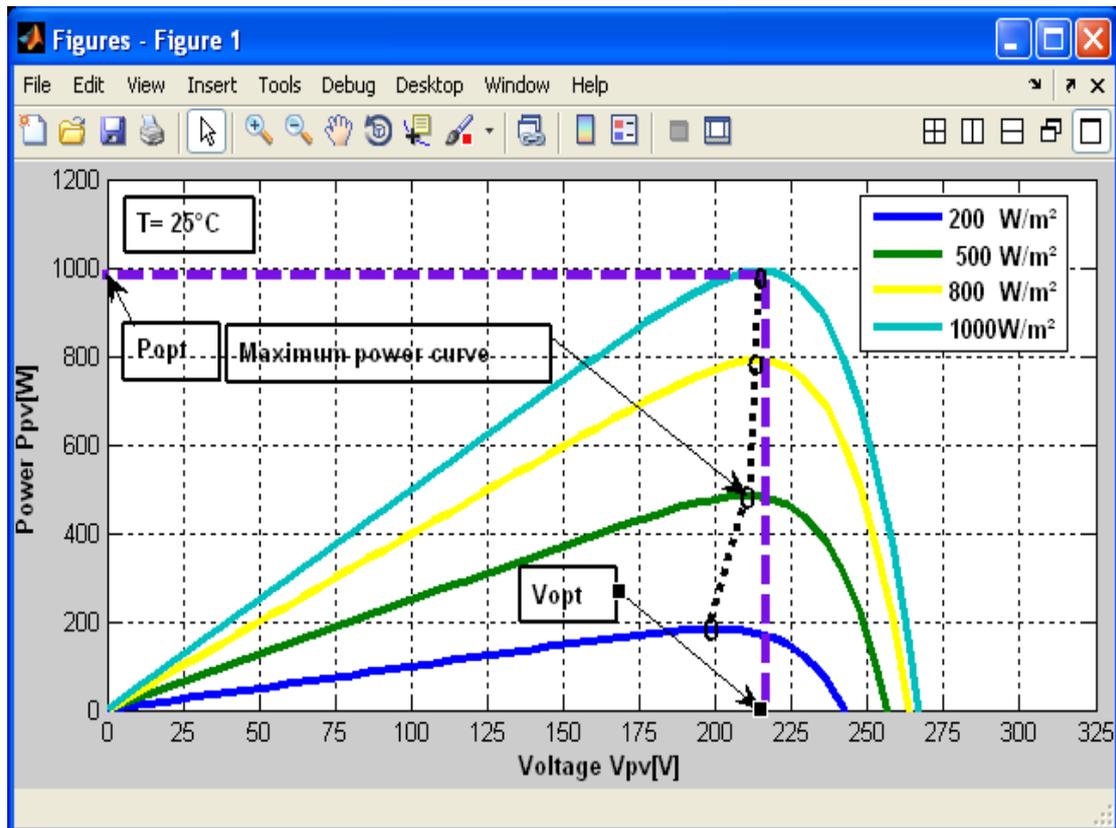


Figure. IV.2 : Caractéristique (Puissance- Tension).

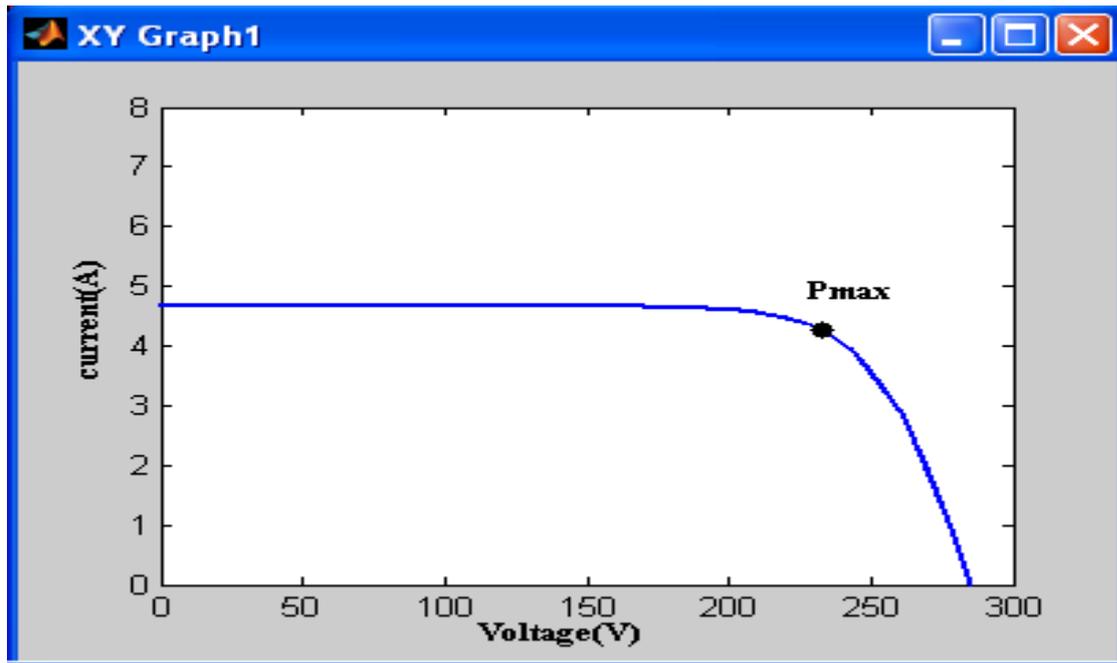


Figure IV.3 : Caractéristique Courante Tension.

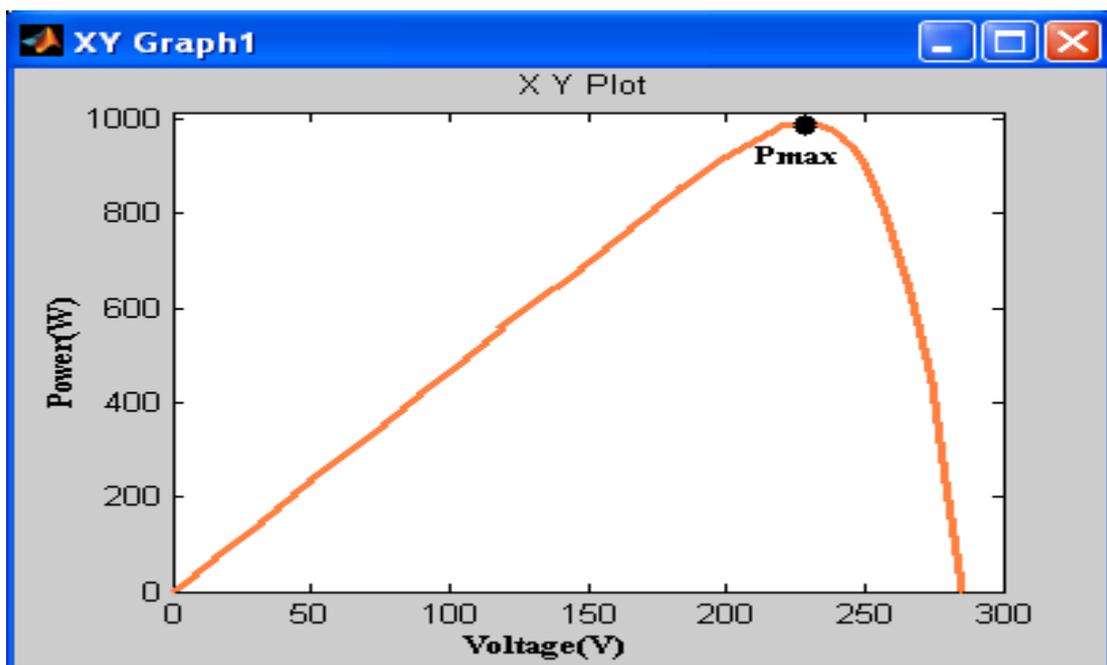


Figure IV.4 : Caractéristique Puissance Tension.

La figure IV.5 montre l'évolution du courant de sortie du GPV dont la commande appliquée donne la meilleure performance sauf pour un régime transitoire restreint pendant un temps de  $t=0.2s$ .

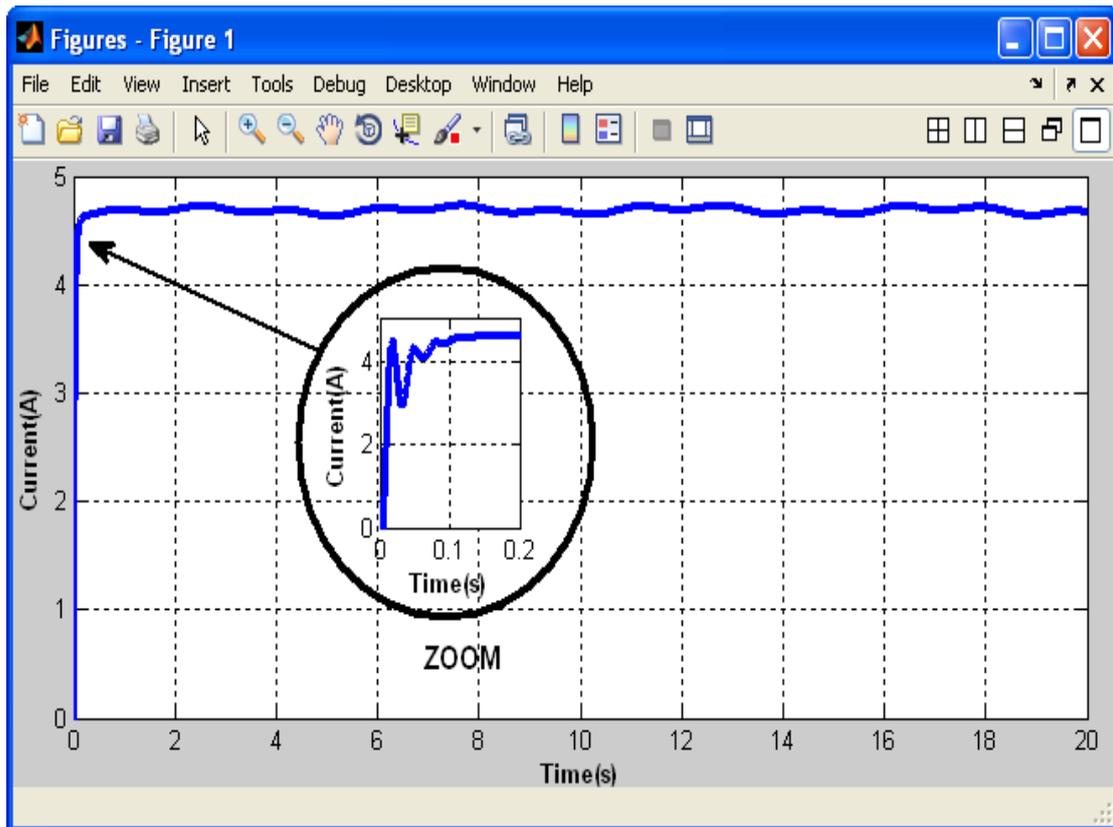


Figure IV.5 : L'évolution De Courant De Sortie Par Rapport Au Temps.

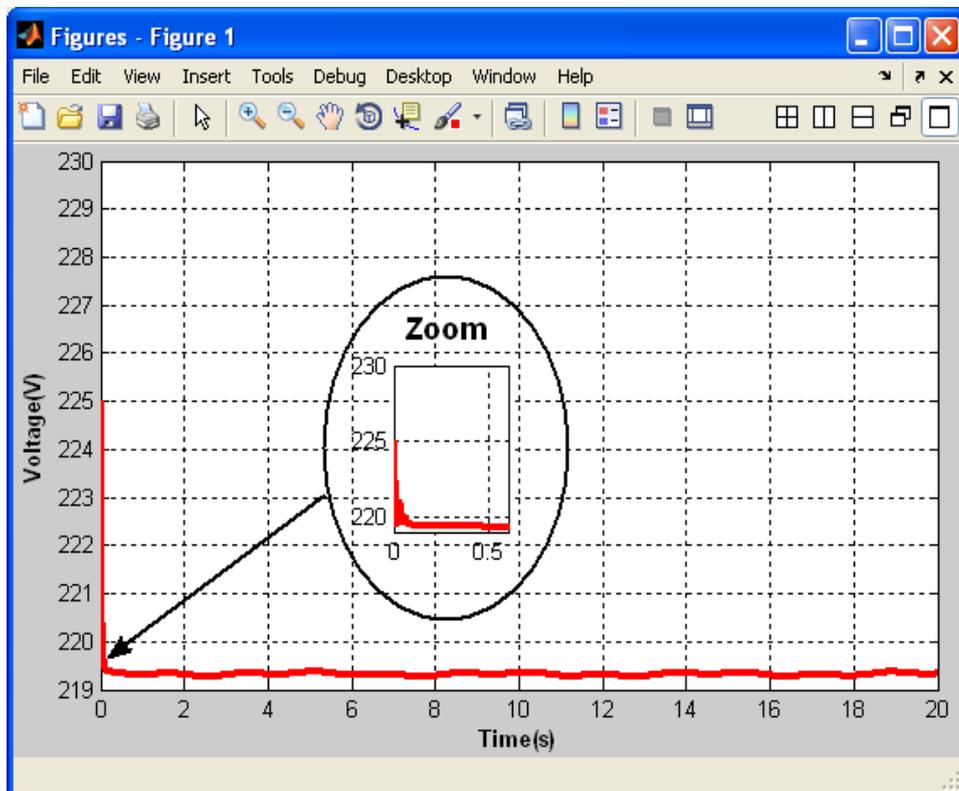


Figure IV.6 : L'évolution De Tension De Sortie Par Rapport Au Temps.

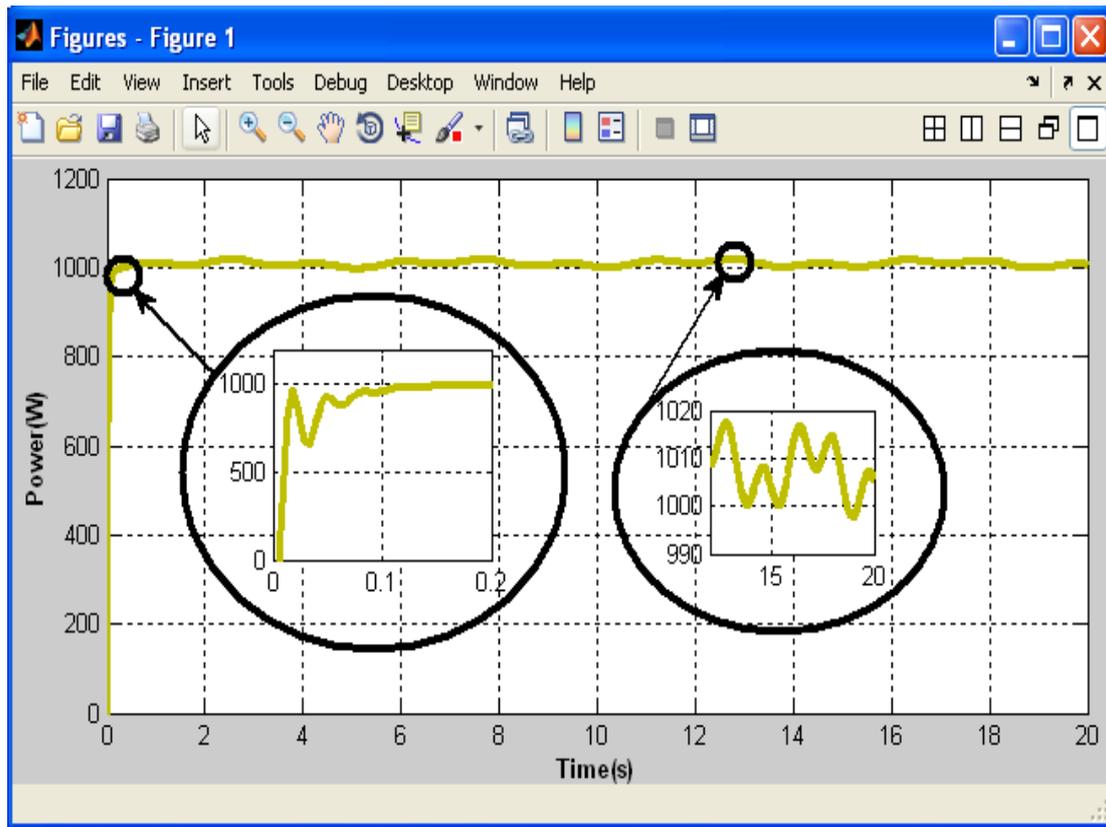


Figure IV.7 : L'évolution de puissance par rapport au temps.

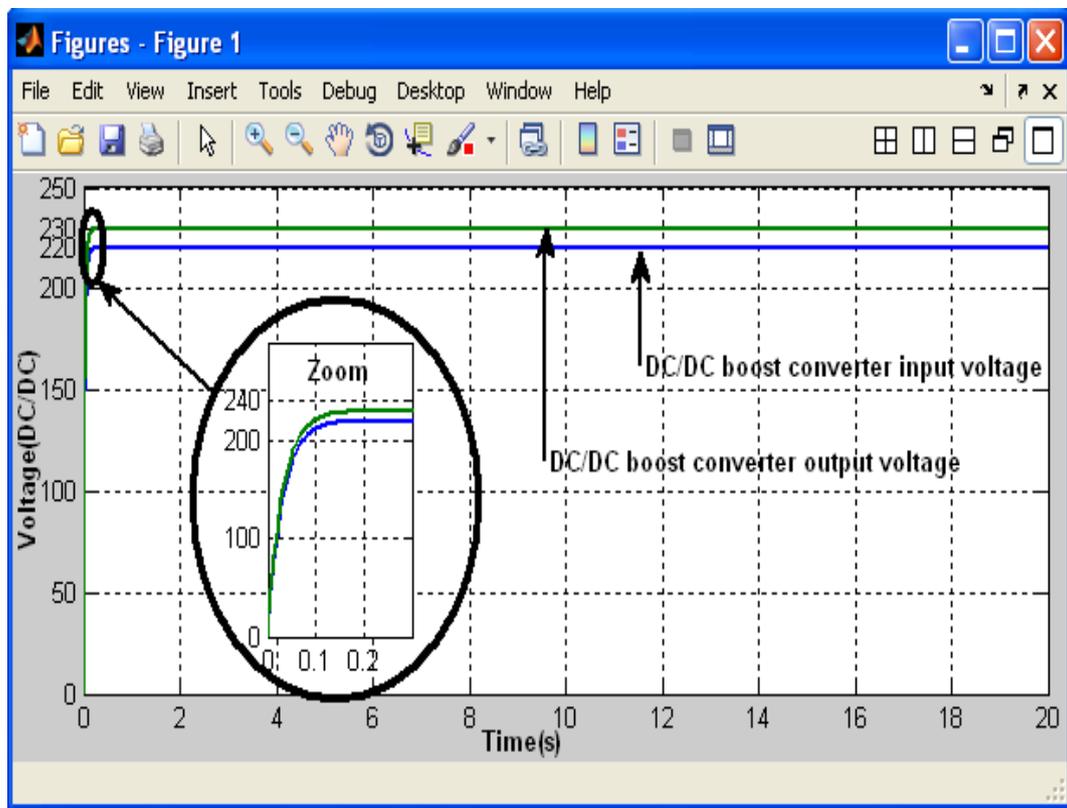
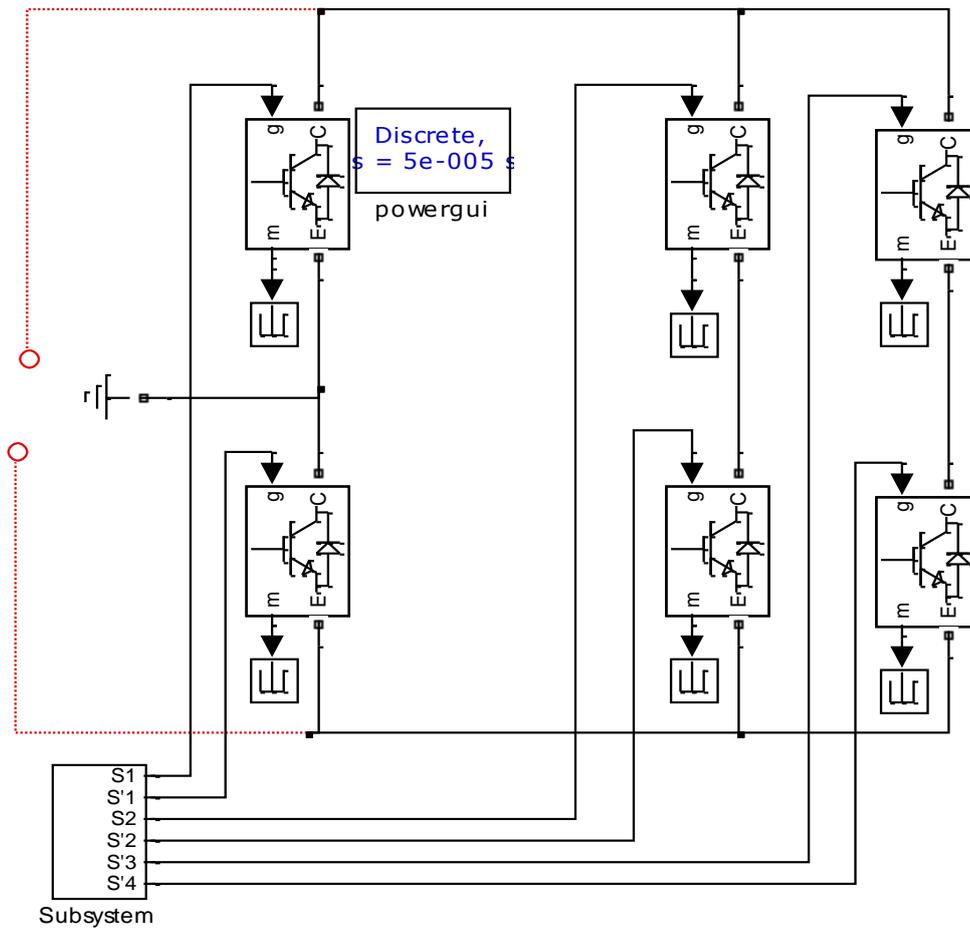


Figure IV.8 : La Caractéristique De Tension Avant Et Après L'utilisation De Convertisseur DC/DC.



**Figure.IV.9 Schéma Bloc De L'onduleur Triphasé.**

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.9 et Figure IV.10 représentent l'évolution des tensions simples  $v_{abc}(V)$  du réseau et l'évolution des tensions simples  $V_{abc}(V)$  générées par l'onduleur coté GPV respectivement.

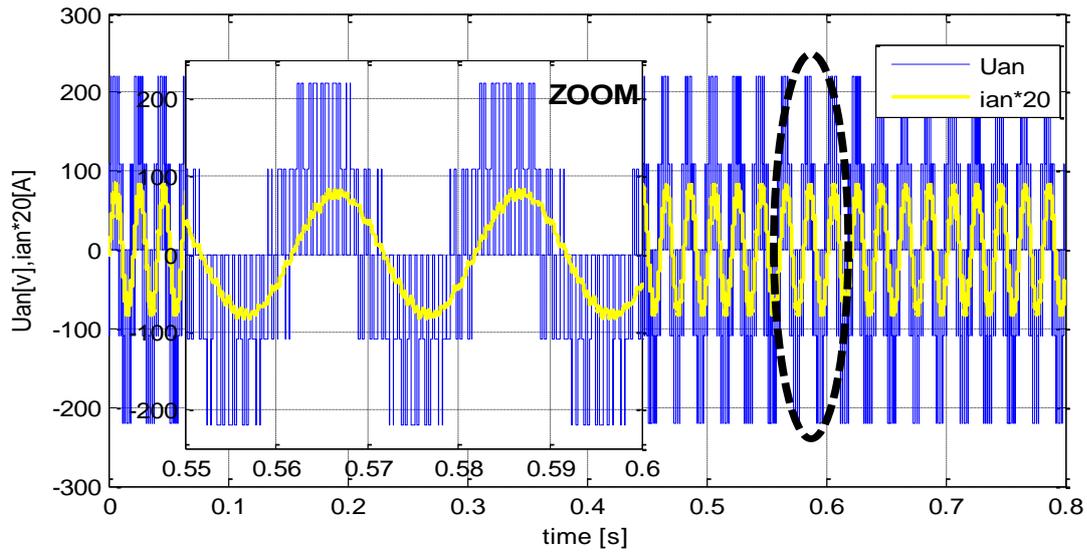


Figure IV.10 Tension Simple De Phase « A » Générées Par L'onduleur MLI.

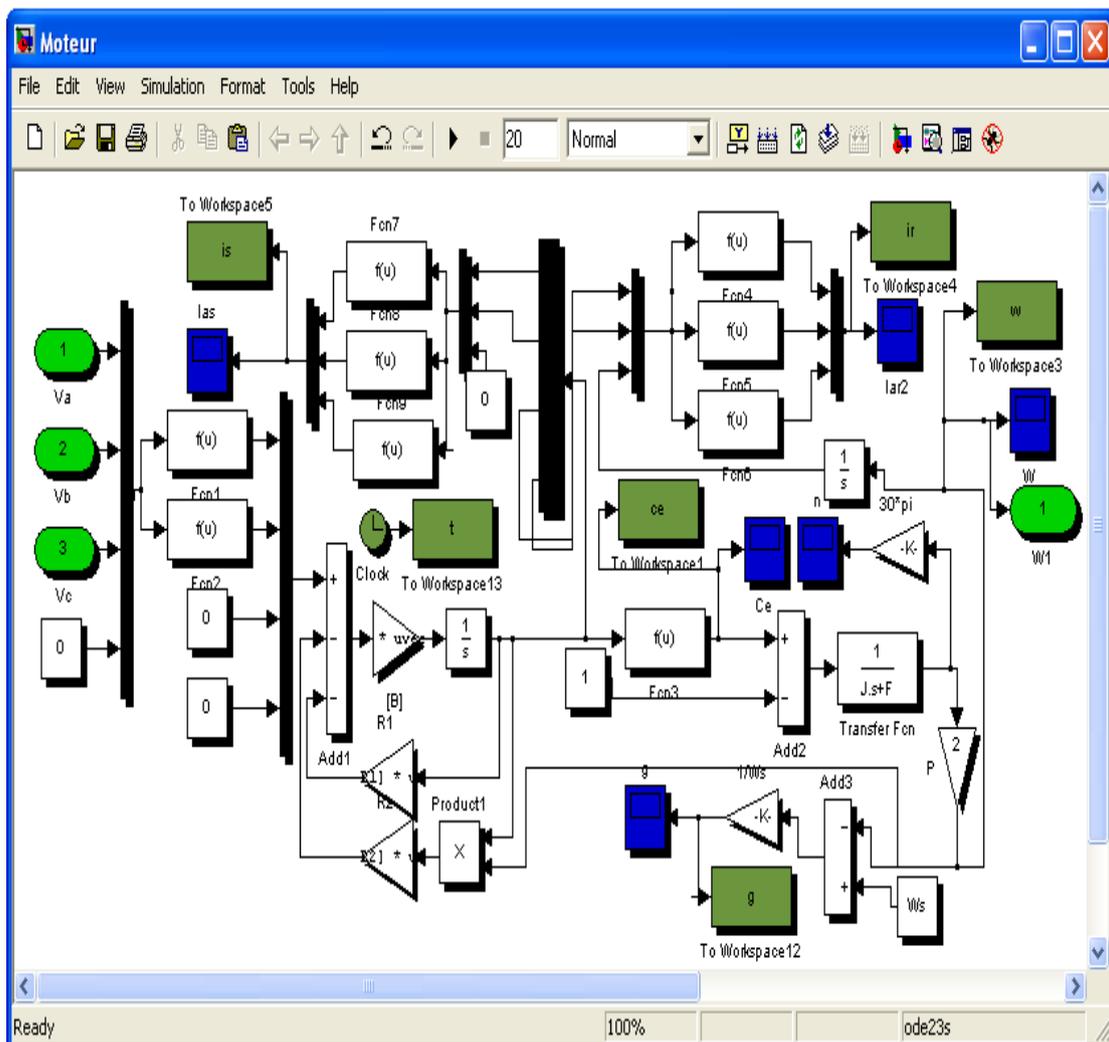


Figure IV.11 : Blocs De Simulation Du Moteur Asynchrone Sous Matlab/Simulink.

Les figures IV.12 et IV.13 représentent la caractéristique de courants triphasés statoriques par rapport au temps.

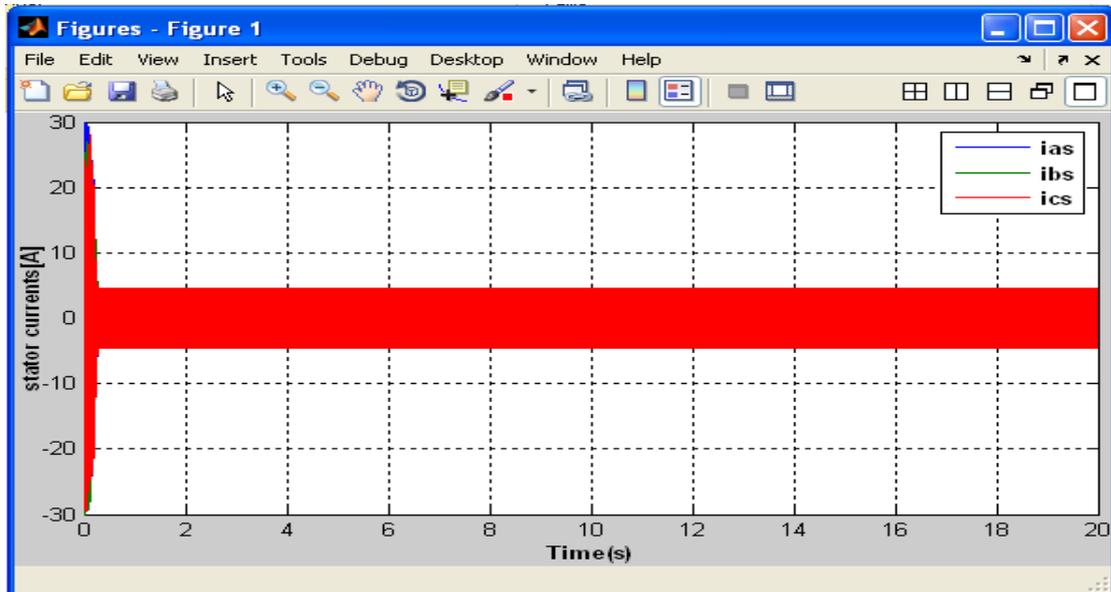


Figure.IV.12 : Les Courants Triphasés Statoriques.

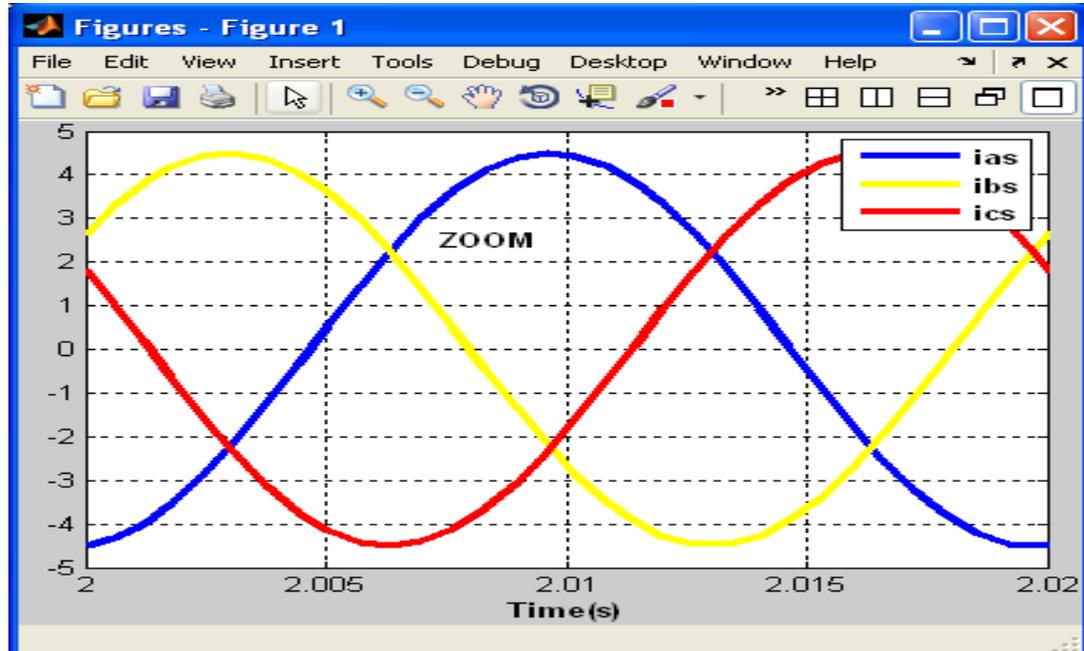
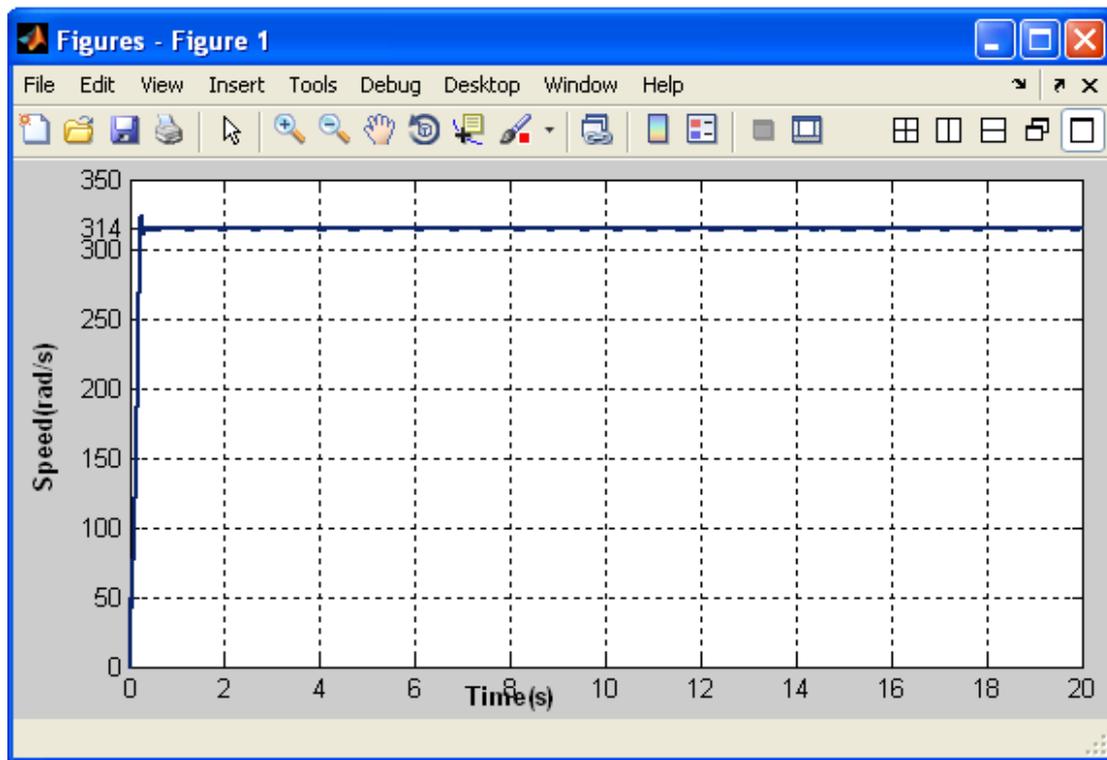


Figure.III.13 : Les Courants Triphasés Statoriques.



*Figure.IV.14 : La Caractéristique De Vitesse Rotorique Par Rapport Au Temps.*

## II. Conclusion :

La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les modules solaires, avoir leurs caractéristiques, qui force le système PV à travailler autour de sa puissance maximale.

Dans ce travail, on présente les résultats de simulation concernant les caractéristiques électrique dans l'environnement « Matlab » des générateurs photovoltaïques qui peut délivrer une puissance continue et un étage d'adaptation constitué d'un convertisseur DC/DC commandé par un signal PWM.

## *Conclusion générale*

La présente recherche a pour objectif de nous mettre sur la voie d'une possible exploitation de l'énergie solaire dans les zones rurales, arides et éloignées des distributeurs d'électricité.

En effet, nous Avon conçu un modèle de simulation pour un système de pompage à base de Panneaux solaires ou nous Avon assure la conversion en alimentation alternative par les biais des onduleurs.

D'abord, nous avons commencé par la présentation des déférant énergies renouvelables et leur domaine d'utilisation et donnée les avantages de ces énergies aussi.

Par ailleurs, nous retenons de nos résultats que les panneaux photovoltaïques sont caractérisés Par l'éclairement et la température.

Ensuite, Nous avons fait la modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque. On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode qui présenté un bon compromis entre simplicité et précision.

L'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale consiste la commande P&O « Méthode de perturbation et d'observation ». Le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque.

Enfin, les résultats de simulation montrent l'importance d'un système global.et on a montré l'importance d'un système de stockage et l'efficacité d'un algorithme de gestion dans ce type d'installation. Comme on a pu voir à partir des résultats de simulation, la diversité des modes de fonctionnement.

Pour conclure, le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est par conséquent une solution bien adaptée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation en milieu rural et dans Les zones éloignées des grands réseaux de distribution d'électricité.

## *Références*

[1] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.

[2] FEDDAOUI Omar. « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables » mémoire de magister. Université de Souk - Ahras– 2013-2014.

[3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_primaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_primaire).

[4] [www.tottal-direct-energie.com](http://www.tottal-direct-energie.com).

[5] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-secondaire-6936/>.

[6] [www.projet-eolien-pallieres.fr](http://www.projet-eolien-pallieres.fr).

[7] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne.fr>.

[8] <https://enerlice.fr/2017/05/15/eolienne-horizontale-contre-eolienne-verticale>.

[9] <https://www.geo.fr/environnement/energie-barrage-electricite-hydraulique>.

[10] Perte De L'hydraulique Dans La Production Mondial D'électricité d'origine renevablee en 2012 par rapport 2011.

[11] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>

[12] Bilan De Cycle Biomasse. Ardjoun Sid Ahmed El Mehdi.

[13] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-qu-une-energie-marine>

[14] <https://www.explorateurs-energie.com/index.php/enseignants/les-energies/geothermique>

- [15] Energie géométrique 17/10/2017 EDF
- [16] Z. Benjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de Magistère université de Bechar. Algérie 2009.
- [17] M. Belhadj, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, 2007/2008.
- [18] Royer T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de Cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [19] A.C. Postor, « Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïque », Projet de fin d'études, université Toulouse, septembre 2002.
- [20][http://www.aquaa.fr/images/stories/AQUAA/images/Solutions\\_tech/photovoltaique/sa\\_titre-2.jpg](http://www.aquaa.fr/images/stories/AQUAA/images/Solutions_tech/photovoltaique/sa_titre-2.jpg), 14 avril 2018.
- [21] F. Bendjoudi et F. Lakhdari, « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries ». Mémoire de Master université Bejaia 2014.
- [22][http://encyclopedieenergie.org/sites/default/files/images/articles/art167\\_fig7\\_systeme\\_pv\\_autonome\\_sans\\_stock.jpg](http://encyclopedieenergie.org/sites/default/files/images/articles/art167_fig7_systeme_pv_autonome_sans_stock.jpg), 14 avril 2018.
- [23] D. Y. Goswami, « Principles of Solar Engineering »; Taylor and Francis, second ed., 2000.
- [24] C. SERIR, « optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Ingénieur d'Etat En Electromécanique ; Université Bejaia, 2011/2012.
- [25] F. Mattra, « le stockage de l'électricité d'Origène photovoltaïque », année 2004/2005.
- [26] [https://www.ecosources.info/images/energie\\_industrie/silicium](https://www.ecosources.info/images/energie_industrie/silicium), 14 avril 2018.
- [27] I. Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Université de Havre, France 15 Décembre 2005.

- [28] B. Equer, « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [29] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000
- [30] A. BELHOCINE et S. ZAIDI, « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012.
- [31] <http://www.blackmersmartenergy.com/fr/comparativedata/centrifugal-pumpsvs-positive-displacement-pumps.html>, 14 avril 2018.
- [32] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique), 14 avril 2018.
- [33] M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA, « Le Pompage Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002.
- [34] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529>, 14 avril 2018.
- [35] K. EL-Melouani, « dimensionnement d'un hacheur survolteur ». Application note de polytech Clermont-Ferrand, FRANCE, 2010.
- [36] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur\\_Buck-Boost](http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost), 14 avril 2018.
- [37] O. BENSEDDIK et F. DJALLOUD, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.
- [38] C. BERNARD, C. SEBRAO-OLIVEIRA, B. LAVAL et C. VAUDOUEUR « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue » Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [39] V .Salas, E. Olias , A. Barrado, A.Lazaro, « Review of the maximum power point

tracking algorithms for stand –alone photovoltaic systems », solar Energy Materials & solar Cells , Vol :90, N°: 11,pp: 1555-1578,2006.

[40] S. Lalouni. « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie » Mémoire de magister, Université A. Mira de Bejaïa.

[41] BENDJOURI Faouzi, LAKHDARI Farid, Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batterie ; Université A. Mira de Bèjaia, Promotion juin 2014.

[42] F. SLAMA, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique », Mémoire de magister, Université Farhat Abbas Sétif, soutenu le 1/04/2011

[43] F. Haninou et A. Rouabah « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire Master 2, université Ouargla, 2014.

[44] R. Saisset, « Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph applique aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion », Thèse de Doctorat, Institut Nationale polytechnique de Toulouse, France, 2004.

[45] T. Markvart et L. Castaber «photovoltaics fundamentals and applications» preface guide to usage of the handbook by professional groups

[46] Y. Ammar, « Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystemes autonomes », Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2006.

[47] L. Zarour, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.

[48] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand –alone photovoltaic systems », solar Energy Materials & solar Cells, Vol :90, N° : 11, pp : 1555-1578,2006.

[49] C. SERIR, « optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Ingénieur d'Etat en Electromécanique ; Université Bejaia, 2011/2012.

[50] Lalouni Sofia, « Etude commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne). » de production d'énergie électrique, thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.