

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE ABDERAHMANEMIRA DE BEJAÏA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



mémoire fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de master

Filière : énergies renouvelables

Option : énergies renouvelables en électrotechnique

Thème :

Etude d'un système de pompage photovoltaïque

Realisé par :

- ❖ Mr.Agaoua idris
- ❖ Mr.Boudjemai khaled

encadré par :

Mm.srir

Promotion 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier le bon dieu pour nous avoir guidés à bien mener ce travail.

Nous tenons à présenter nos plus vifs et chaleureux remerciements à notre promotrice Mme S.serir professeur à l'université de Bejaïa, pour son aide, sa disponibilité et son soutien.

Nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions également les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur d'évaluer notre travail.

A toute personne qui as contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail

Dédicaces

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail à :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A la mémoire de mon grand-père, a ma grand-mère que dieux la protège et la garde pour moi, à mes sœurs et mes frères Kaltom, Samia, Sabiha, Lyes, Tilleli.

A mes très chers neveux Ayeman, Ayoub, Hani. A toute la famille AGAOUA.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A mon frère binôme Khaled qui a partagé ce travail avec moi.

A tous mes amis et mes collègues : Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

A toute la promotion génie électrique 2018/2019.

Idris

Dédicaces

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail à :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers toi maman.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A la mémoire de ma grand-mère que dieux la protège et la garde pour moi, à mes sœurs et mes frères

A ma petite sœur Sarah A toute la famille

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A mon frère binôme Idris qui a partagé ce travail avec moi.

A tous mes amis et mes collègues : Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

A toute la promotion génie électrique 2018/2019.

Khaled

Liste des figures

Chapitre I : L'énergie photovoltaïque et les systèmes de pompage photovoltaïque

Figure I.1 : Les composantes du rayonnement incident sur une surface inclinée.....	4
Figure I.2 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	6
Figure I.3 : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	7
Figure I.4 : Cellule en silicium monocristallin	7
Figure I.5 : Cellule en silicium poly-cristallin	8
Figure I.6 : Cellule en silicium amorphe.....	9
Figure I.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.8 : Association en série	10
Figure I.9 : Association en parallèle	11
Figure I.10 : système photovoltaïque autonome avec batteries	12
Figure I.11 : Système photovoltaïque autonome avec stockage	13
Figure I.12 : Les systèmes autonomes sans stockage	13
Figure I.13 : Système photovoltaïque relié au réseau	14
Figure I.14 : Système hybrides	15
Figure I.15 : La caractéristique du pompage au fil du soleil	17
Figure I.16 : Caractéristique du pompage avec batteries	18
Figure I.17 : Un système de pompage photovoltaïque	18
Figure I.18 : Moteur à courant continu avec balais	20
Figure I.19 : Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série.....	21
Figure I.20 : Machine synchrone	22
Figure I.21 : Machine asynchrone	23
Figure I.22 : Pompe Centrifuge	24

Figure I.23 : Hacheur série	26
Figure I.24 : Hacheur parallèle	27
Figure I.25 : Convertisseur Buck-Boost	28

Chapitre II : Modélisation et simulation des éléments d'un système de pompage photovoltaïque

Figure II.1 : schéma descriptif de système de pompage photovoltaïque	31
Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire	34
Tableau II.3 : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110.....	35
Tableau II.4 : Paramètres électriques du panneau SIEMENS SM 110-24.....	35
Figure II.5 : Schéma bloc du module SIEMENS SM 110-24V	36
Figure II.6 : Caractéristique courant-tension	36
Figure II.7 : Caractéristique puissance-tension.....	37
Figure II.8 : Influence la température sur la caractéristique $I=f(V)$	37
Figure II.9 : Influence la température sur la caractéristique $P=f(V)$	38
Figure II.10 : Influence ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$	38
Figure II.11 : Influence ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$	39
Figure II.12 : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique V-I.....	39
Figure II.13 : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique V-I.....	40
Figure II.14 : Montage volt-ampérométrique	41
Figure II.15 : Caractéristique I-V et P-V du module PV pour un faible éclairement.....	42
Figure II.16 : Caractéristique I-V et P-V du module PV pour un moyen éclairement	43
Figure II.17 : Caractéristique I-V et P-V du module PV pour un fort éclairement	44
Figure II.18 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost)	44
Figure II.19 : Principe de la P&O	46
Figure II.20 : Organigramme de la méthode perturbation et observation	47
Figure II.21 : Représentation du Moteur à courant continu et à aimant permanent	48

Figure II.22: Schéma bloc du moteur à courant continu	49
Figure II.23: Caractéristique du couple électromagnétique en fonction de temps	50
Figure II.24 : Caractéristique de la vitesse en fonction de temps	50
Figure II.25 : Schéma du bloc de la pompe	51
Figure II.26: Caractéristique de couple résistant de la pompe en fonction de temps	52
Figure II.27: Caractéristique de couple de charge et du couple électromagnétique de la pompe en fonction de temps.....	52

Chapitre III ; Expérimentation et Simulation du système de Pompage PV

Figure III.1 : Données de base d'une pompe.....	55
Figure III.2 : Schéma complet de l'installation de pompage PV à étudier.....	57
Figure III.3 : Générateur photovoltaïque avec support.....	57
Figure III.4 : Réservoirs d'eau et canalisation.....	58
Figure III.5 : Groupe motopompe immergée	59
Figure III.6 : Différents composants électriques	59
Figure III.7 : Schéma du système de pompage au fil du soleil.....	60
Figure III.8 : L'éclairement et la température durant La journée	60
Figure III.9 : L'éclairement et le débit durant La journée	61
Figure III.11 : Allure de la tension sous conditions standards	63
Figure III.12 : Zoom en régime permanent sur l'allure de la tension.....	63
Figure III.13 : Schéma bloc du système complet sous Matlab/Simulink.....	64
Figure III.114: Influence de l'éclairement et de la température sur le débit	65
Figure III.15 : Influence de l'éclairement et de la température sur la vitesse	65
Figure III.116: Influence de l'éclairement et de la température sur Couple électromagnétique	66
Figure III.17: Caractéristique du débit en fonction de la vitesse.....	66
Figure III.18: Schéma général du système de pompage PV avec la cloche	67
Figure III.119: Résultats de simulation durant la journée pour 5m.....	68

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: l'énergie et les systèmes photovoltaïques	
I .1.L'énergie photovoltaïque.....	3
I.1.1.Généralité.....	3
I 1.2. Définition.....	3
I .1.3.la ressource solaire.....	3
I.1.3.1. Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	4
I .1.4. La cellule photovoltaïque	5
I.1. 4.1.historique.....	5
I.1.4.2. Définition.....	5
I.1.4.3. Le principe de la conversion	5
I.1.4.4. Les différents types des cellules PV.....	6
I.1.4.4.1. Les cellules de première génération.....	7
I.1.4.4.2. Les cellules de deuxième génération.....	8
I.1.4.4.3. Les cellules de troisième génération	9
I.1.4.5. Schéma équivalent d'une cellule PV.....	9
I.1.4.6. Association des cellules photovoltaïques identiques.....	10
I.1.4.6.1. Association série.....	10
I.1.4.6.2. Association Parallèle.....	11
I.1.5. Les systèmes photovoltaïques.....	11
I.1.6.Les différents systèmes photovoltaïques.....	12
I.1.6.1 Les systèmes autonomes.....	12
I.1.6.2. Les systèmes raccordés au réseau.....	14
I.1.6.3. Les systèmes hybrides.....	14
I.1.7.Les différentes applications des systèmes photovoltaïques.....	15
I.1.7.1.Les systèmes photovoltaïques pour le chalet et le domicile.....	15
I.1.7.2Les systèmes photovoltaïques pour les applications mobiles et réactives.....	16

Sommaire

I.1.7.3. Les systèmes photovoltaïques en agricultures.....	16
I.1.7.4. Les systèmes photovoltaïques pour d'autres applications.....	16
I.1.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque.....	21
I.1.8.1. Avantages.....	16
I.1.8.2 Inconvénients.....	16
I.2. Les systèmes de pompage PV.....	17
I.2.1. Les différents types de pompage	17
I.2.1.1. Pompage au fil de soleil.....	17
I.2.1.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	18
I.2.2. Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque.....	18
I.2.2.1. Le groupe motopompe.....	19
I.2.2.1.1. Moteur électrique.....	19
I.2.2.1.2. les Pompe.....	23
I.2.3. Conversion d'énergie.....	25
I.2.3.1. Définition des convertisseurs statique.....	25
I.2.3.2. Convertisseur DC/AC (Les onduleurs).....	26
I.2.3.3. Convertisseur DC/DC (Hacheur).....	26
I.2.3.4 Le stockage.....	28
I.2.3.5. Le stockage électrochimique.....	28
I.2.3.6. La régulation (régulateur).....	29

Conclusion.

Chapitre II : Modélisation des éléments d'un système de pompage photovoltaïque

II.1. Description du système à étudier.....	31
II.2. Modélisation du générateur PV.....	32
II.2.1. Modélisation du générateur PV à l'état sain.....	32

Sommaire

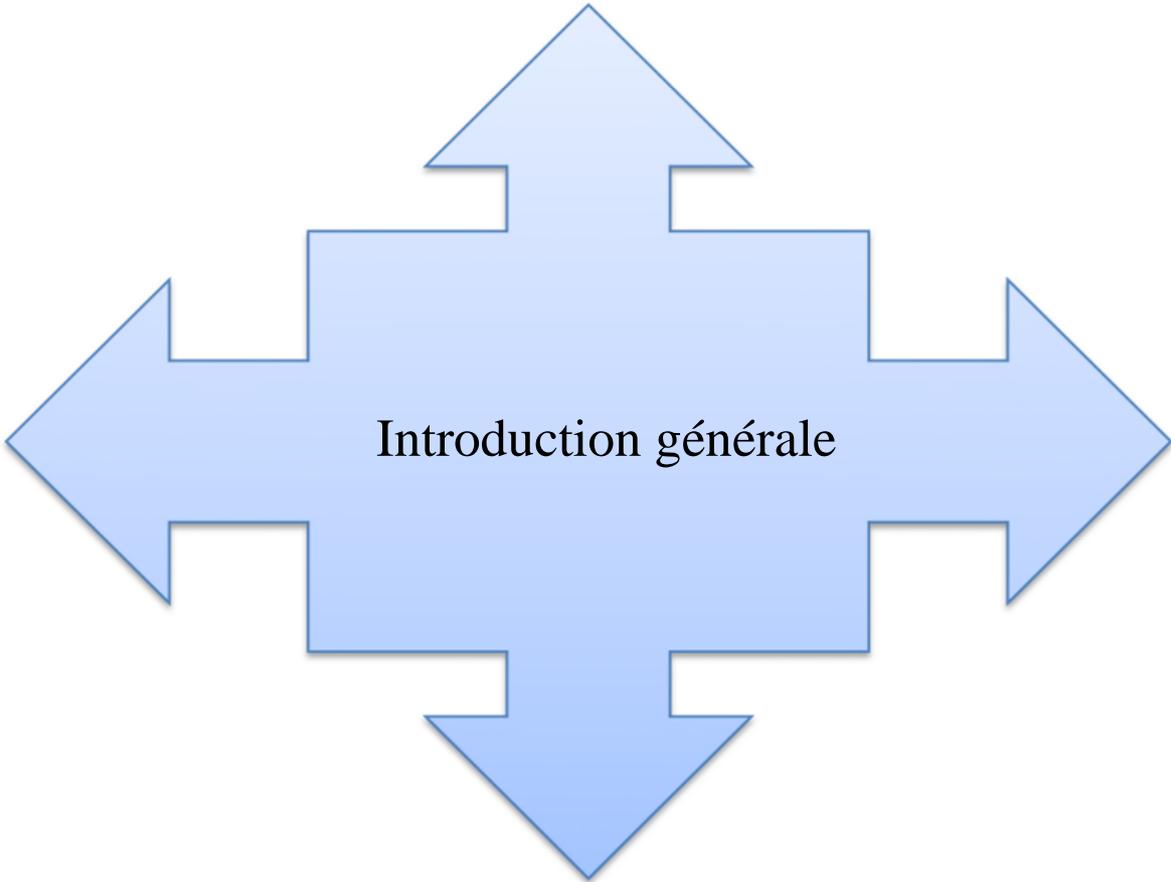
II.2.1.1. Modèle de la cellule solaire.....	32
II.2.1.2. Le modèle à une diode (à une seule exponentielle).....	33
II.2.1.2.1. Caractérisation électrique du module PV sous Matlab/Simulink.....	36
II.2.1.2.2. Caractérisation électrique du module PV avec la méthode voltampère- métrique et sous Matlab/Simulink.....	41
II.3. Modélisation des convertisseurs statiques.....	44
II.4. Adaptation de l'énergie photovoltaïque.....	45
II.5. Modélisation du moteur à courant continue à aimant permanent.....	48
II.6. Modèle mathématique de la pompe.....	51
Conclusion	

Chapitre III : Expérimentation et Simulation du système de Pompage PV

III.1. Données de base.....	54
III.1.1. Le débit.....	54
III.1.2. Hauteur manométrique totale (HMT)	54
III.1.3. Niveau statique.....	55
III.1.4. Niveau dynamique	55
III.2. Expressions utilisées dans le calcul.....	55
III.3. Etude d'un système de pompage photovoltaïque.....	57
III.3.1. Implantation du générateur photovoltaïque.....	57
III.3.2. Installation des réservoirs d'eau et de la canalisation.....	58
III.3.3. Mise en place du groupe motopompe.....	58
III.3.4. Partie électrique	59
III.4. Etude expérimentale du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	60
III.4.1. Les résultats obtenus.....	60
III.4.2. Commentaires des résultats.....	62
III.5. Application et simulation de la méthode perturbation et observation (P&O) sur un panneau photovoltaïque.....	62

Sommaire

III.6. La simulation du système de pompage.....	64
III.7. Comparaison entre les résultats pratique et simulation.....	67
III. 7. 1. Interprétation des résultats.....	68
Conclusion	



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Depuis ces dernières décennies la consommation énergétique mondiale a connu une très grande croissance et il semble qu'elles vont continuer à augmenter sous effet de la croissance du besoin en électricités dans le monde.

Pour couvrir ce besoin énergétique il semble que la solution la plus adéquate est de se convertir aux Energies Renouvelables pour leurs disponibilités en grand quantité et gratuitement, souplesse, simplicité.

Ce sont des énergies de l'avenir mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leurs potentiels puisque ses énergies renouvelables ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

Utiliser les énergies renouvelables présente de nombreux avantages .cela aide à lutter contre l'effet de serre en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère .cela participe de plus à une gestion intelligente des ressource locales a la création d'emplois.

Dans ce projet, nous présenterons l'étude d'un système de pompage photovoltaïque.

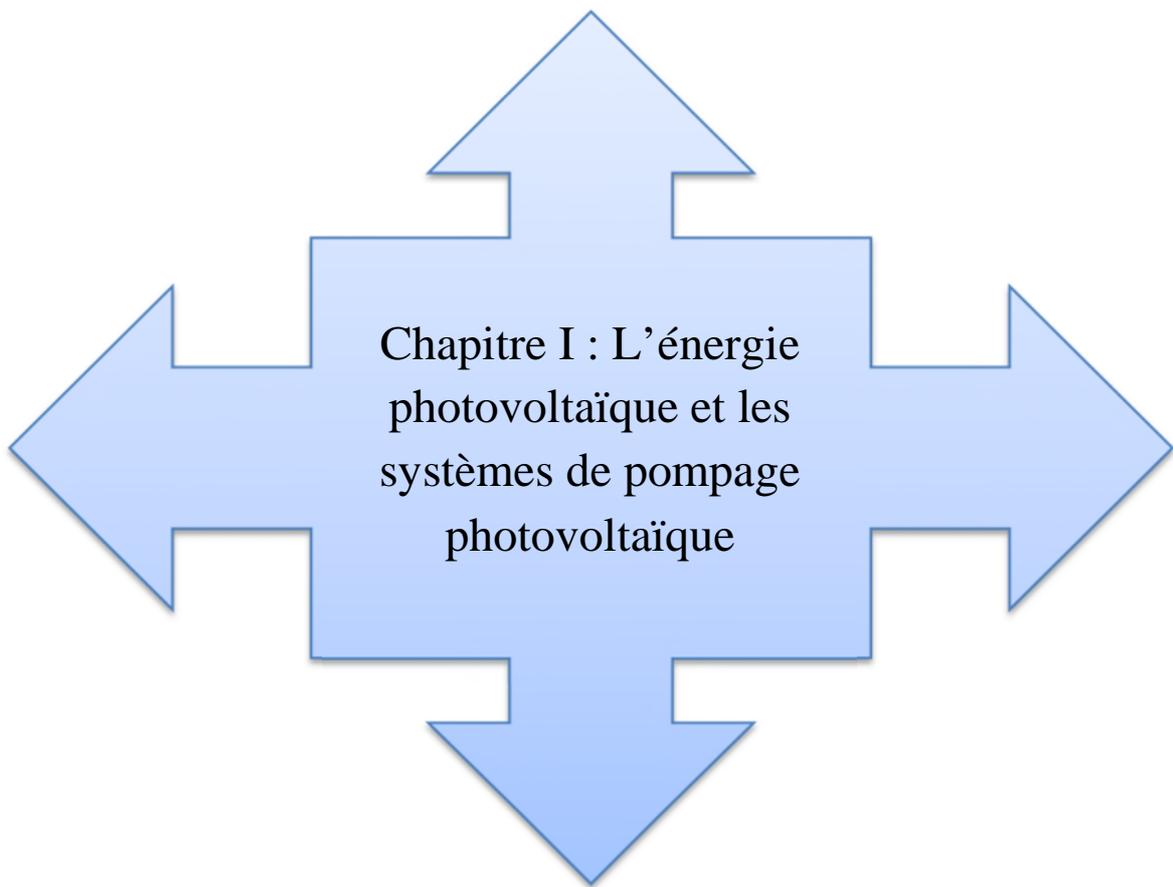
Le mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une approche générale sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre sera consacré pour la Modélisation des éléments d'un système de pompage photovoltaïque.

Le dernier chapitre fera l'objet d'une Simulation du système de Pompage PV.

On termine notre travail par une conclusion générale.



I .1.L'énergie photovoltaïque :

I .1.1.Généralité :

Le terme « photovoltaïque » est un mot latin, « photon » signifie lumière et « VOLTA » nom de famille du physicien italien (Alessandro VOLTA) qui donne son nom à l'unité de mesure de la tension électrique. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par ALEXANDRE EDMOND BECQUEREL qui a démontré qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. Cependant, à cette époque, il n'y avait pas d'utilisation pratique de cette découverte. En 1905, Albert EINSTEIN a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes et que la collision entre les photons et les atomes peuvent faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique [1]. Cette conversion se fait en présence de cellules solaires qui nécessitent étude et compréhension.

Dans ce chapitre nous vous présentons certains principes de la technologie photovoltaïque ainsi qu'une description des différents systèmes photovoltaïques.

I.1.2. Définition :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine du temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres.

I .1.3.la ressource solaire :

Le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète, Terre. Ces radiations énergétiques sont pratiquement la seule source d'énergie qui influe sur l'atmosphère et le climat sur terre. Le rayonnement solaire est électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm [2] L'énergie associée à ce rayonnement solaire est approximativement décomposée comme suit :

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

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement solaire d'une puissance moyenne 1367W/m^2 . Mais, l'atmosphère absorbe une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

I .1.3.1. Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère [2] :

Les phénomènes atmosphériques influent sur le rayonnement solaire reçu sur la surface de la terre. Ces phénomènes sont la nébulosité, les poussières, l'humidité, la couverture du sol,...etc. L'éclairement solaire sur un plan d'une inclinaison donnée est composé de grandeurs suivantes (Figure I.1) :

- **Eclairement direct** : C'est le rayonnement solaire reçu directement du Soleil.
- **Eclairement diffus** : C'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages
- **Eclairement réfléchi** : C'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neige, eau, etc.).

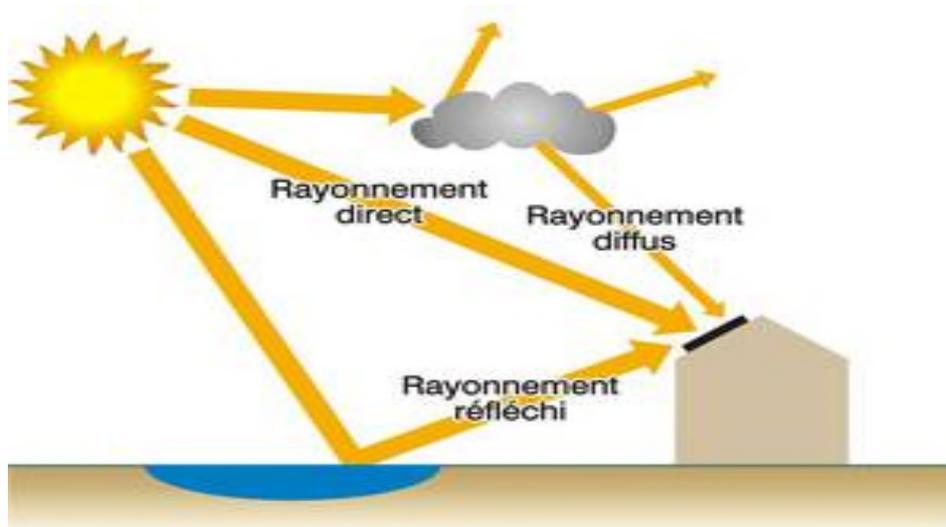


Figure I.1 : Les composantes du rayonnement incident sur une surface inclinée.

I .1.4. La cellule photovoltaïque (PV)

I .1.4.1.historique [3] :

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

I.1.4.2. Définition [4]

Une cellule photovoltaïque ou la photopile est l'élément de la base de la conversion photovoltaïque elle est assimilable à une diode photosensible .son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteur qui ont pour rôle de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique

I.1.4.3.Le principe de la conversion [5]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties,

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel (Figure I.2):

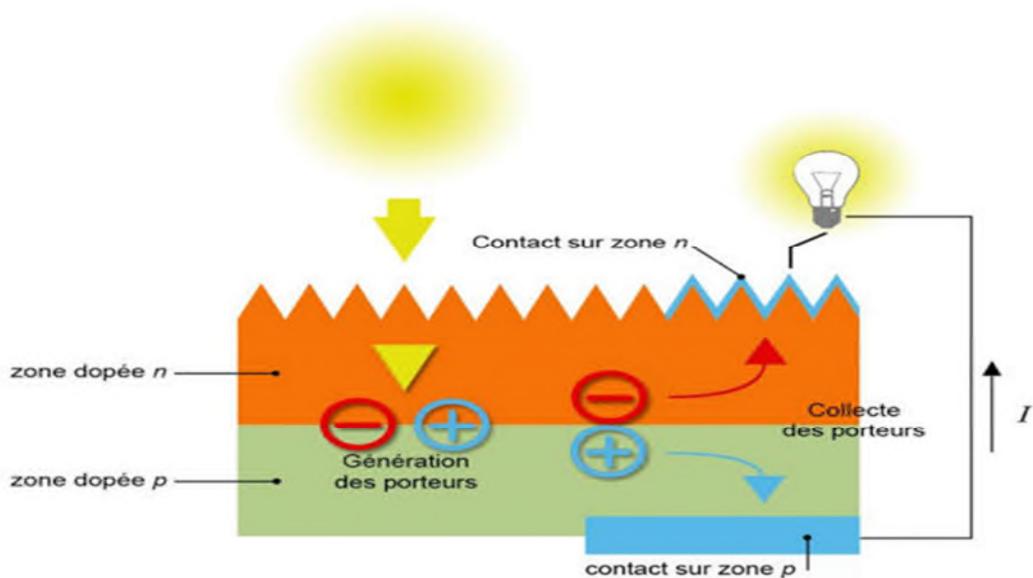


Figure I.2 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

I.1.4.4. Les différents types des cellules PV [5]

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type mono, poly cristallin ou amorphe. On distingue trois générations selon leur technologie de fabrication

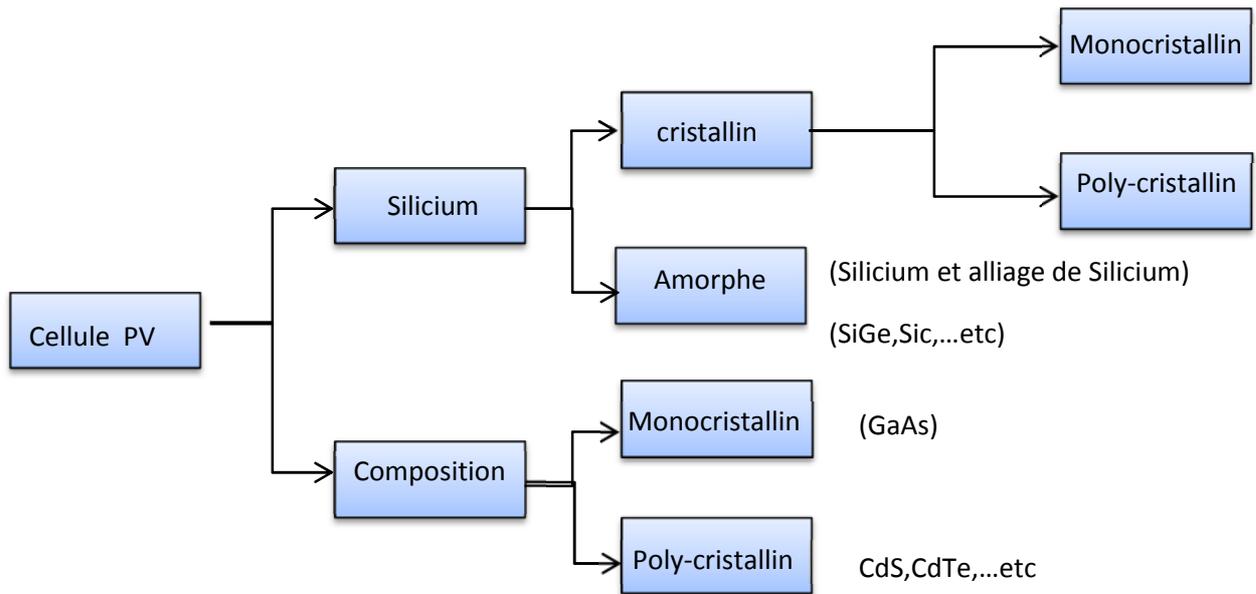


Figure I.3: Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

I.1.4.4.1. Les cellules de première génération

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. On différencie les cellules en silicium monocristallin et poly-cristallin.

❖ Cellule en silicium monocristallin :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elles ont un bon rendement, mais la méthode de production est laborieuse [6].

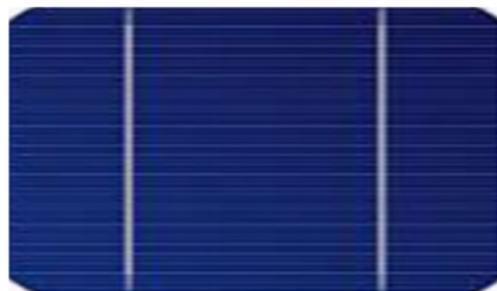


Figure I.4 : Cellule en silicium monocristallin

- **Avantages et inconvénients**

- ✓ Très bon rendement
- ✓ Sensibilité accrue aux rayonnements directs.
- ✗ Coût élevé
- ✗ Rendement faible sous un faible éclaircissement.

- ❖ **Cellule en silicium poly-cristallin**

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est bleu, mais n'est pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux



Figure I.5 : Cellule en silicium poly-cristallin.

- ❖ **Avantages et inconvénient**

- ✓ Bon rendement (moins bon que les cellules monocristallines).
- ✓ Coût moins élevé que pour les cellules.
- ✓ Sensibilité accrue aux rayonnements directs.
- ✗ Forte sensibilité à la température.

I.1.4.4.2. Les cellules de deuxième génération

- ❖ **Les cellules amorphes :**

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus

régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines.

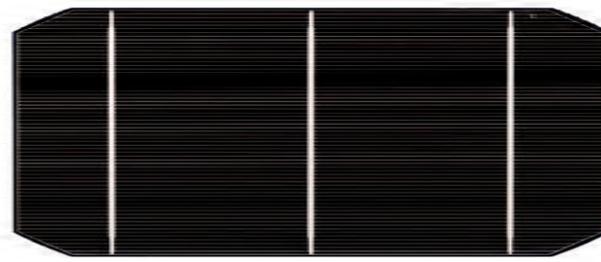


Figure I.6 : Cellule en silicium amorphe

Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (montres, calculatrices) mais sont peu utilisées dans le cadre des installations solaires.

❖ **Avantages et inconvénient**

- ✓ Moins chères que les autres
- ✓ Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs. .
- ✗ Rendement faible en plein soleil (environ 6%).
- ✗ Performances qui diminuent sensiblement avec le temps

I.1.4.4.3. Les cellules de troisième génération

La troisième génération vise à passer la limite maximale du rendement des cellules actuelles, plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :

- ✓ Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes).
- ✓ Cellule à concentration.
- ✓ Utilisation de photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas abordé par des cellules.
- ✓ Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur.

I.1.4.5. Schéma équivalent d'une cellule PV [7]

La cellule photovoltaïque est généralement représentée par un schéma équivalent constitué par :

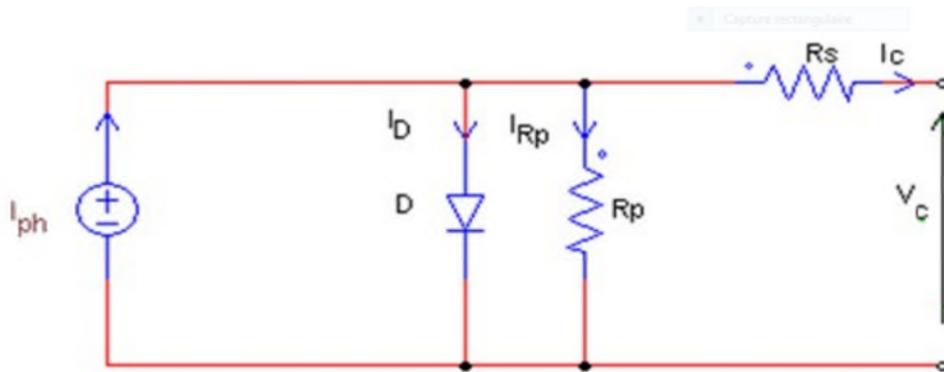


Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

- Un générateur de courant représentant la conversion du flux lumineux en énergie électrique.
- Une résistance série R_s représentant les contacts et les connexions.
- Une diode en parallèle représentant la jonction PN de la cellule.
- Une résistance parallèle R_p représentant les pertes actives dans la diode.

I.1.4.6. Association des cellules photovoltaïques identiques [8] :

I.1.4.6.1. Association série:

En additionnant les cellules ou les modules photovoltaïques identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. (Figure I.8) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série : [8]

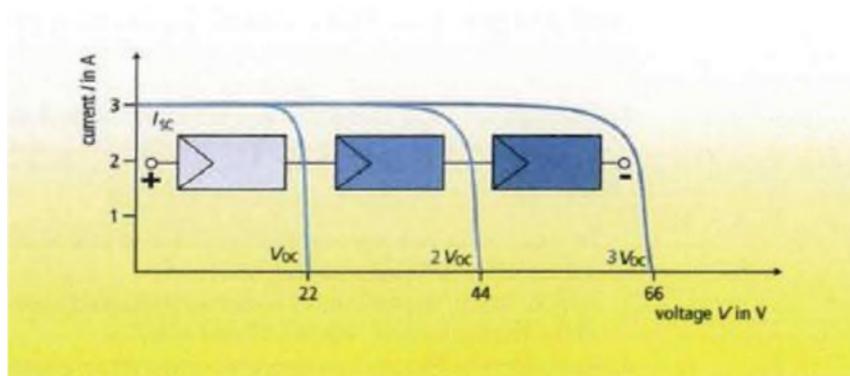


Figure I.8 : Association en série [9]

I.1.4.6.2. Association Parallèle: [8]

En additionnant les modules identique en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité de courant augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche la (Figure I.9) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identique en parallèle :

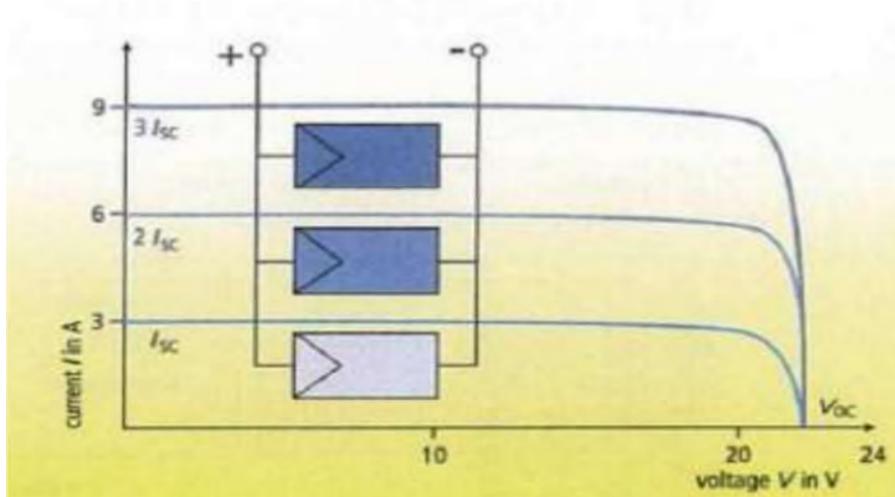


Figure I.9 : Association en parallèle. [9]

I.1.5. Les systèmes photovoltaïques [10]

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. L'humanité peu utilisée cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité. Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteur qui permet de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissance différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

I.1.6. Les différents systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type choisi dépendra des besoins, de l'emplacement et de budget.

I.1.6.1 Les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil)

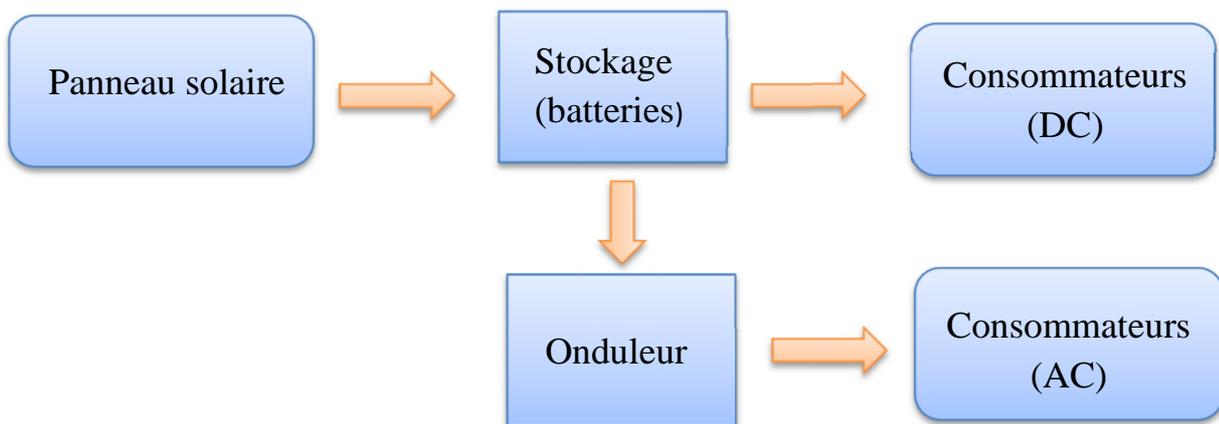


Figure I.10 : système photovoltaïque autonome avec batteries

➤ Les systèmes autonomes avec stockage

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 (I.11). 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.

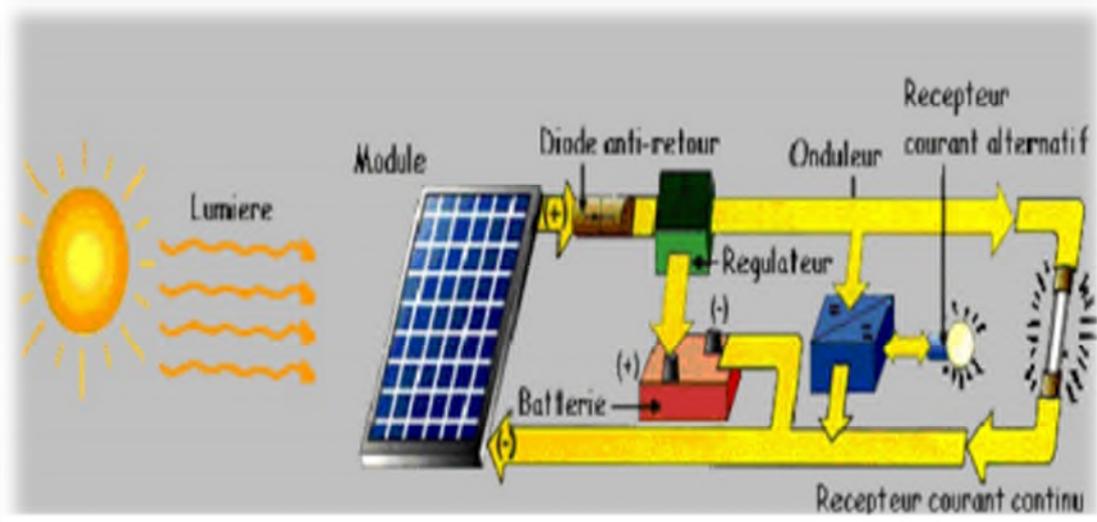


Figure I.11 : Système photovoltaïque autonome avec stockage

➤ **Les systèmes autonomes sans stockage :**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairement solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairement solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairement le plus faible.

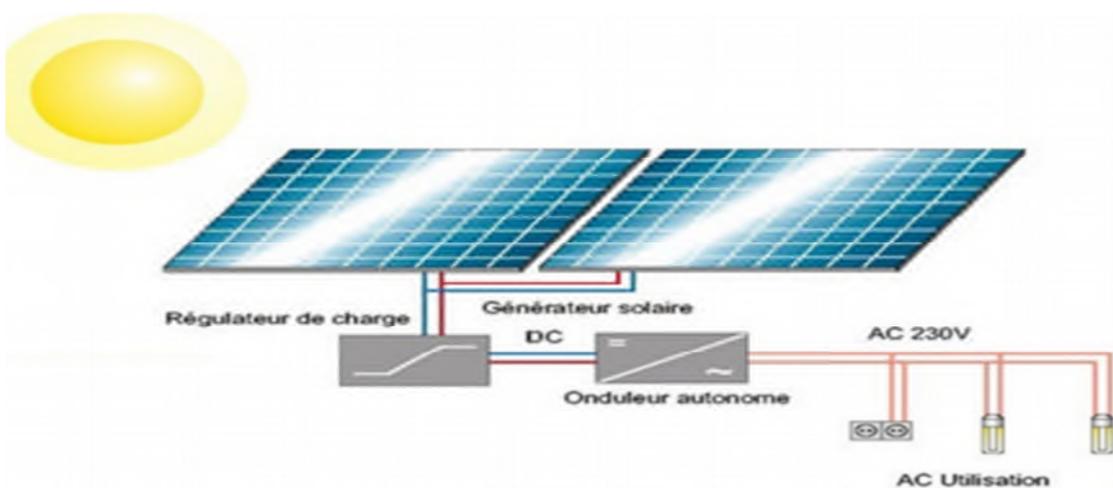


Figure I.12 : Les systèmes autonomes sans stockage

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique.

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et fonction du rayonnement solaire.

I.1.6.2. Les systèmes raccordés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau (Figure I.13) permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public, et dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans certains cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

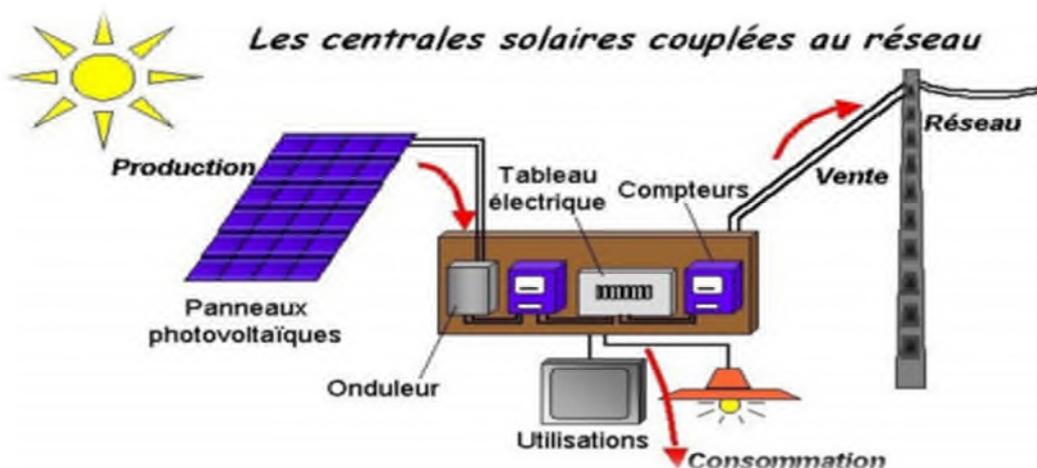


Figure I.13 : Système photovoltaïque relié au réseau.

I.1.6.3. Les systèmes hybrides :

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [1]

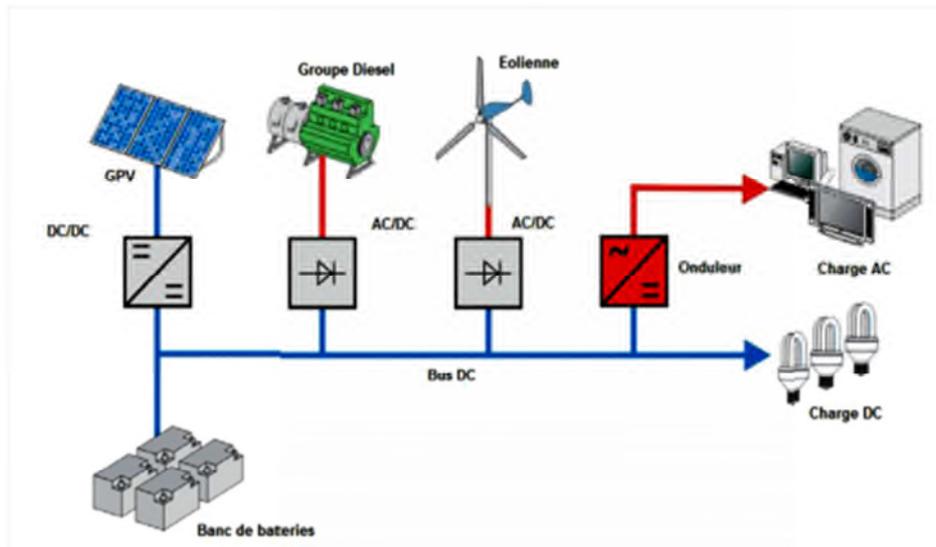


Figure I.14: Système hybrides. [11]

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit.

I.1.7. Les différentes applications des systèmes photovoltaïques : [12]

Des milliers de systèmes PV sont utilisés dans le monde aujourd'hui dans diverses applications. En voici quelques exemples :

I.1.7.1. Les systèmes photovoltaïques pour le chalet et le domicile :

En générale, les systèmes photovoltaïques sont une option économique pour les chalets et les domiciles situés dans des régions isolées. Dans la plupart de ces régions, il est impossible de se relier au réseau électrique et, dans de nombreux cas, de combustible fossile coûteux est utilisé afin de produire de l'électricité. Si un domicile est relié au réseau, les systèmes photovoltaïques lui donneront la source autonome d'électricité dont il pourrait avoir besoin pendant une panne d'électricité.

I.1.7.2 Les systèmes photovoltaïques pour les applications mobiles et réactives :

Les utilisateurs de véhicules et de bateaux de plaisance ainsi que les nombre d'expédition peuvent aussi profiter du fonctionnement silencieux et sans pollution des systèmes photovoltaïques portatifs pour recharger des piles

I.1.7.3. Les systèmes photovoltaïques en agricultures :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés efficacement dans le monde entier afin de pomper de l'eau pour le bétail, les plantes ou les êtres humains. Étant donné que le besoin en eau est plus grand les jours chaud et ensoleillés, ces systèmes conviennent parfaitement aux applications de pompage .il fournissent également l'énergie de clôture électrique dans les fermes.

I.1.7.4. Les systèmes photovoltaïques pour d'autres applications :

Les systèmes photovoltaïques peuvent être adapté pour répondre à tout besoin ,petit ou grand par exemple, les cellules photovoltaïques sont utilisé dans les calculatrices et les montre .aussi, le matériel de télécommunication , les panneaux de construction routiers , les feux de stationnement et les signaux d'avais au navigateurs sont d'excellentes applications pour Les systèmes photovoltaïques .

I.1.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque [13]

I.1.8.1. Avantages

- Source d'énergie gratuite (le soleil)
- Pas de gaz polluant, ni de bruit
- Entretien minimal pour un bon fonctionnement
- Pas de parties mobiles, peu d'usure dans le temps
- Systèmes modulaires fonction du besoin, faciles à monte
- Autonomie

I.1.8.2 Inconvénients :

- Technologie à ces débuts, encore peu diffusée, donc chère
- Energivore à la fabrication
- Production non continue d'énergie (jour/nuit, été/hiver), énergie intermittente

- Intégration au bâti (forme, couleur)

I.2. Les systèmes de pompage PV [14] :

I.2.1. Les différents types de pompage [15] :

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles: Dans la première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; On parle alors d'un « pompage au fil du soleil ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard, le soir par exemple). La deuxième méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci, via des batteries. L'énergie stockée la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau.

I.2.1.1. Pompage au fil de soleil [16] :

Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plus part des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au 'fil du soleil' où le moteur d'entraînement est directement couplé au générateur sans stockage d'énergie (la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'éclairement). Cet arrangement est bien adapté aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas une opération continue durant toute la journée, aussi, les horaires de cette production ne sont pas compatibles avec les horaires de la majorité des activités agricoles. (Elles commencent généralement à débiter vers 8h et fonctionnent à leur maximum de 11h à 13h et s'arrêtent vers 17h, soit environ 8 heures de fonctionnement par jour).

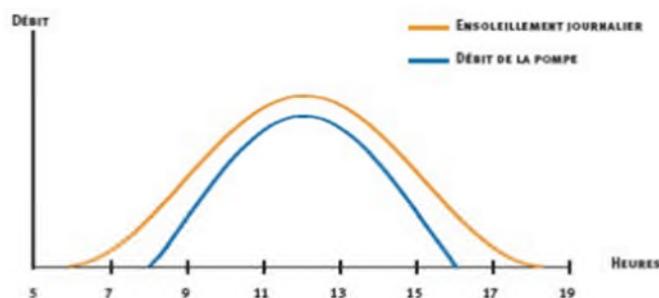


Figure I.15 : La caractéristique du pompage au fil du soleil.

- Le pompage au fil du soleil est suffisant, la pompe est mise en route.
- La nuit ou quand le rayonnement devient trop faible, la pompe s'arrête.

I.2.1.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) [16] :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement ou nécessite une intensité régulière, pour remédier à ces limitation, une batterie est ajoutée au système.

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.

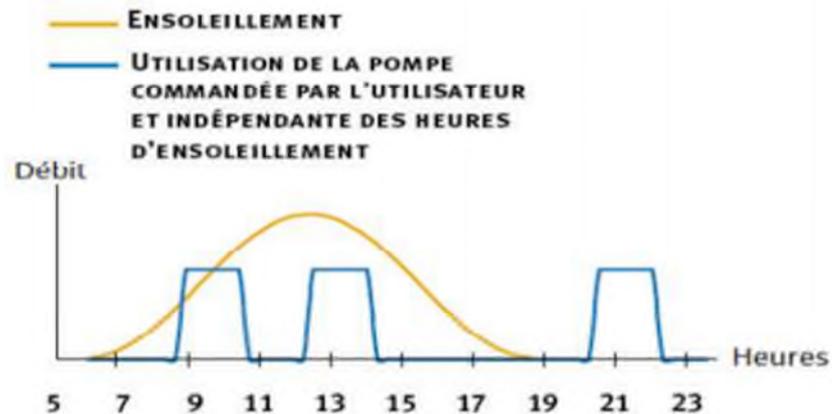


Figure I.16 : Caractéristique du pompage avec batteries.

I.2.2. Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque [17] :

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué de (Figure I.17) :

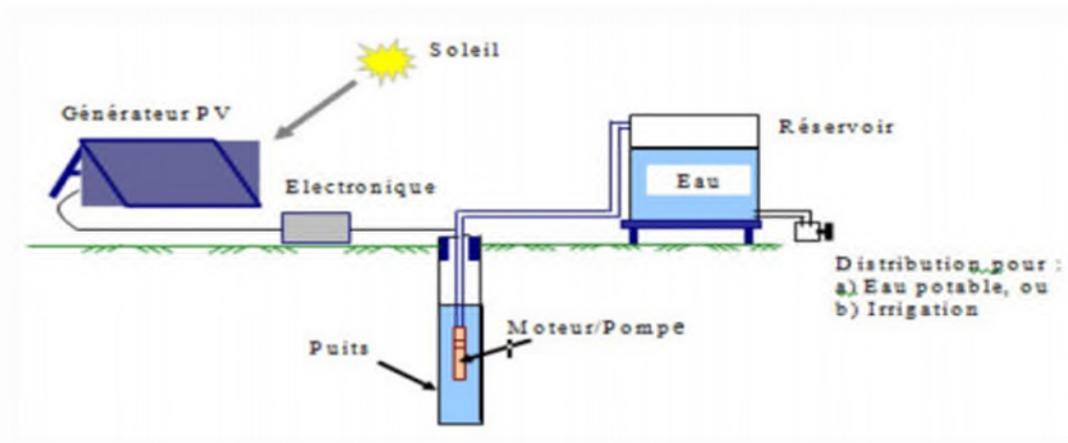


Figure I.17 : Un système de pompage photovoltaïque.

- Un générateur, constitué de modules photovoltaïques; eux-mêmes constitués de cellules au Silicium mono ou poly-cristallin.
- Un groupe électro- pompe, qui se décompose en deux parties : un moteur et une pompe généralement centrifuge multicellulaire.
- Une tuyauterie amont et aval.
- Autres éléments peuvent être associés à ce système, et qui dépendent de sa technique de conception ; tels que :
- Un équipement électronique (système de commutation, onduleur, hacheur,etc.)
- Un équipement de stockage (accumulateurs, réservoirs, batteries,etc.)

I.2.2.1. Le groupe motopompe :

Un groupe motopompe immergé, constitue de l'association d'un moteur électrique et d'une pompe. Différents types de moteurs et de pompes sont utilisés

I.2.2.1.1. Moteur électrique [18]

Le moteur électrique d'une électropompe, que ce soit en courant continu (CC) ou alternatif (CA), permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Pour une installation de pompage solaire photovoltaïque, le choix d'un moteur cc est en premier lieu une solution économique puisque le générateur photovoltaïque fournit une puissance cc et ainsi on peut éviter le recours à l'utilisation d'un convertisseur statique. L'évolution des convertisseurs statiques efficaces permet également de choisir des moteurs efficaces, disponibles, et surtout, moins coûteux.

Les convertisseurs statiques peuvent être à fréquence variable afin de contrôler le transfert de puissance entre la source et la pompe. Un système de pompage utilisant un moteur ça peut aussi nécessiter des batteries de stockage électrochimique et ces dernières requièrent un entretien ce qui signifie un coût supplémentaire qui s'ajoutera au coût global et en même temps diminuera le rendement de l'installation.

➤ Moteur à courant continu:

En variant le sens du courant circulant dans un rotor soumis à un champ magnétique produit par le stator, alors l'énergie électrique appliquée sera transformée en énergie mécanique. Les balais d'un moteur cc sont composés de charbon et de graphite

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

assurent la commutation du courant dans le rotor (figure I.34). Ces balais doivent être changés périodiquement et ceci constitue un problème dans le cas des pompes à moteur immergé où l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le site. Certains constructeurs offrent des moteurs à balais de longue durée, réduisant cet entretien à toutes les 5000 heures de fonctionnement.

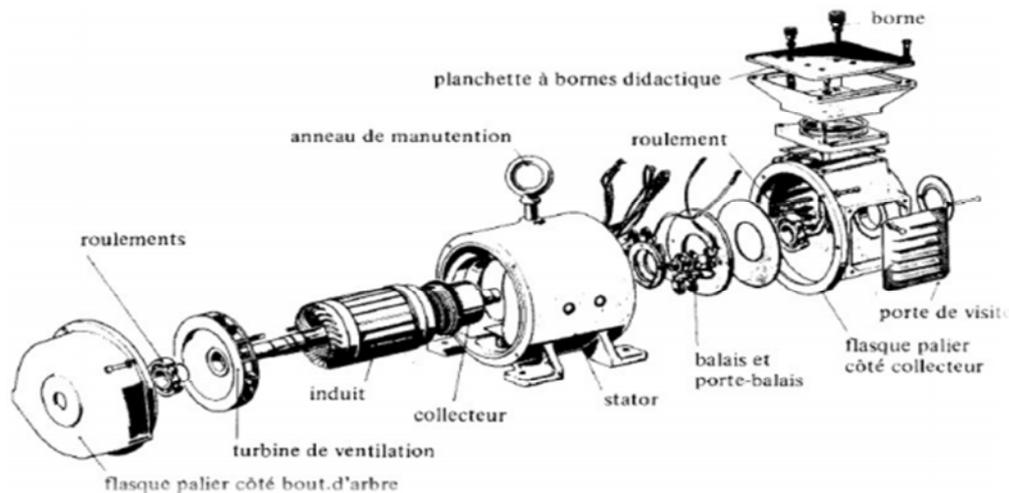


Figure I.18 : Moteur à courant continu avec balais

Les moteurs sans balais (Brushless DC motor) ne requièrent pas autant de maintenance, mais le circuit électronique peut être une cause de problèmes et doit être conçu pour un environnement difficile. Dans un moteur à courant continu, le champ magnétique de l'inducteur est produit soit par des aimants permanents, soit par un bobinage électromagnétique. Dans ce dernier cas, les moteurs peuvent être de type série, de type parallèle (moteur shunt) ou de type à excitation composée (moteur compound) selon la manière dont l'induit et l'inducteur sont alimentés. L'enroulement inducteur d'un moteur série à bobinage électromagnétique est en série avec l'induit et le couple moteur est relativement grand à faible vitesse et décroît à mesure que la vitesse augmente (Figure I.18). Lorsque le courant décroît rapidement, la vitesse augmente et peut prendre des valeurs dangereuses. En régime de démarrage, à faible vitesse, le couple moteur est important et permet de fournir l'énergie cinétique suffisante pour la mise en route d'un équipement présentant une grande inertie. À vitesse normale, le couple décroît, mais le moteur n'a plus qu'à vaincre les divers frottements. Ce type de

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

moteur est donc bien adapté à un pompage variable au fil du soleil. Les enroulements induits et les inducteurs d'un moteur shunt sont alimentés en dérivation par la même source, sous tension constante. La vitesse d'un moteur shunt sera sensiblement constante, peu importe le couple résistant. Le moteur shunt est utilisé surtout dans les machines-outils pour lesquelles il est nécessaire que la vitesse varie peu, quelle que soit la charge. Ce type de moteur est peu adapté au pompage où le couple de démarrage est important. Pour des applications de pompage solaire photovoltaïque, seuls les moteurs DC à aimants permanents (3 HP et moins) et les moteurs série sont utilisés. Eux seuls arrivent à avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe.

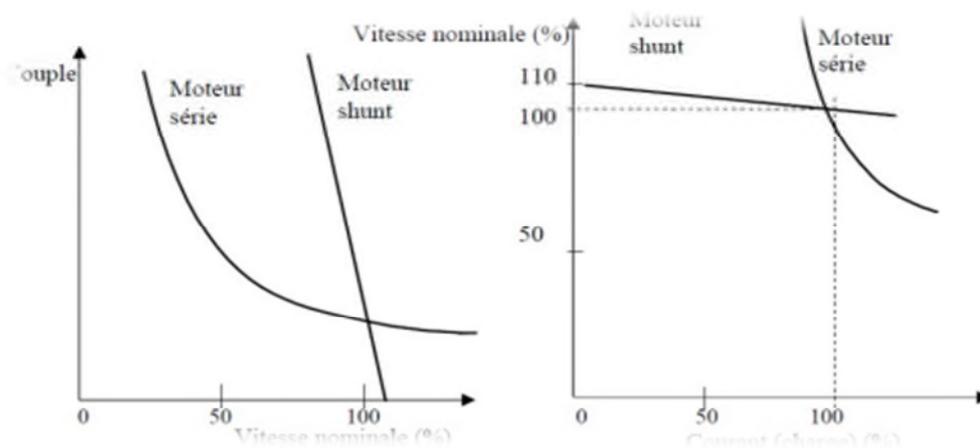


Figure I.19 : Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série

➤ Moteur à courant alternatif [19]:

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilowatts), 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°) utilisé par les distributeurs d'électricité.

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones ;
- Les moteurs asynchrones ;

❖ Les machines synchrones [19] :

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. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation.

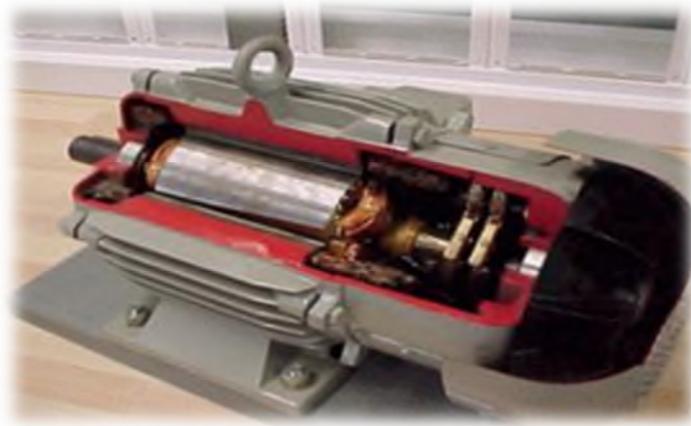


Figure (I.20) : Machine synchrone

❖ Les machines asynchrones : [20] :

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.

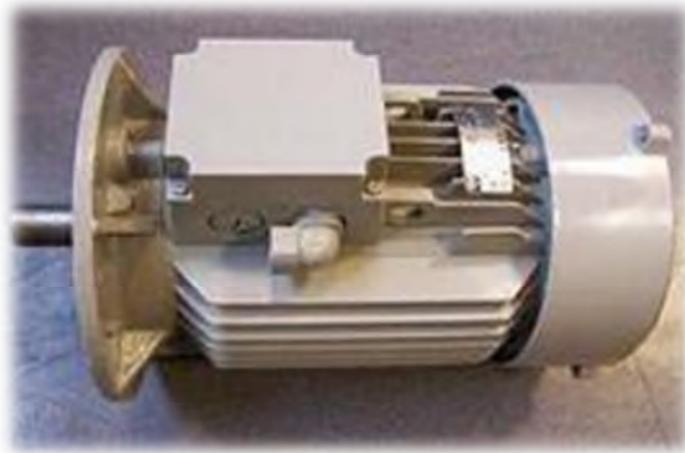


Figure (I.21): Machine asynchrone.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes

Toutefois les machines asynchrone sont les plus utilisée devant les machines synchrones pour une application pompage, grâce aux avantages suivants [21] :

- Sa disponibilité dans le marché avec un coût bas.
- Son entretien qui est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement.
- Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation.
- Disponible pour une large plage de charge.
- Le rapport puissance / poids est élevé.

I.2.2.1.2 les Pompes :

➤ Les pompes centrifuges : [22] :

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique du moteur est transmise au

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

fluide. La vitesse donnée au fluide va fournir une énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

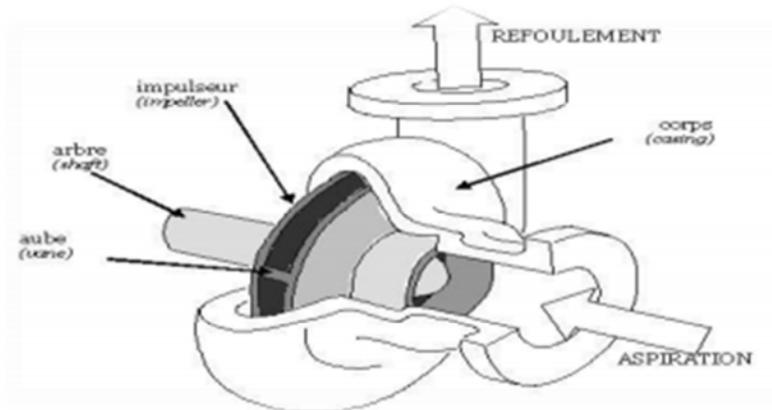


Figure (I.22) : Pompe Centrifuge

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage. (Particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement)
- Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration. Elles doivent être amorcées pour fonctionner de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto – amorçant.
- Peuvent être immergées ou de surface.
- Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir de grandes pressions.

➤ Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques encore appelées pompes à cavité progressive utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palettes et à engrenages.

L'énergie et les systèmes de pompage photovoltaïques

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs ;
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçai ;

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

➤ Les pompes de surface et les pompes immergées :

Le choix d'une pompe se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique totale, etc.) mais également en fonction des conditions particulières d'utilisation (puits, forage, pompage de rivière, etc.). Une pompe à pistons placée en surface ne pourra pas relever l'eau au-delà d'un maximum théorique de 10,33 mètres. Au-delà de cette hauteur, il faut s'orienter vers une solution de pompe immergée. Cependant, on peut utiliser des pompes centrifuges avec une pression absolue à l'aspiration inférieure à 1 MPa. Les pompes immergées peuvent extraire de l'eau à plusieurs centaines de mètres. Les pompes centrifuges qui ont une forme adaptée aux puits et qui peuvent débiter à forte pression sont souvent utilisées.

I.2.3. Conversion d'énergie [2]:

Le conditionneur d'énergie a un rôle d'optimiser le transfert de l'énergie entre le générateur photovoltaïque et le groupe moteur-pompe. Il peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu.

I.2.3 .1 Définition des convertisseurs statique [23] :

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue déferente, soit à une tension alternative.

I.2.3.2. Convertisseur DC/AC (Les onduleurs) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence (f) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative (U) sur la fréquence « U/f » est constant. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement.

I.2.3.3. Convertisseur DC/DC (Hacheur):

Les convertisseurs DC/DC dont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé [24].

➤ Convertisseur Buck (hacheur série):

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

Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie

Fonctionnement :

L'interrupteur S est fermé pendant la fraction αt de la période de découpage T . La source primaire fournit l'énergie à l'inductance L . Lors du blocage de S , la diode de roue libre D assure la continuité du courant et la décharge de L

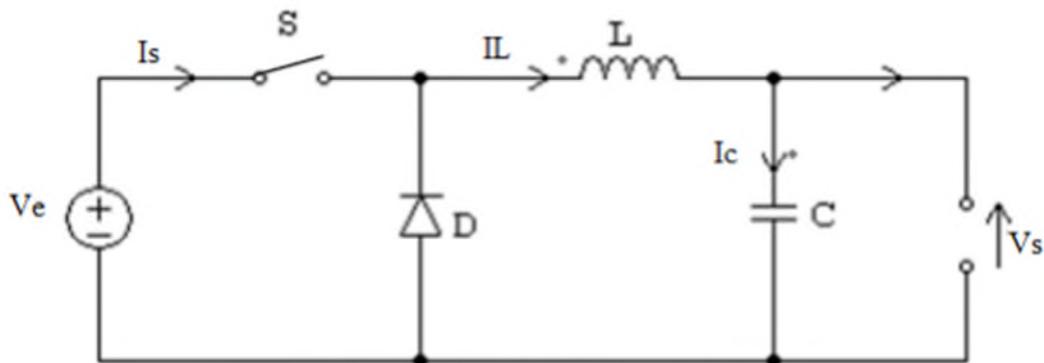


Figure (I.23) : Hacheur série

➤ .Convertisseur Boost (Hacheur parallèle) [25]

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 I.24).

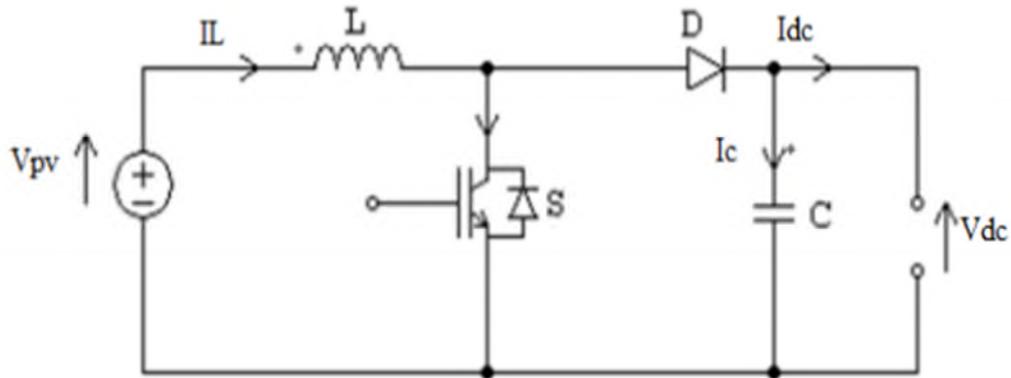


Figure (I.24) : Hacheur parallèle

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

Fonctionnement :

L'interrupteur S est fermé pendant le temps αT . L'énergie est stockée dans L, la diode D est bloquée. Le blocage de S entraîne la décharge de l'inductance.

➤ Convertisseur Buck-Boost : [26]

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.

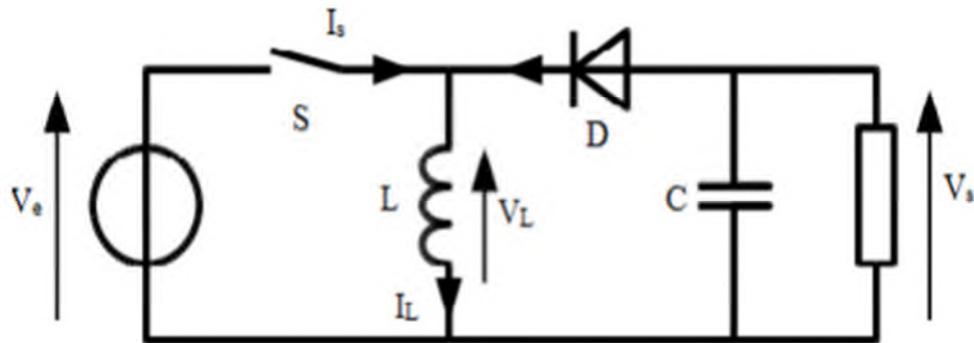


Figure (I.25) : Convertisseur Buck-Boost

Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, la tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.

I.2.3.4 Le stockage : [6]

L'énergie solaire est continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée, il faut un stockage tampon afin de pouvoir utiliser l'énergie délivrée par le générateur le moment souhaité, le stockage en pompage photovoltaïque peut être réalisé de deux façon : Stockage électrique dans les accumulateurs ou stockage d'eau dans des réservoirs.

I.2.3.5. Le stockage électrochimique

Dans un certains systèmes de pompage PV, l'utilisation des batteries de stockage électrochimique est indispensable pour leurs fonctionnement. Généralement, ces systèmes de pompage nécessitent des tensions de fonctionnement faibles (12VDC,

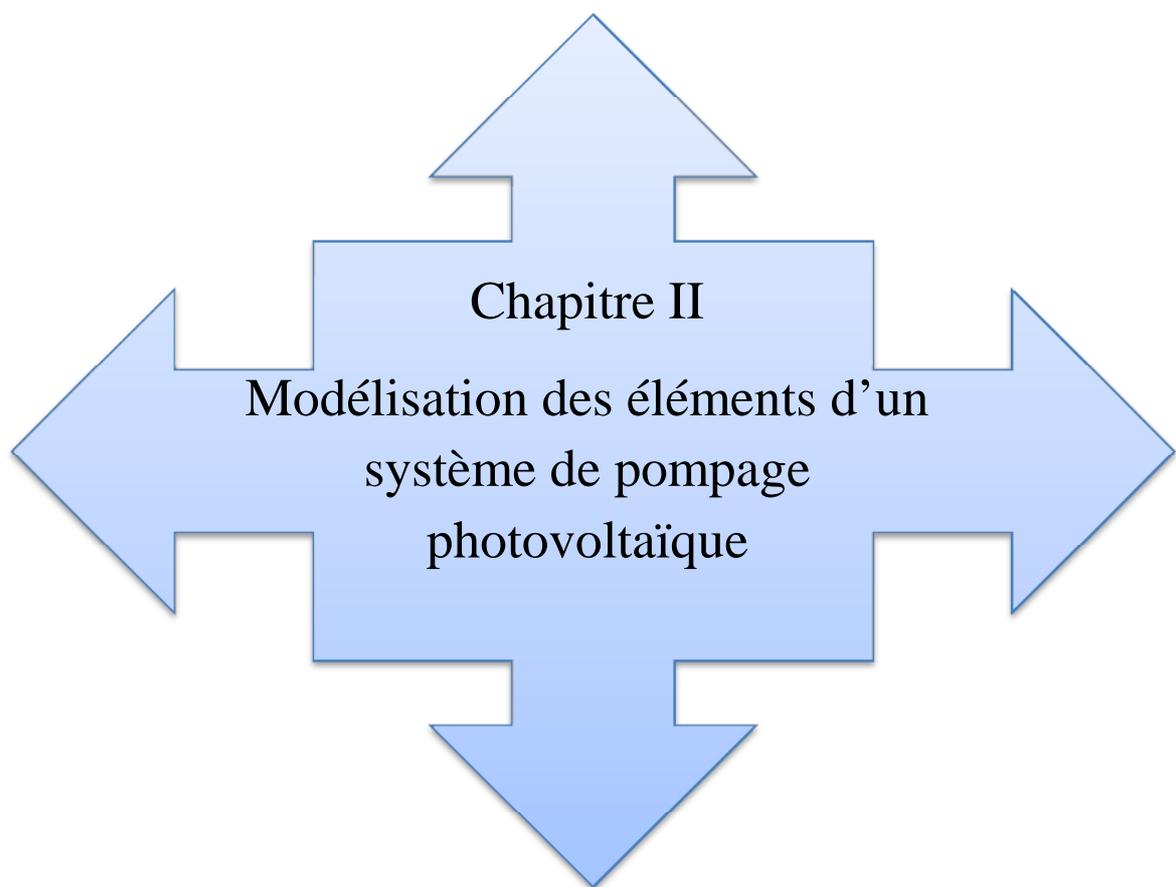
24VDC, etc.).Egalement, le stockage électrochimique est utilisé pour permettre au système de pompage de fournir de l'eau avec une certaine pression constante impossible de l'assurer avec la méthode gravitationnelle du réservoir.

I.2.3.6.La régulation (régulateur) [27] :

Son rôle : réguler la charge et la décharge de la batterie. Une surcharge de la batterie plomb acide provoque une perte en eau et un vieillissement prématuré des accumulateurs. Une décharge profonde entraîne la sulfatation des plaques et un vieillissement prématuré des accumulateurs. Les autres fonctions du régulateur peuvent être la surveillance et la sécurité de l'installation, la recherche du point maximal de puissance ou la commande de charge de la batterie par d'autres sources.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche générale sur le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques. Ces systèmes permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins, ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications. Parmi ces dernières nous nous sommes intéressés au pompage de l'eau. La description des différents composants d'un tel système sont aussi présentés. Enfin nous avons abordé les défauts les plus fréquents dans un panneau photovoltaïque. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation des différents composants du système de pompage PV, tel que à savoir le générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/DC et un groupe moteur pompe.



Chapitre II

Modélisation des éléments d'un
système de pompage
photovoltaïque

Introduction :

La modélisation d'un système physique donnée consiste à établir son modèle mathématique afin de le simuler sous un logiciel mathématique pour mieux comprendre son fonctionnement et de faciliter son dimensionnement. Les modélisations obtenues doivent être à la fois précises pour rendre compte des transferts énergétiques, et suffisamment rapide pour permettre des simulations sur de longue période dans le temps de calculs raisonnable.

L'objectif est de disposer d'un modèle suffisamment fiable afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet à étudier.

II.1 Description du système à étudier : [28]

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.
- Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue variable à partir d'une tension Continue fixe.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique

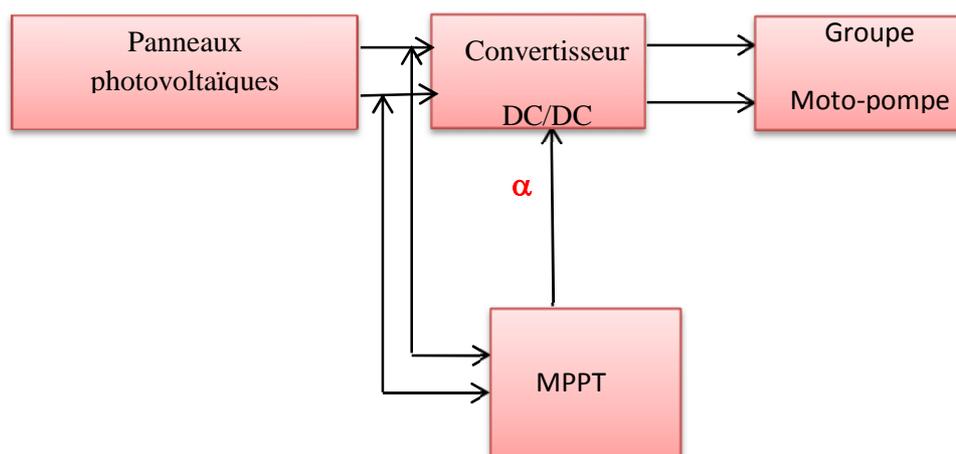


Figure. (II.1) : schéma descriptif de système de pompage photovoltaïque.

II.2. Modélisation du générateur PV :

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

II.2.1. Modélisation du générateur PV à l'état sain

II.2.1.1. Modèle de la cellule solaire [29]

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur PV. La modélisation du comportement électrique du module PV peut être étendue au générateur PV selon sa configuration, nombre de modules série et en parallèle.

Le courant de court-circuit I_{cc}

Il définit la quantité des paires électron-trou créé G et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement.

$$I_{ph} = qG(l_n + l_p) \dots \dots \dots \text{II.1}$$

La tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ($I = 0$) fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{CO} = \frac{kt}{q} \ln\left(\frac{I_{CC}}{I_0} + 1\right) \dots \dots \dots \text{II.2}$$

I_0 courant de saturation de la diode

Le facteur de forme FF : [30]

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement P_p (I_p et V_p) de la courbe courant tension. Le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale et le produit de la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit. Il détermine la qualité électrique de la cellule.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \dots \dots \dots \text{II.3}$$

Le rendement de conversion d'énergie (η) :

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \dots\dots\dots \text{II.4}$$

$$\text{Ou, } \eta = \frac{V_{ppm} I_{ppm}}{E \cdot S} \dots\dots\dots \text{II.5}$$

$$\text{Ou, } \eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \dots\dots\dots \text{II.6}$$

Point de puissance maximale (Pmax) :

Est le point (V_{ppm} , I_{ppm}) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_{max} = V_{ppm} I_{ppm} \dots\dots\dots \text{II.7}$$

La puissance du flux lumineux incident (Pin) :

$$P_{in} = E_s \dots\dots\dots \text{II.8}$$

Avec :

E_s : L'ensoleillement qui représente la puissance d'éclairement reçue par unité de surface (W/m^2)

S : La surface effective de la cellule photovoltaïque

La température de jonction (Tj) :

$$T_j = T_a + E_s \frac{NOCT-20}{800} \dots\dots\dots \text{II.9}$$

Avec :

NOCT: La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : La température ambiante.

II.2.1.2. Le modèle à une diode (à une seule exponentielle) [31]

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle est principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. température ambiante.

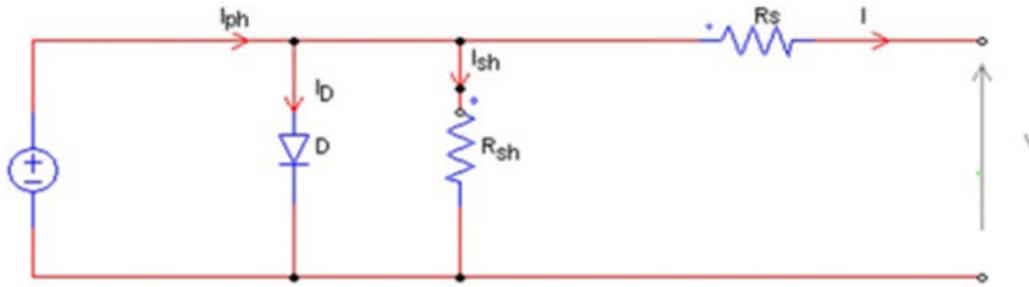


Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire

A partir du schéma (II.2) le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de KIRCHHOFF :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \dots\dots\dots \text{II.10}$$

$$I_{ph} = P_1 E_s (1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref})) \dots\dots\dots \text{II.11}$$

- E_{sref} , T_{jref} : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- T_j : température de jonction.
- P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

$$I_D = I_{0d} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{K \cdot A \cdot N_s \cdot T_j}} - 1 \right] \dots\dots\dots \text{II.12}$$

Avec :

- I_{0d} : courant inverse de saturation de la diode.
- q : charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
- K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k).
- A : coefficient d'idéalité de la cellule.
- N_s : nombre de cellules connectées en série.

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left[\frac{E_g}{K \cdot T_j} \right]} \dots\dots\dots \text{II.13}$$

Avec :

- E_g : énergie de gap.
- P_4 : paramètre constant.

$$I_{sh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \dots\dots\dots \text{II.14}$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :

$$I_{ph} = P_1 E_s (1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref} - P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left[\frac{E_g}{K \cdot T_j} \right]}) \cdot \left[\left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{A K T}} - 1 \right) \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \dots\dots\dots \text{II.15}$$

➤ Détermination des paramètres du modèle :

L'identification des paramètres P1, P2, P3 et P4 se fait à partir des mesures expérimentales

Et des paramètres standards (STC) $E_s=1000\text{W/m}^2$, $T_a=25^\circ\text{C}$.

P1	P2	P3	P4	Rs	Rp	A	Ns
0.00345	$0.58 \cdot 10^{-5}$	$-0.336 \cdot 10^{-4}$	31.2367	0.614	151.16	1	72

Tableau (II.3) : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110-24

➤ Caractéristiques électriques :

Dans notre travail nous avons utilisés le panneau SIEMENS SM 110-24 de 110 Wc.

Le tableau (II.4) donne les paramètres électriques de panneau utilisé

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau	110W
Puissance nominale	110W
Courant au point de puissance max I_{ppm}	3.15A
Tension au point de puissance max V_{ppm}	35V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{co}	43.5V
Coefficient d'incrémentation du courant (A/°K) α_{sc}	1.4mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension (V/°K) β_{oc}	-152mV/°C

Tableau (II.4) : Paramètres électriques du panneau SIEMENS SM 110-24

II.2.1.2.1. Caractérisation électrique du module PV sous Matlab/Simulink :

Dans le paragraphe suivant, on va modéliser le module SIEMENS SM 110-24V sous Matlab Simulink. Le schéma bloc du générateur PV est représenté sur la figure (II.5).

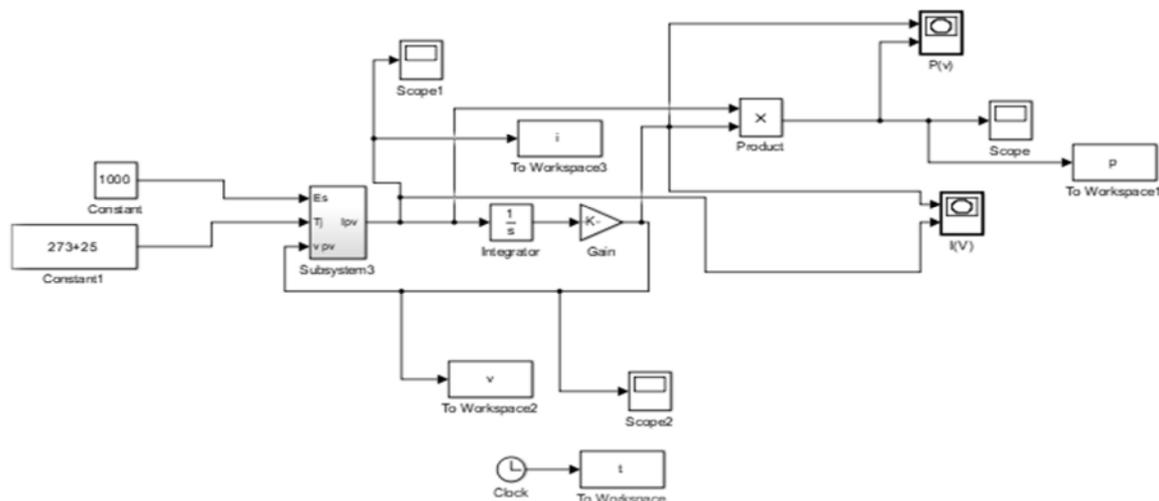
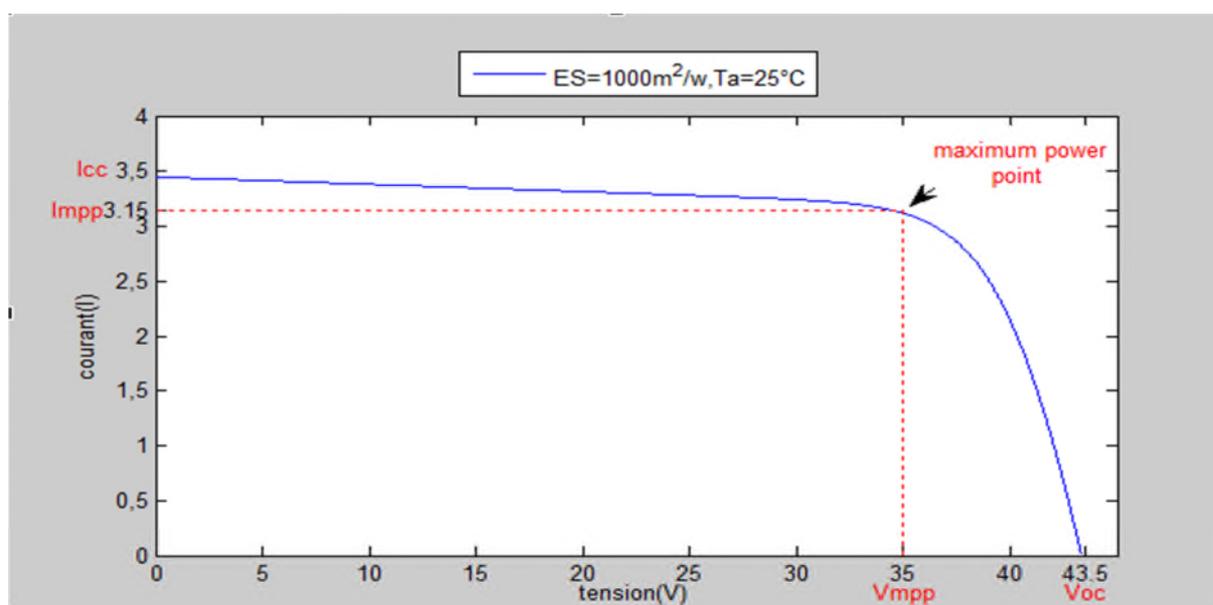


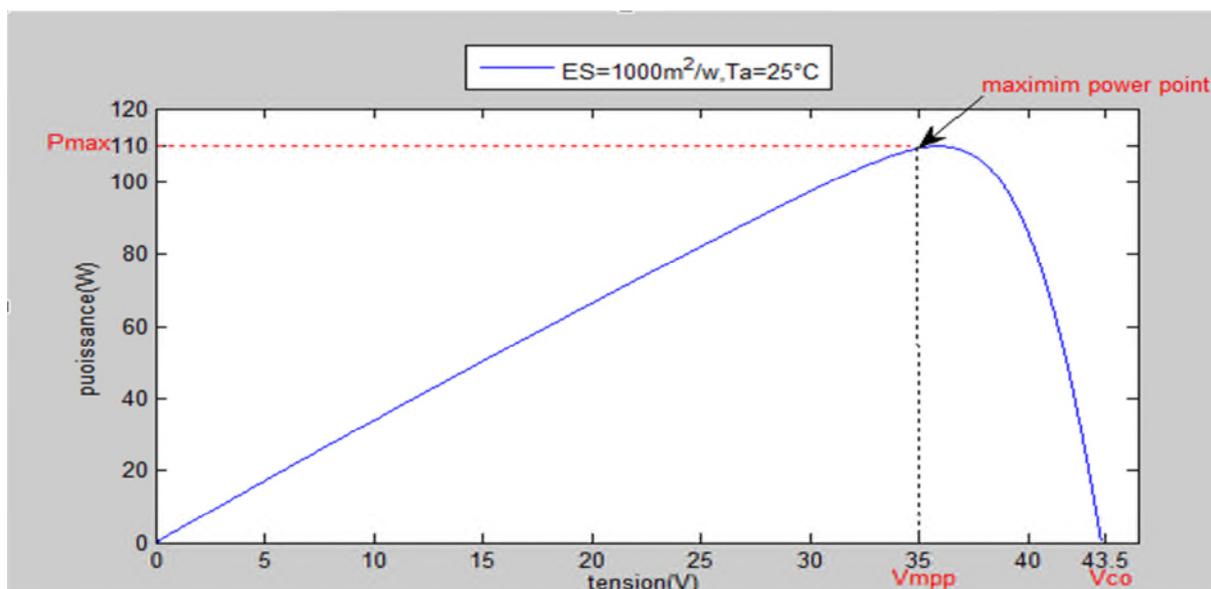
Figure (II.5) : Schéma bloc du module SIEMENS SM 110-24V

➤ **Caractéristique courant – tension ($I = f(V)$), puissance- tension ($P = f(V)$)**

Les figures (II.6) et (II.7) représentent respectivement les courbe $I = f(V)$ et $P = f(V)$ obtenue par simulation du module photovoltaïque SIEMENS SM 110-24V dans des conditions constantes d'irradiation 1000 W/m^2 et de température 25°C .



Figure(II.6) : Caractéristique courant-tension

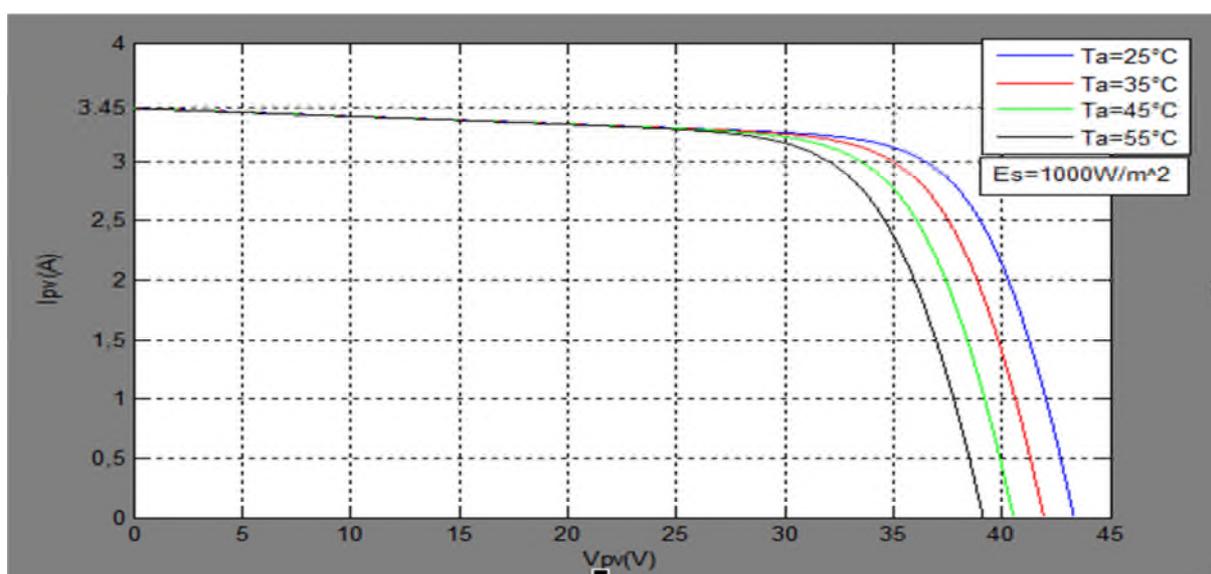


Figure(II.7) : Caractéristique puissance-tension

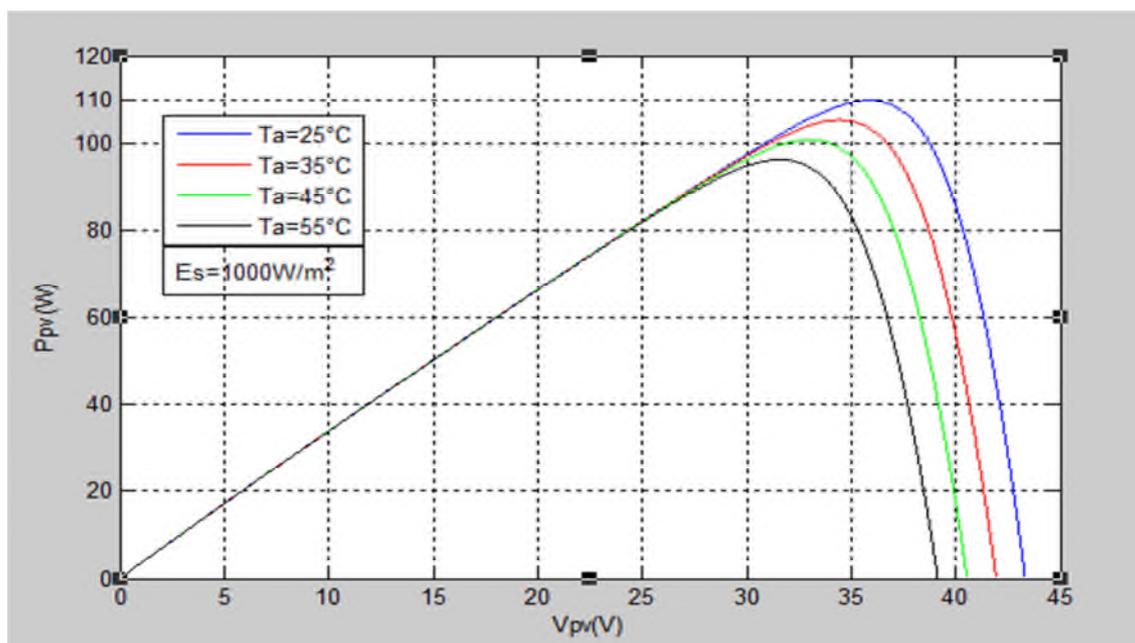
Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode. Les résultats des caractéristiques Puissance-Tension et courant-Tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Les valeurs I_{cc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp} ainsi que P_{max} sont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

➤ **Influence de la température :**

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($ES=1000\text{W}/\text{m}^2$) pour différentes température (25°C , 35°C , 45°C et 55°C). Les résultats sont montrés sur les figures (II.8) et (II.9).



Figure(II.8) : Influence la température sur la caractéristique $I=f(V)$.



Figure(II.9) : Influence la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- En faisant varier la température de 0°C à 35°C , nous remarquons que le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance P_{pv} est presque dépendant de la température.
- En revanche, la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue lorsque la température augmente.

➤ **Influence de l'éclairement :**

Nous avons maintenu une température constante (25°C) à différents éclairements. Les figures (II.10) et (II.11) montrent les résultats de simulations.

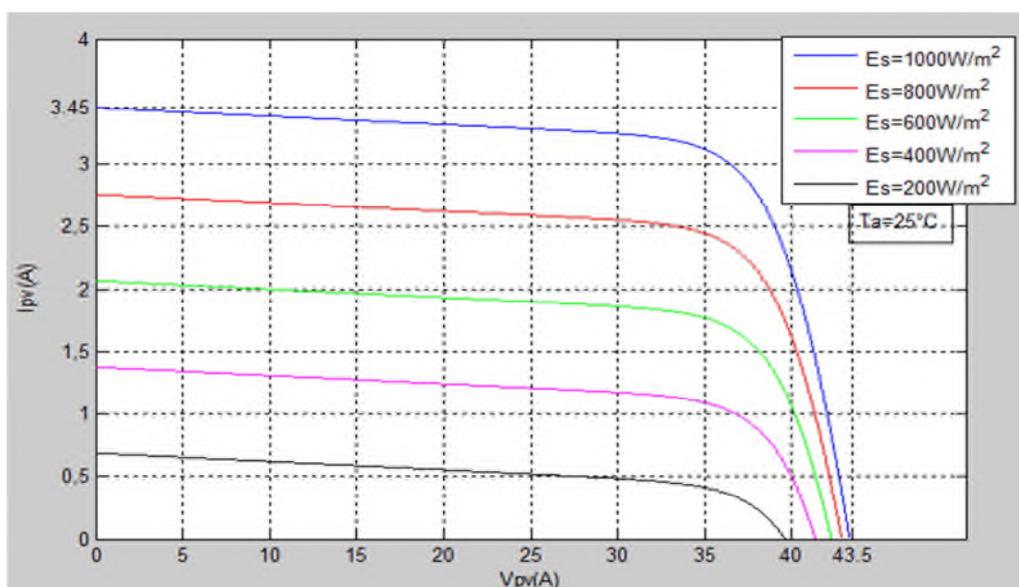


Figure (II.10) : Influence ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

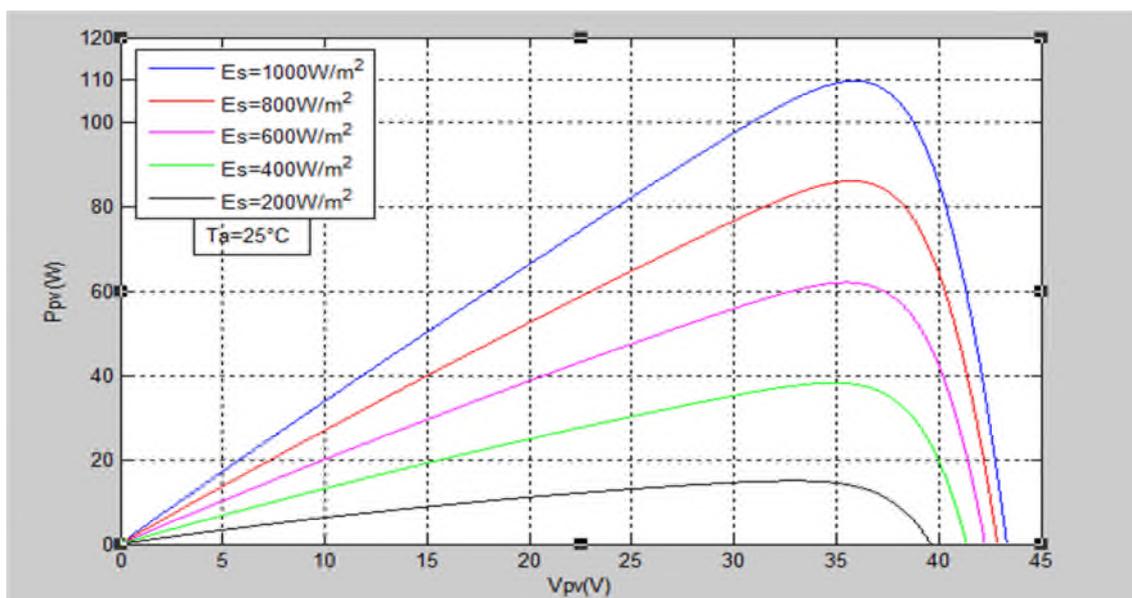


Figure (II.11) : Influence ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes

- ✓ Le courant de circuit-ouvert I_{sc} et la puissance varie proportionnellement à l'ensoleillement G .
- ✓ La tension à vide V_{oc} varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

➤ **Influence de l'éclairement et la température :**

Les figures (II.12) et (II.13) montrent la variation de la température et de l'éclairement en même temps.

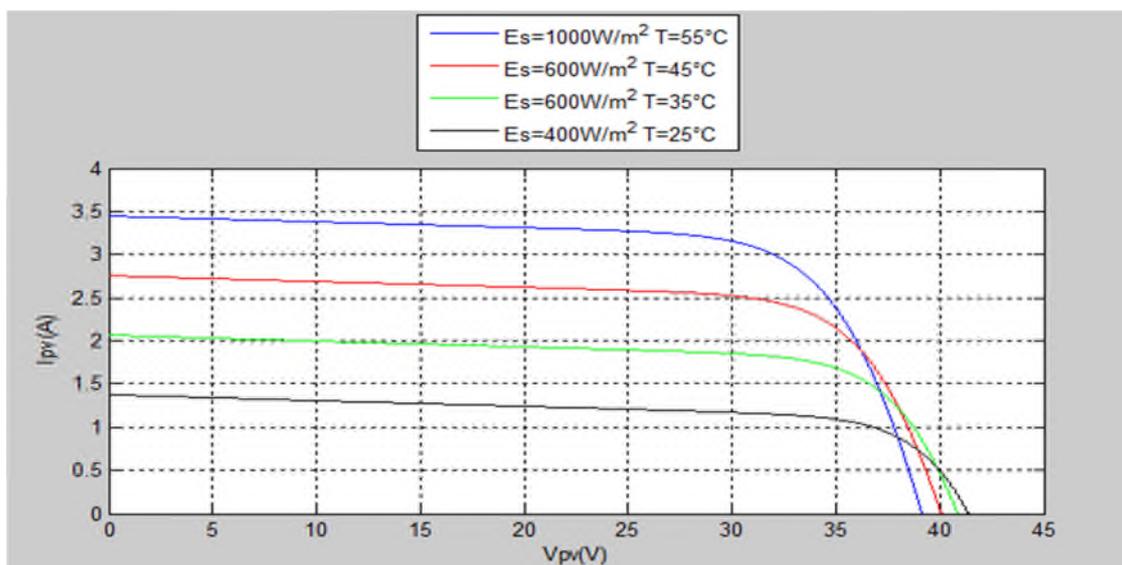


Figure (II.12) : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique $V-I$

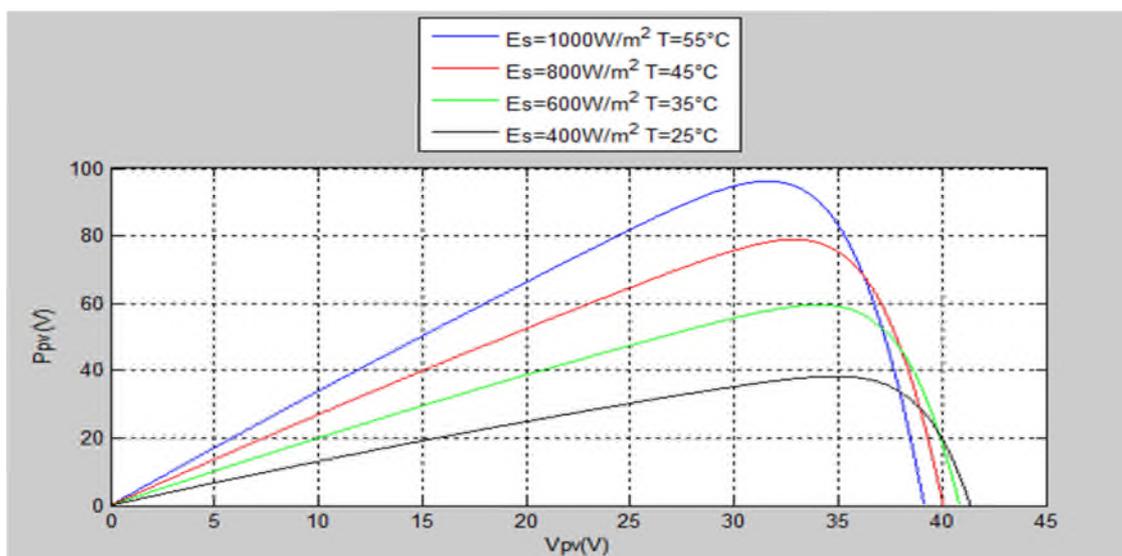


Figure (II.13) : Influence de température et d'ensoleillement sur la caractéristique V-I

❖ **Discussion des résultats :**

1. Influence de l'ensoleillement :

Une température de 25 °C est maintenue constante, l'ensoleillement (E) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (II.10) et (II.11)

On remarque :

- ✓ Que l'influence due à la baisse de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit I_{cc} . Par contre la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue faiblement.
- ✓ Que le point de puissance optimale chute brusquement si l'ensoleillement diminue.
- ✓ Que le courant produit par la photopile I_{ph} 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.

2. Influence de la température :

Pour un ensoleillement 1000W/m2 maintenu constant, nous varions la température. Les figures (II.8) et (II.9).représentent les résultats de notre simulation obtenue.

On remarque :

- ✓ Que le courant de court-circuit I_{sc} est faiblement dépendant de la température, alors que la tension de circuit ouvert V_{oc} , est très sensible à la variation de la température.
- ✓ Que l'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T.

II.1.1.2.2. Caractérisation électrique du module PV avec la méthode voltampère-métrique et sous Matlab/Simulink:

Cette méthode consiste à réaliser un circuit électrique constitué du module PV SIEMENS SM 110-24 de 110 Wc, un ampèremètre en série, une charge variable et un voltmètre en parallèle suivant la figure

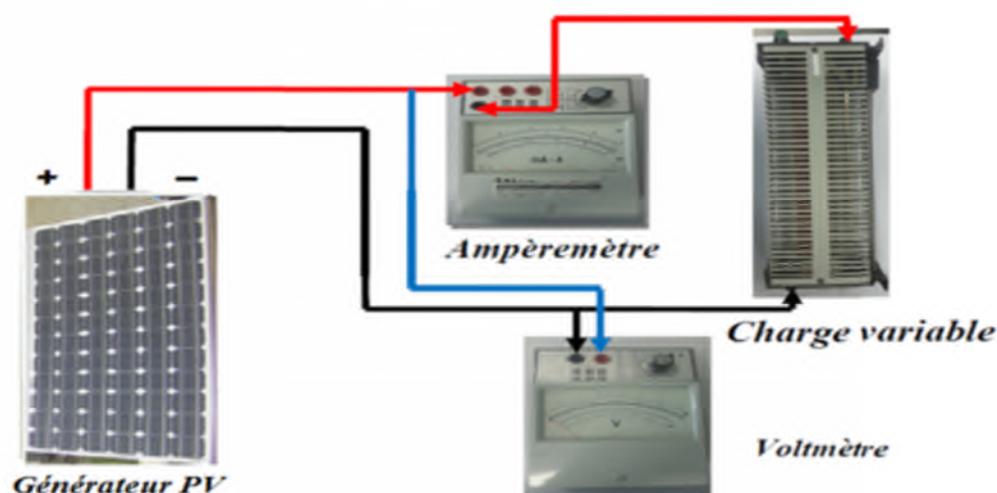
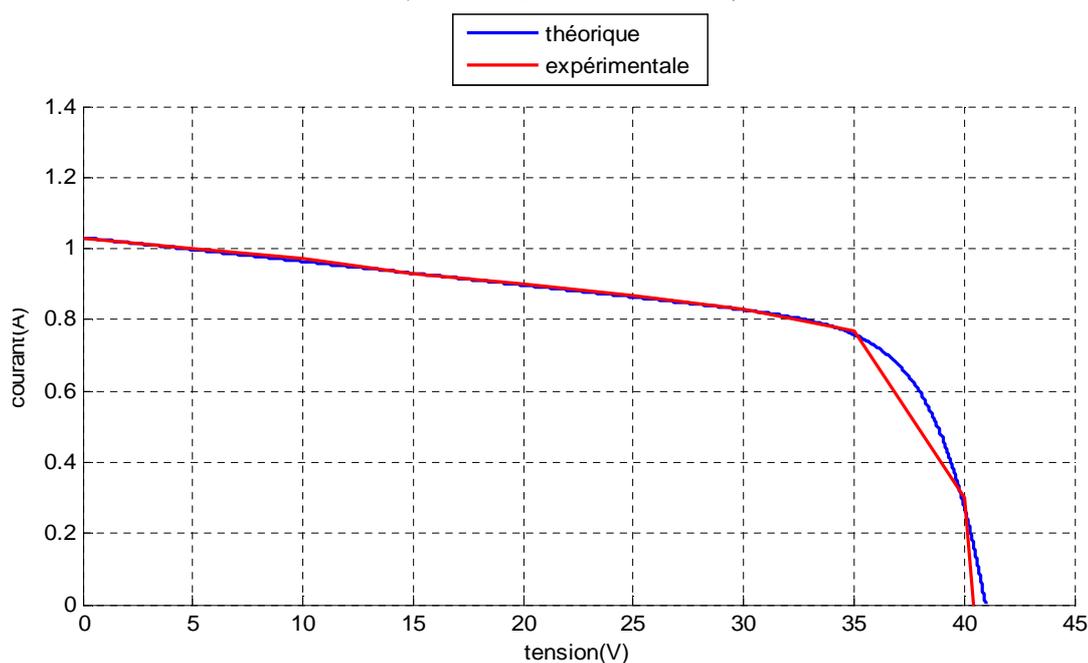


Figure (II.14): Montage volt-ampérométrique.

En faisant varier la charge, le courant généré par le générateur photovoltaïque et la tension à ses bornes varient, ce qui nous permet de tracer les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$, du module photovoltaïque étudié.

Les résultats obtenus pratiquement et avec simulation sont regroupés dans les figures suivantes (15.16.17) afin d'effectuer une étude comparative entre eux

➤ Pour des conditions faibles : ($T=23^{\circ}\text{C}$, $E_s=300\text{W}/\text{m}^2$)



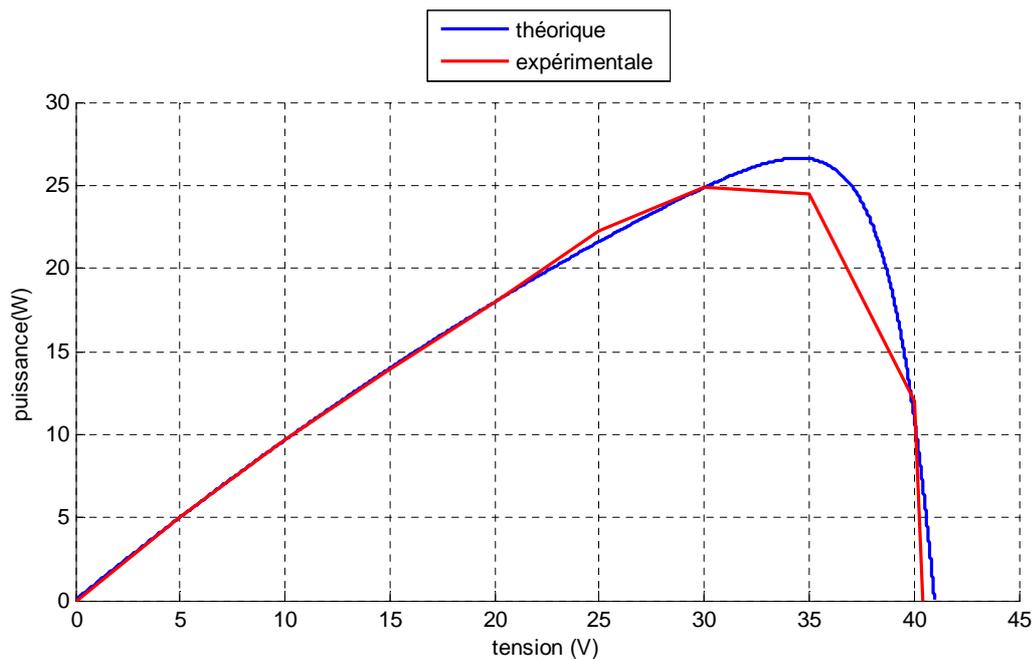
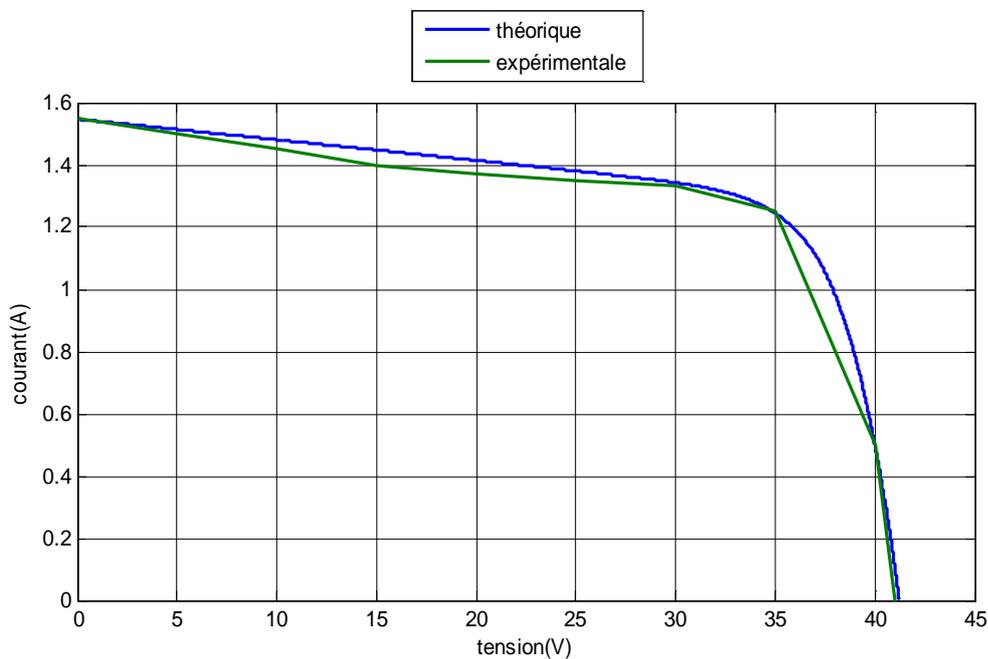


Figure II.15: Caractéristique I-V et P-V du module PV pour un faible éclairement

➤ Pour des conditions moyennes : ($T=28^{\circ}\text{C}$, $E_s=450\text{W/m}^2$)



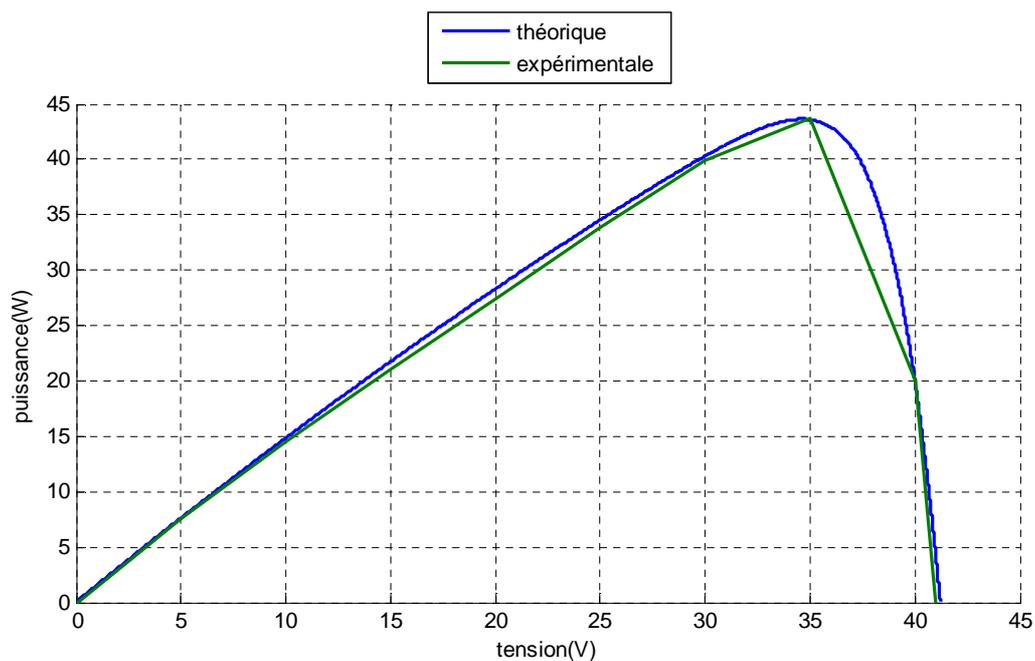
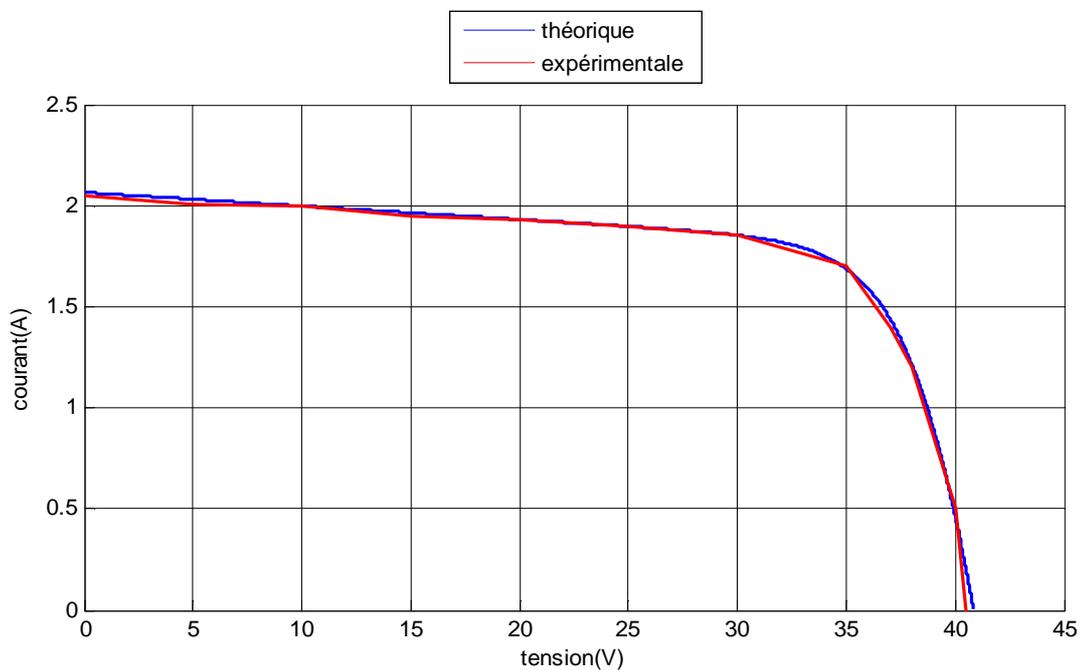


Figure II.16: Caractéristique I-V et P-V du module PV pour un moyen éclairement

➤ Pour de conditions fortes : ($T=35^{\circ}\text{C}$, $E_s=600\text{W/m}^2$)



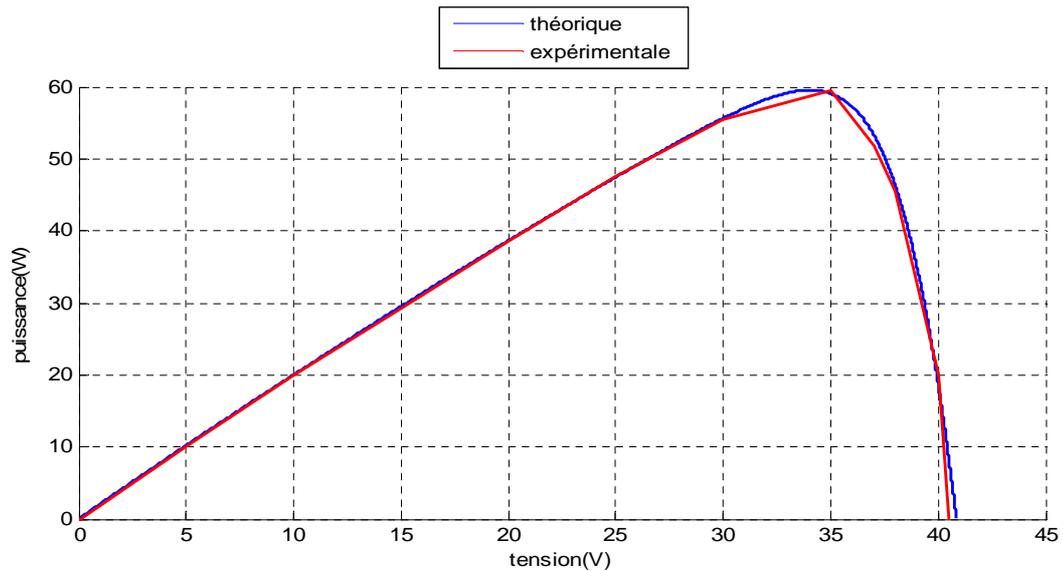


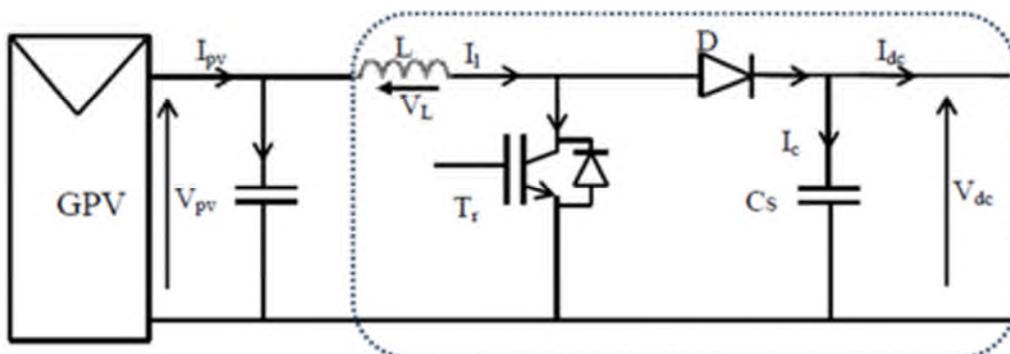
Figure II.17: Caractéristique I-V et P-V du module PV pour un fort éclairage

A partir des résultats obtenus présentés sur les figures (II.15, II.16, II.17), on a remarqué que la variation des Caractéristique (I-V-P) du module PV. Dépend de l'ensellement et de la température.

On remarque que les résultats trouvés pratiquement et ceux par simulations ne sont pas complètement identiques, cela est due aux erreurs de mesures, lors des tests pratiques.

II.3. Modélisation des convertisseurs statiques : [32]

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 [32]. La figure (II.18) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.



Figure(II.18) : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost).

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 $\alpha.T$ (α 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 [35]. Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \dots \dots \dots \text{II.16}$$

$$(1 - \alpha)I_L = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \dots \dots \dots \text{II.17}$$

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 (II.18).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \dots \dots \dots \text{II.18}$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_L \dots \dots \dots \text{II.19}$$

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

II.4. Adaptation de l'énergie photovoltaïque [33]

Le module photovoltaïque est un générateur de puissance finie pouvant fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale (PPM) qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée. La tension et le courant correspondants sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximale). Il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale (maximum power point tracker (MPPT)), entre la source photovoltaïque et la charge, qui permet la recherche du (PPM).

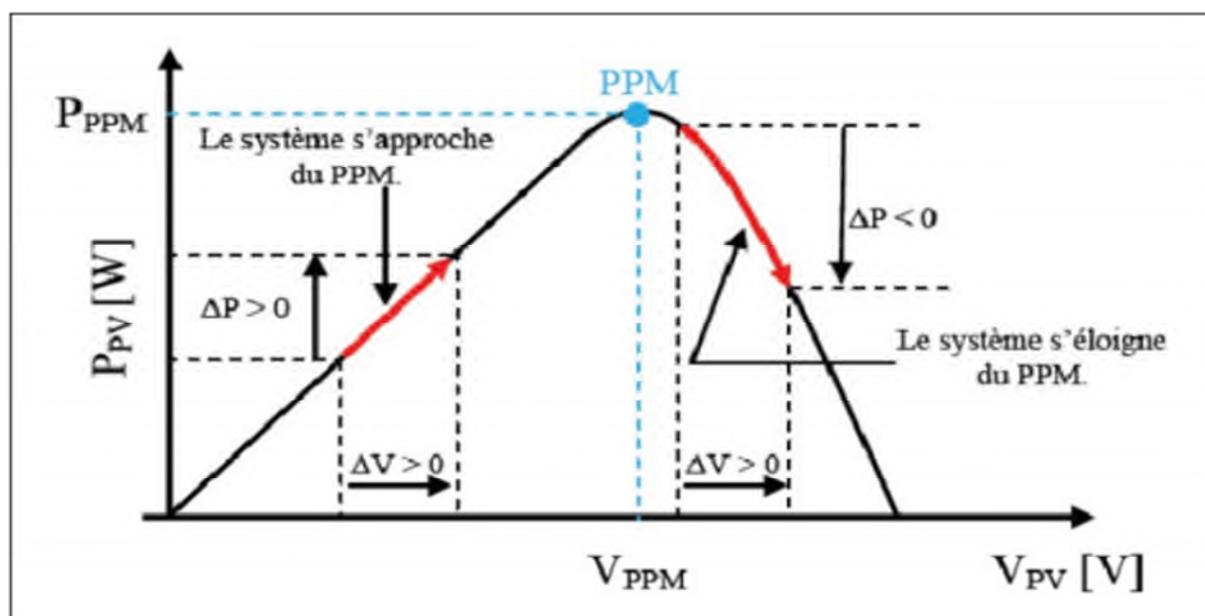
➤ **La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) :**

Par une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à

produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soient les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement maximum (V_{ppm} , I_{ppm}). Le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum.

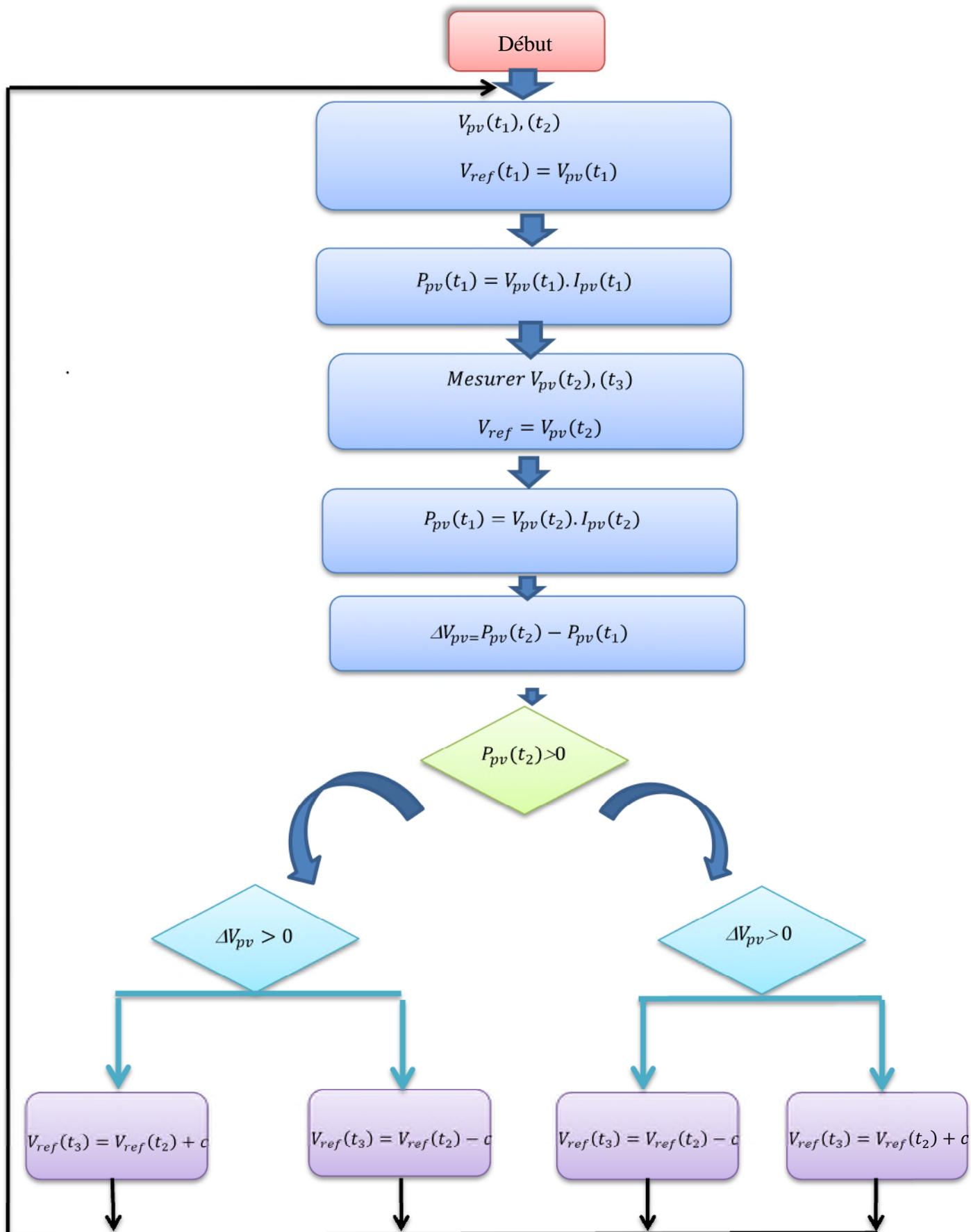
Méthode de perturbation et d'observation (P&O):

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause 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.19): Principe de la P&O

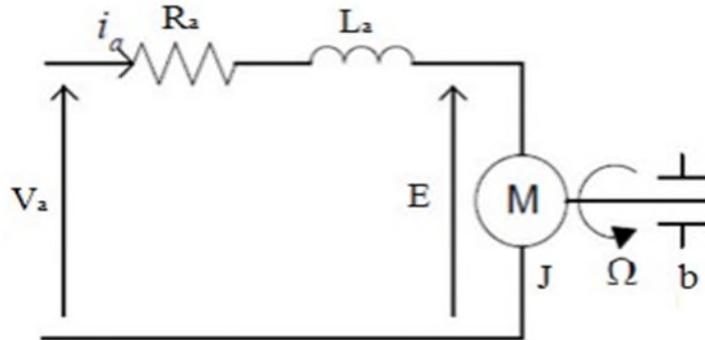
Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure ci-dessous. Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit: la connaissance des caractéristiques de générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du PPM, provoquant ainsi une perte d'énergie.



Figure(II.20): Organigramme de la méthode perturbation et observation.

II.5. Modélisation du moteur à courant continu à aimant permanent : [34]

La figure (II.22) représente le schéma simplifié d'un moteur à courant continu et à aimant permanent.



Figure(II.21): Représentation du Moteur à courant continu et à aimant permanent.

Avec :

E : La force contre électromotrice.

R_a, L_a : Résistance et inductance des enroulements d'induit.

J : Moment d'inertie de l'arbre.

b: Coefficient de frottement de l'arbre sur les paliers.

➤ **Equations électriques et mécaniques :**

Un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques. En utilisant le théorème du moment cinétique et des équations d'électromagnétiques, on recherche les équations d'un moteur à excitation indépendante et à flux constant. En tenant compte de la résistance de l'induit et de son inductance propre on a :

Equation électrique :

$$V_a = E + R_a i_a + L \frac{di_a}{dt} \dots \dots \dots \text{II.20}$$

Avec :

$$E = \Phi_0 \omega \dots \dots \dots \text{II.21}$$

$$V_a = \Phi_0 \omega + R_a i_a + L \frac{di_a}{dt} \dots \dots \dots \text{II.22}$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{(V_a - R_a i_a - \Phi_0 \omega)}{L} \dots \dots \dots \text{II.23}$$

$$i_a(t) = \frac{1}{L} \int (V_a - R_a i_a - \Phi_0) \cdot dt \dots \dots \dots \text{II.24}$$

Equation mécanique :

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum \Gamma = \Gamma + \Gamma_r \dots \dots \dots \text{II.25}$$

Avec :

$$\Gamma = \Phi_0 i_a(t) \dots \dots \dots \text{II.26}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{j} (\Phi_0 i_a(t) + \Gamma_r) \dots \dots \dots \text{II.27}$$

$$\Gamma_r = -F_r \omega + C_{ch} \dots \dots \dots \text{II.28}$$

$$\omega = \frac{1}{j} \int (\Phi_0 i_a(t) - F_r \cdot \omega + C_{ch}) dt \dots \dots \dots \text{II.29}$$

Ou :

J : Le moment d'inertie totale entraînée (moteur Jm charge Jch).

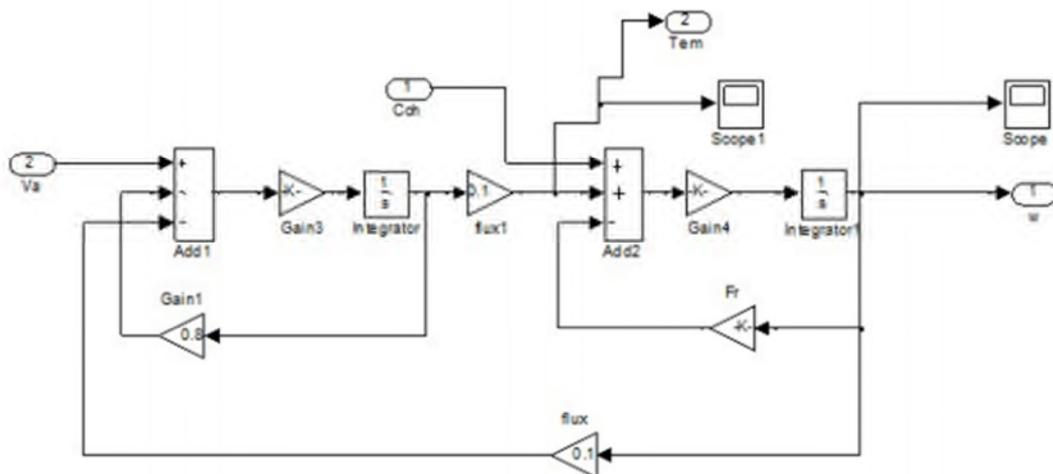
Γ_r : Couple résistant.

F_r : Coefficient de frottement.

Γ : Le couple électromagnétique.

C_{ch} : Couple de charge (le couple résistant de la pompe).

Le schéma bloc du moteur est représenté dans la figure (II.23) suivante:



Figure(II.22): Schéma bloc du moteur à courant continu.

➤ Simulation du moteur à courant continu :

Les figures (II.24 et II.25) nous montrent la variation du couple et de la vitesse du moteur en fonction du temps :

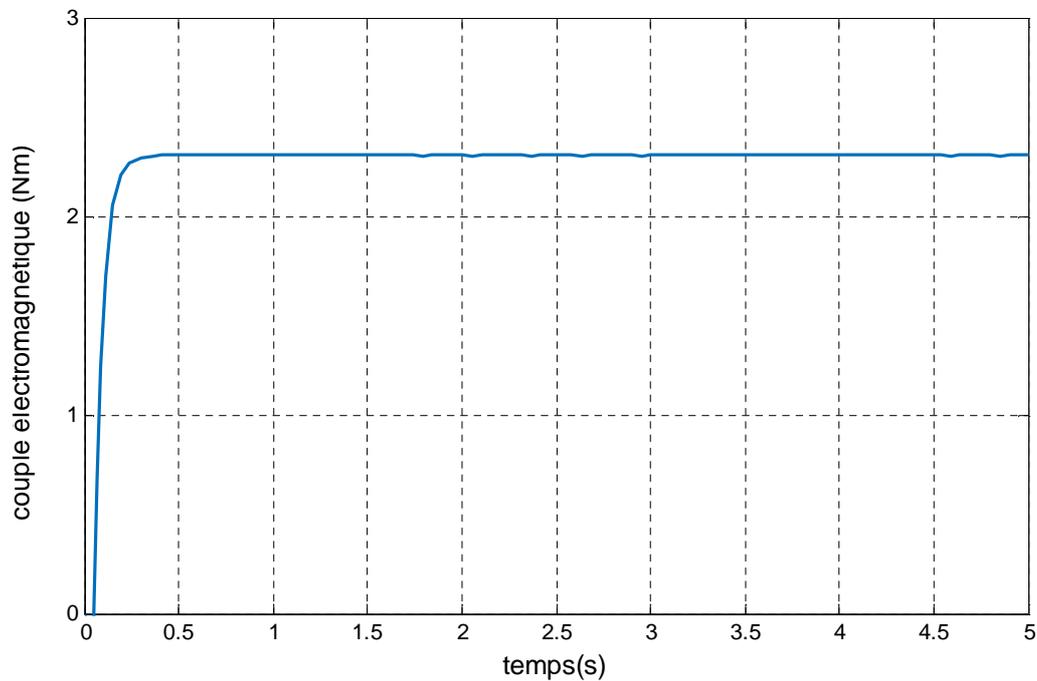


Figure II.23 : Caractéristique du couple électromagnétique en fonction de temps.

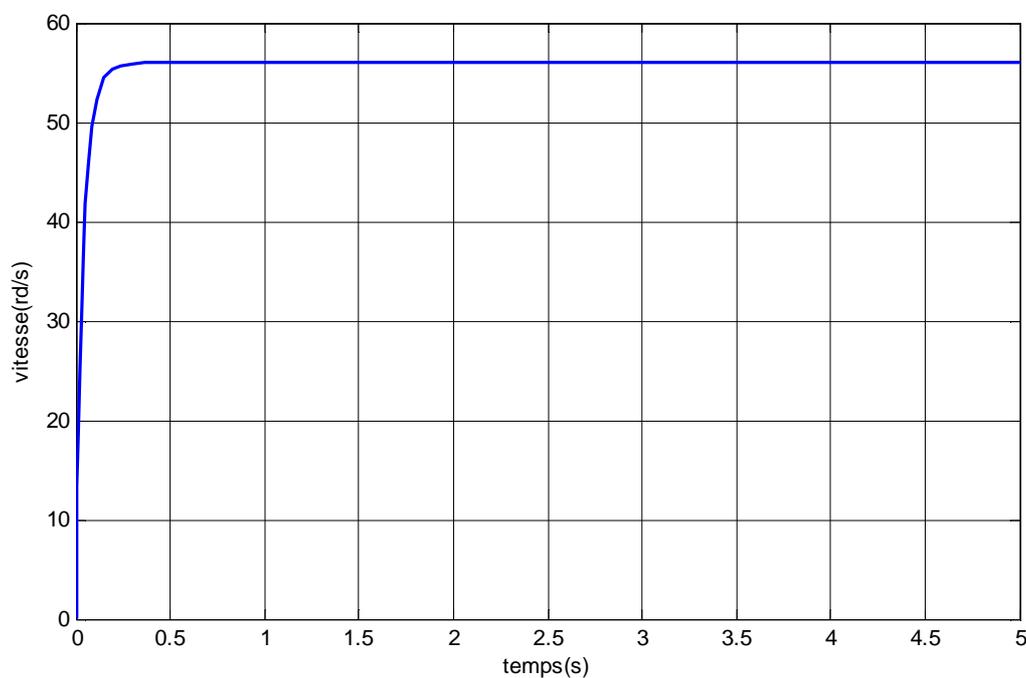


Figure II.24 : Caractéristique de la vitesse en fonction de temps.

II.6. Modèle mathématique de la pompe [35] :

La pompe à membrane permet d'éliminer le problème de l'étanchéité, offrant ainsi un avantage sur le système à piston et garniture. On distingue le système à simple membrane et le système à double membrane et fluide intermédiaire. Nous présentons un modèle mathématique qui relie directement le débit d'eau (Q) à la puissance (Ph) consommé par le sous-système de pompage. Pour une hauteur manométrique donnée H. L'équation mathématique du modèle est donnée comme suit :

$$P_h = m \cdot g \cdot H = \eta_t \cdot P_{mot} = \eta_t \cdot \omega \cdot C_{ch} \dots \dots \dots \text{II.30}$$

Où:

m: est le débit massique.

H : est la hauteur manométrique totale.

η_t : est le rendement global de la pompe.

Le couple résistant de la pompe est donné par :

$$C_{ch} = \frac{m \cdot g \cdot H}{\eta_t \cdot \omega} = \frac{D \cdot g \cdot H}{\eta_t} \dots \dots \dots \text{II.31}$$

Où:

D : est le déplacement volumétrique effectif de la pompe.

Le bloc de la pompe est présenté dans la figure (II.26).

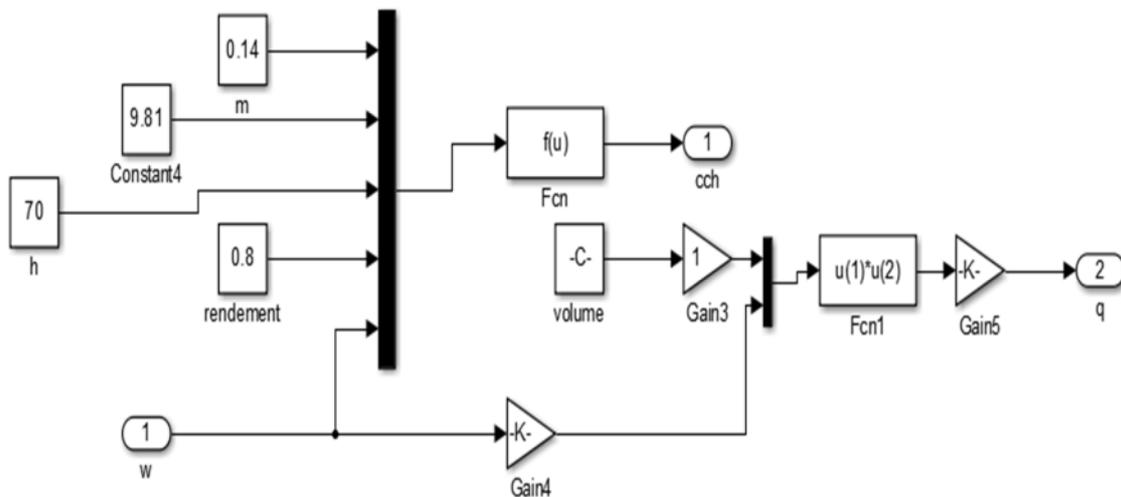


Figure II.25 : Schéma du bloc matlab de la pompe

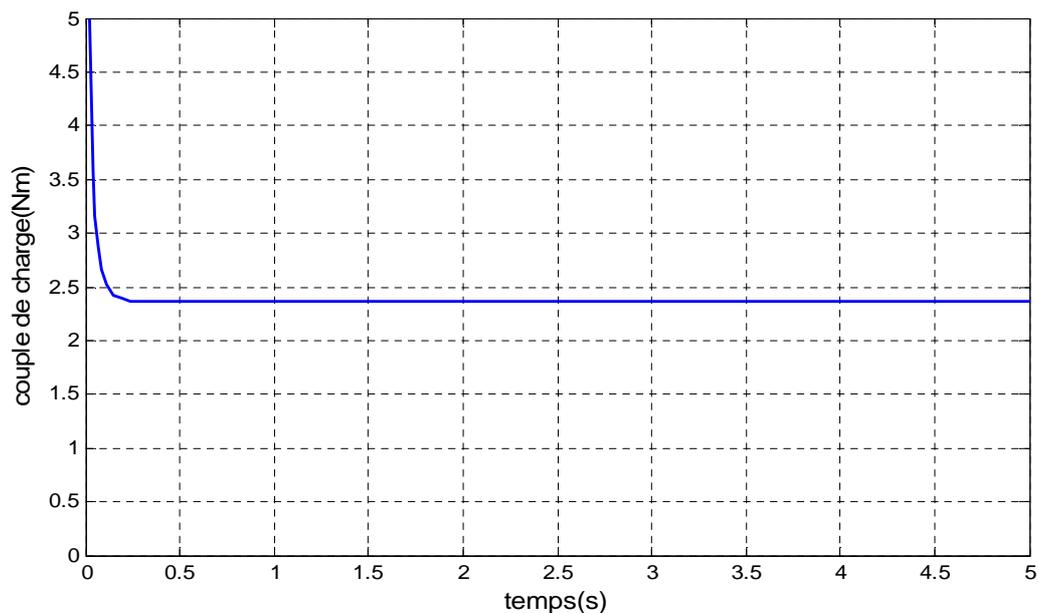


Figure II.26: Caractéristique de couple résistant de la pompe en fonction de temps.

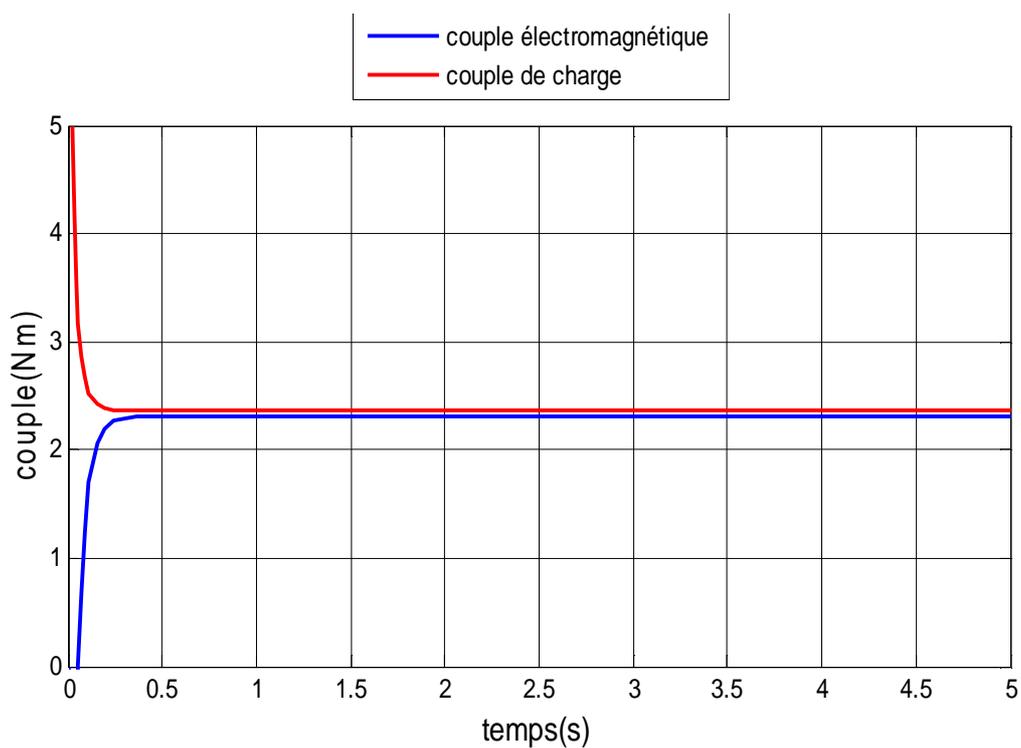
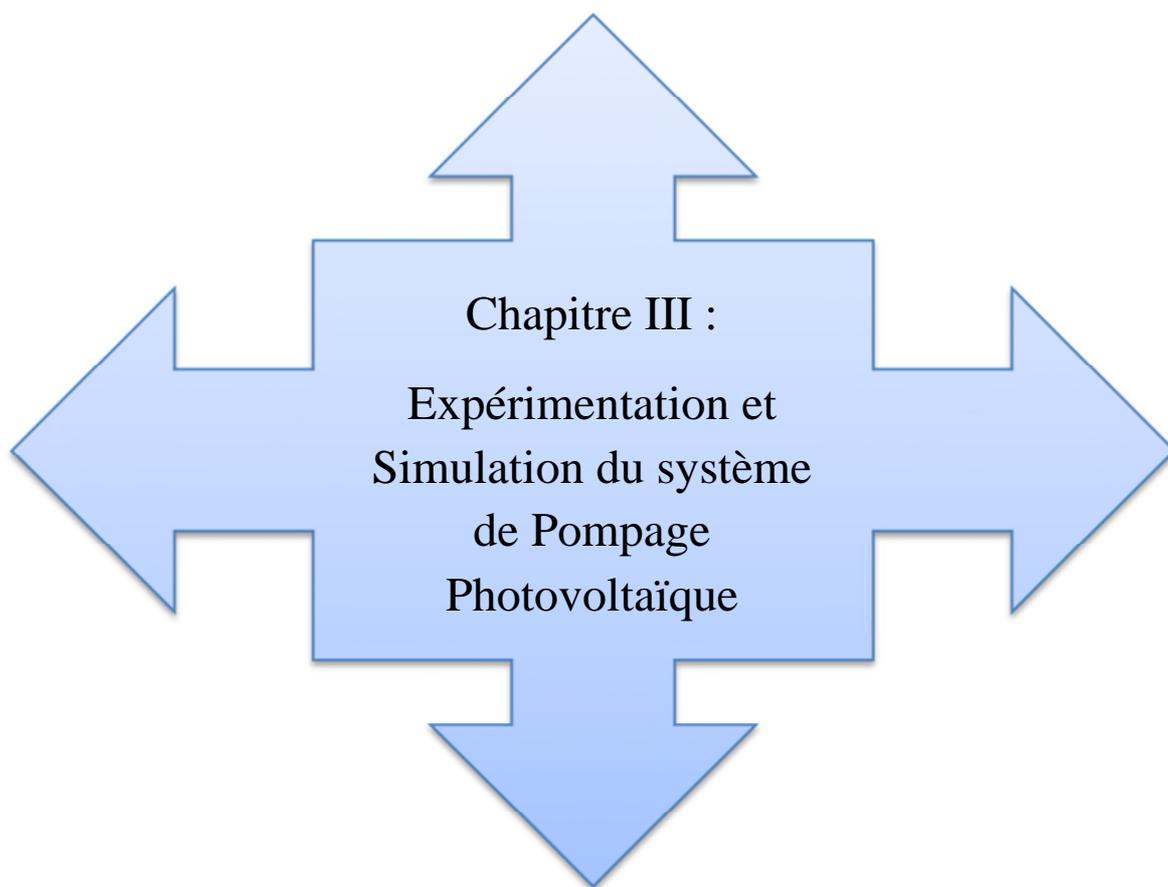


Figure II.27: Caractéristique de couple de charge et du couple électromagnétique de la pompe en fonction de temps.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque, afin de faciliter l'accès à leurs simulations. La caractérisation du module photovoltaïque à l'état sain avec les deux méthodes citées précédemment, ainsi qu'une étude comparative entre les résultats obtenus ont été aussi présenté.



Introduction :

Dans ce chapitre, une étude pratique et par simulation d'un système de pompage photovoltaïque installé sur le site de Bejaia, au niveau du laboratoire LTH, du département de Génie Electrique, à l'université Abderrahmane Mira de Bejaia sera présenté. La description des étapes de réalisation a été décrite.

L'étude sera faits pour un fonctionnement au fil du soleil, pour une hauteur manométriques totale (5 mètre), et pour un volume d'eau pompée de 50 litres durant une journée bien ensoleillé, Les différents résultats obtenues seront présentés et commentés.

III.1. Données de base [36]

Le débit d'eau de la pompe et la hauteur manométrique du pompage sont des données nécessaires pour le dimensionnement de la pompe solaire et de ses composants.

III.1.1. Le débit

Le débit d'eau est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Le débit est donné en litre par heure (l/h) ou en mètre cube par jour (m³/j).

III.1.2. Hauteur manométrique totale (HMT)

La HMT est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Elle peut être calculée comme suit :

$$HMT = H_g + P_c \dots\dots\dots III.1$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

P_c : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont fonction de la distance des conduites (L), de leur diamètre (dc) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre de colonne d'eau. Le diamètre des conduites (dc) doit être calculé afin que les pertes de charge P_c correspondent au plus à 10% de la HMT.

III.1.3. Niveau statique [37]

Le niveau statique (N_s) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

III.1.4. Niveau dynamique

Le niveau dynamique (N_d) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement.

R_m : rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

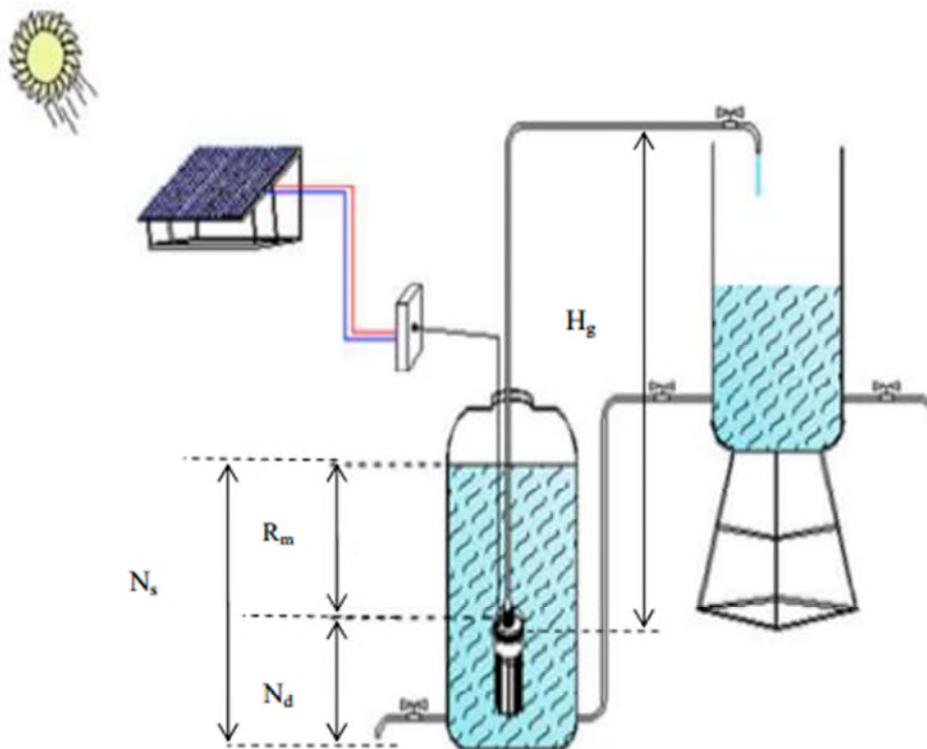


Figure III.1 : Données de base d'une pompe.

III.2. Expressions utilisées dans le calcul

Les différentes expressions utilisées sont :

Calcul du débit :

$$Q = v * s \dots \dots \dots \text{III.2}$$

Avec :

v : la vitesse de la machine a courant continue

S: la surface de la tuyauterie intérieur de la pompe

Calcul du rendement du générateur photovoltaïque :

$$\eta_{pv} = \frac{p}{E_s \cdot S \cdot N_s \cdot N_p} \dots\dots\dots \text{III.3}$$

Avec :

P: la puissance électrique (P=U*I) (W),

Es : l'ensoleillement mesuré (W/m2),

S : la surface du panneau utilisée (m2),

Ns : le nombre de panneaux en série,

Np : le nombre de panneaux en parallèle.

Rendement du groupe motopompe

$$\eta_{pompe} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3600 \cdot P} \dots\dots\dots \text{III.4}$$

Avec:

ρ : La masse volumique de l'eau, g la gravité

3600 : le nombre de secondes par heure,

Q : le débit de l'eau pompé en (l/h) ou (m3/h),

H : la hauteur manométrique totale (m).

Le rendement total

$$\eta_{tot} = \eta_{pv} \cdot \eta_{pompe} \dots\dots\dots \text{III.5}$$

III.3. Etude d'un système de pompage photovoltaïque

Dans le cadre de notre travail, une installation de pompage photovoltaïque s'est avérée nécessaire, nous proposons le schéma du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil a étudié :

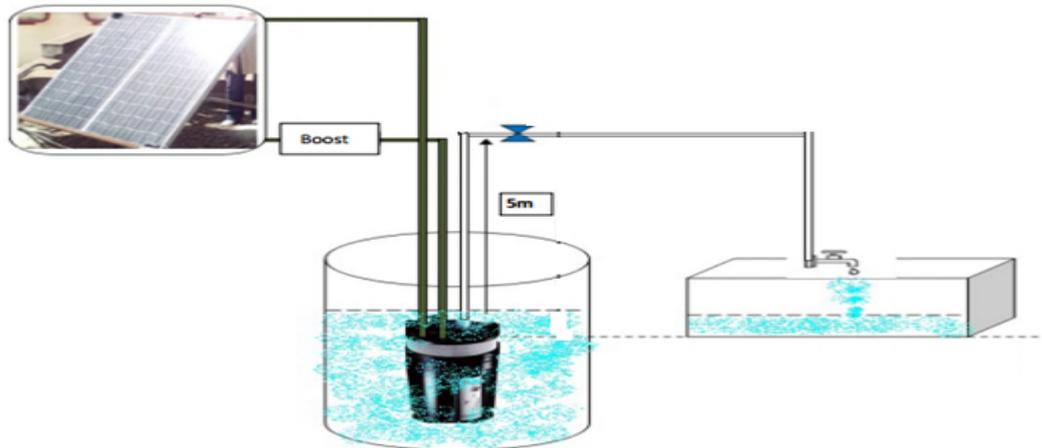


Figure III.2 : Schéma complet de l'installation de pompage PV à étudier.

III.3.1. Implantation du générateur photovoltaïque

Un panneau de 110 W crêtes de type SIEMENS (110-24) a été installé sur le toit de laboratoire LT.I.I. Ce dernier est installé sur un support métallique incliné de 45°, et dirigé vers le sud afin de capter le maximum de flux solaire durant toute la journée et durant l'année



Figure III.3 : Générateur photovoltaïque avec support.

III.3.2. Installation des réservoirs d'eau et de la canalisation

Cette partie consiste à l'étude d'un circuit fermé pour le pompage d'eau. Deux réservoirs d'eau, un remplace le puits (source d'eau) où est immergée la pompe, l'autre utilisé pour le stockage de l'eau pompé à partir du premier réservoir.



Figure III.4 : Réservoirs d'eau et canalisation.

III.3.3. Mise en place du groupe motopompe :

Cette étape a fait l'objet de l'immersion du mono bloc motopompe dans un réservoir qui a une fonction d'un puits accroché à un support métallique afin d'assuré une teneur en eau continue.

La pompe immergée Shurflo 9325 est conçu pour des trous de forage de 100 mm de diamètre et une installation de 70 mètres maximum de hauteur manométrique total, elle peut fonctionner au fil du soleil ou sur batteries, son débit varie entre 130 à 430 litres/heure suivant la puissance des panneaux et la hauteur manométrique.

Des mesures ont été prises sur le banc expérimental (05 mètres) et un volume de (50 litres) pour une journée.



Figure III.5 : Groupe motopompe immergée.

III.3.4. Partie électrique

Le panneau est connecté à un interrupteur pour commander le fonctionnement de l'installation. Il est ensuite directement raccordés aux bornes du régulateur de charge solaire de type STECA, auquel est raccordé aussi un accumulateur de type SUNLIGHT 100 et la pompe comme une charge à alimenter, un booster de courant est branché en amont du groupe motopompe.



Figure III.6 : Différents composants électriques.

La principale fonction de ce système (Booster) est de maximiser le débit journalier tout en protégeant la pompe. Lors d'une utilisation avec panneaux solaires pour pompage au fil du soleil, ce système protège la pompe contre les surtensions et des conditions de suralimentation. Egalement, le booster fonctionnera comme survolteur lors de conditions d'ensoleillements médiocres. Il maintient une tension constante aux alentours de la puissance maximale du panneau pour atteindre les conditions électriques optimales de la pompe.

III.4. Etude expérimentale du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil

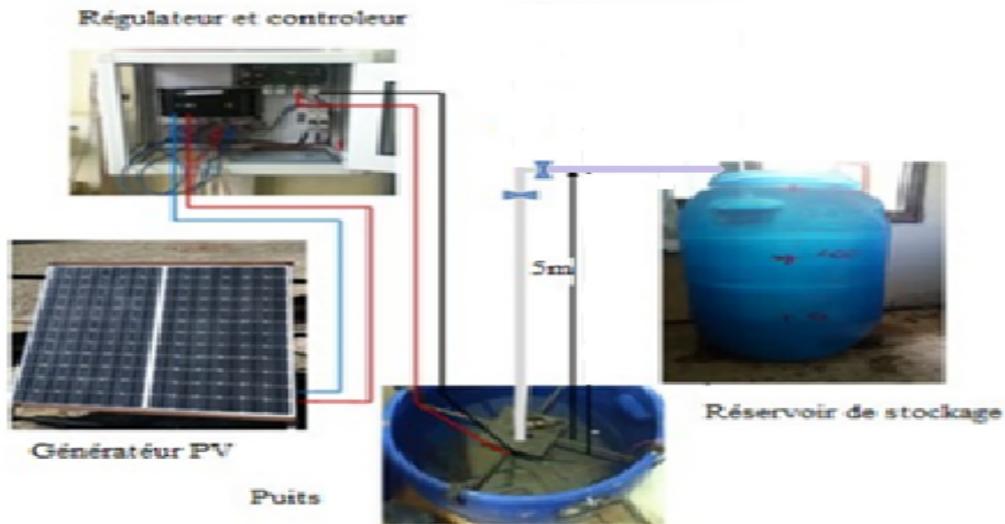


Figure III.7 : Schéma du système de pompage au fil du soleil.

III.4.1. Les résultats obtenus :

Résultats pour un volume de 50 L

- Pour une hauteur de 5 m

On a choisit de prendre une journée bien ensoleillée (20/06/2019). Les résultats obtenus sont les suivants :

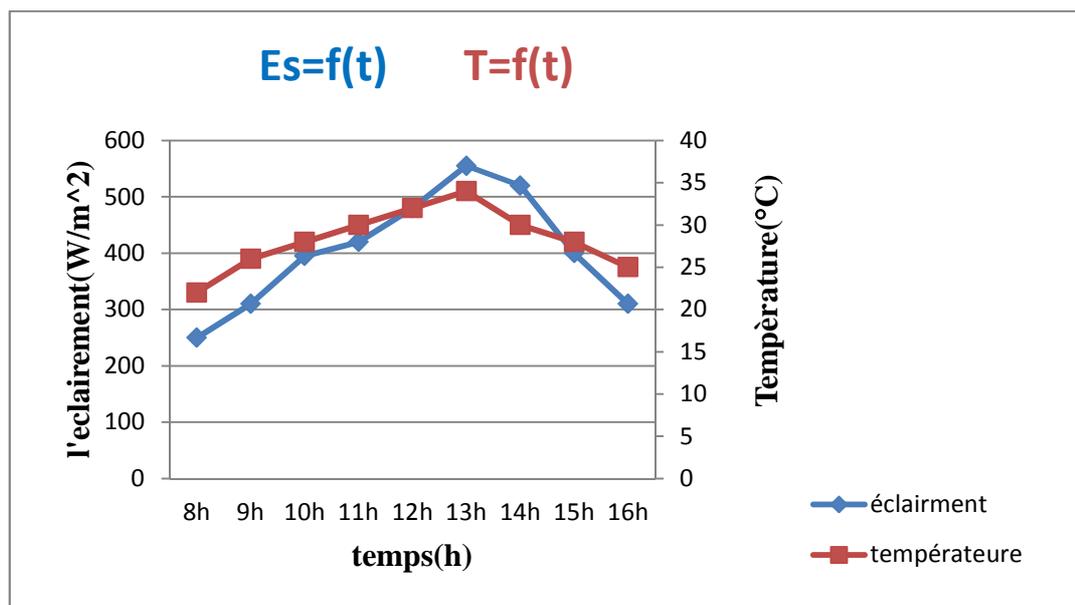


Figure III.8 : L'éclairement et la température durant

La journée du 20 juin 2019 pour HMT=5m

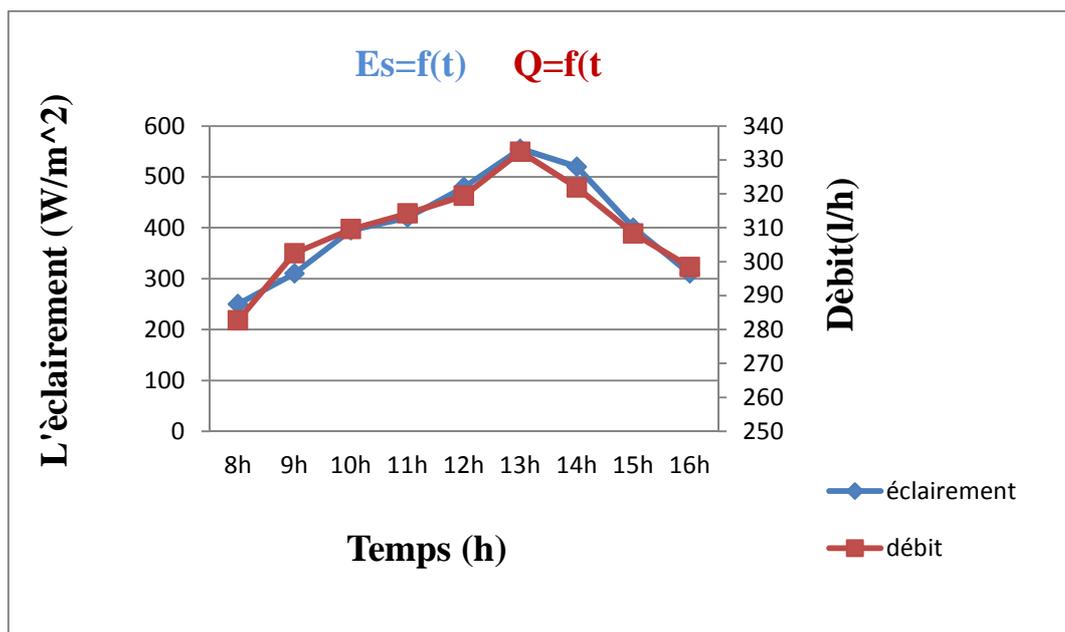


Figure III.9 : L'éclairement et le débit durant La journée

Du 20 juin 2019 pour HMT=5m

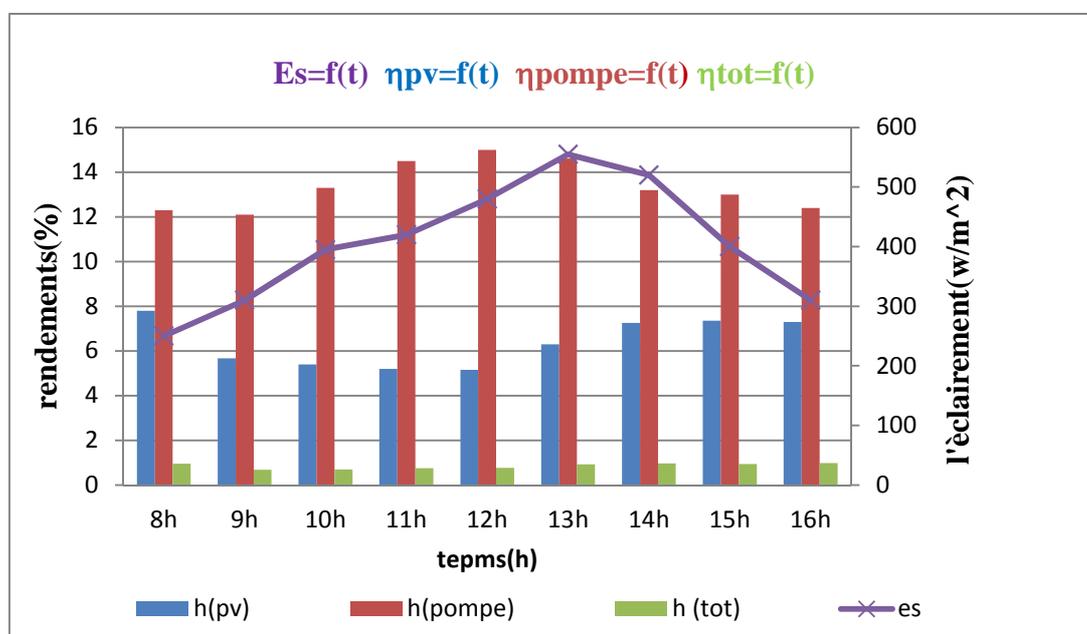


Figure III.10 : Evolution des différents rendements durant La journée

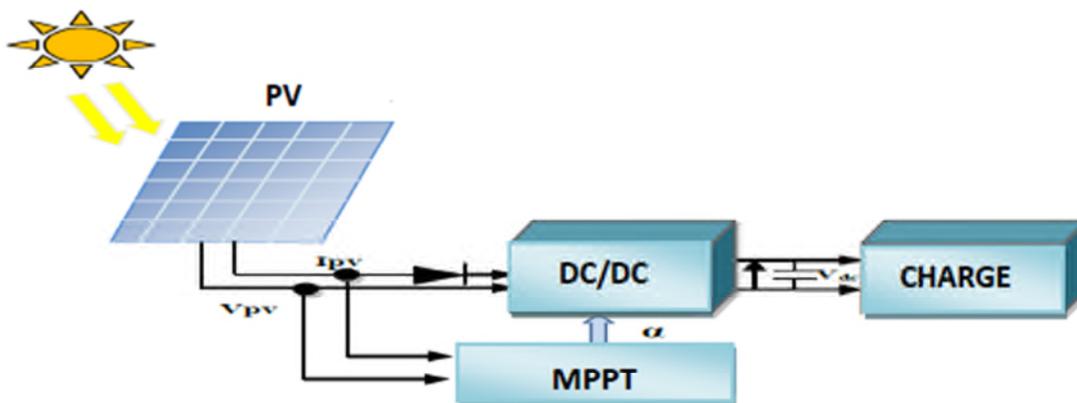
Du 20 juin 2019 pour HMT=5m

III.4.2. Commentaires des résultats

- Le débit est proportionnel à l'ensoleillement durant la journée et atteint son maximum entre 11h et 13h.
- Les performances du système suivent le profil de l'ensoleillement.
- Le débit de la pompe atteint une valeur plus élevée de 332.43 (l/h) pour une hauteur de 5m et un volume de 50L.
- Les différents rendements sont plus importants durant la journée, le rendement de la pompe est proportionnel à l'ensoleillement, le rendement du panneau est inversement proportionnel à l'ensoleillement.

III.5. Application et simulation de la méthode perturbation et observation (P&O) sur un panneau photovoltaïque :

La figure suivante décrit le système photovoltaïque, Il est constitué d'un panneau photovoltaïque de type PV SM110 de 110W, un hacheur BOOST, et d'une charge résistive de 70w



Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque avec l'application de la méthode de MPPT (P&O) sous les conditions standard ($G=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$).

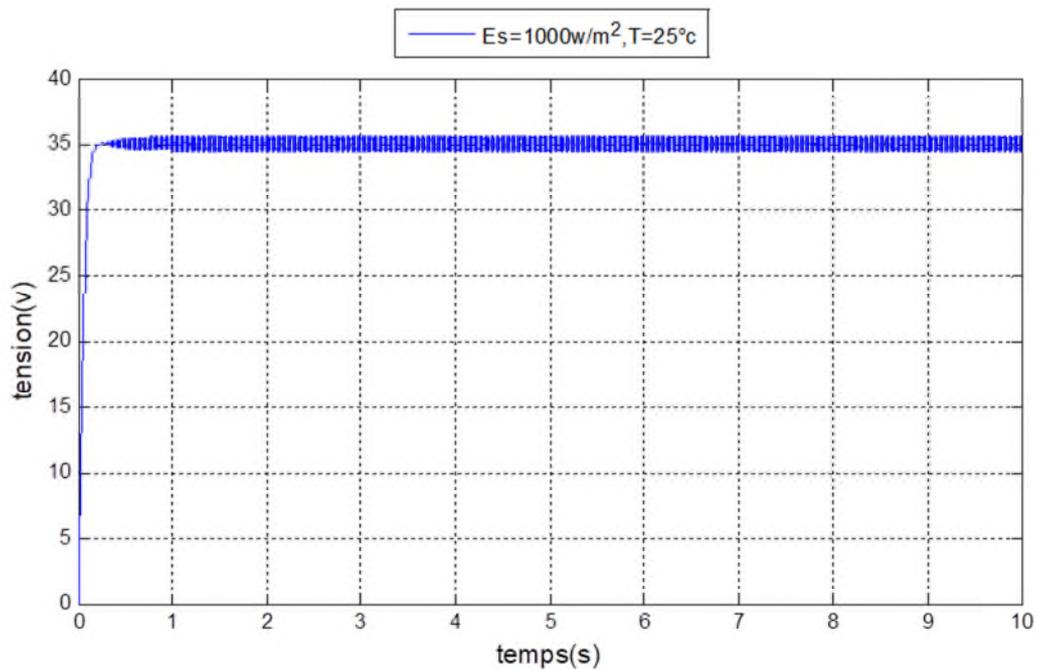


Figure III.11 : Allure de la tension sous conditions standards

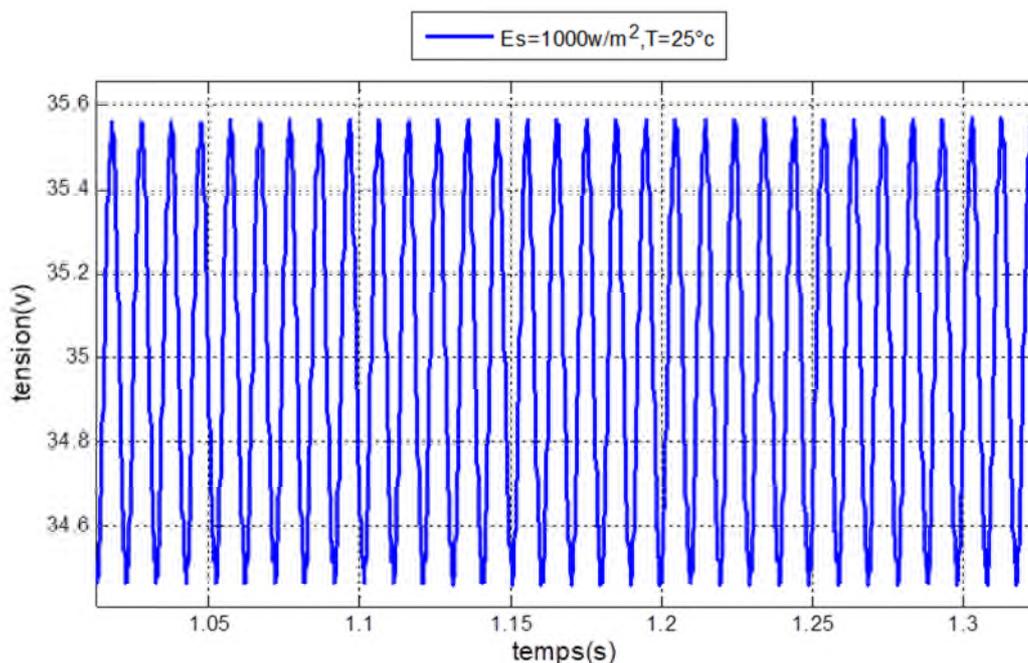


Figure III.12 : Zoom en régime permanent sur l'allure de la tension

D'après les résultats de simulations de la figure (III.7), on remarque bien que la tension converge vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximal. Et d'après le zoom figure (III.8) on constate aussi que la méthode perturbation et d'observation (P&O) présente des oscillations en régime permanent suit à la perturbation continue de la tension de

Expérimentation et simulation du système de pompage Photovoltaïque

fonctionnement et ça causera des pertes de puissance, mais cette méthode reste toujours efficace vu sa simplicité et aussi son coût par rapport aux autres techniques d'MPPT.

III.6. La simulation du système de pompage

Après avoir modélisé le système de pompage photovoltaïque étudié, il est indispensable de simuler le bloc complet du système. Le schéma bloc présenté dans la figure (III.11) le schéma bloc qui suit montre les différents composants constituant ce système à savoir le générateur photovoltaïque, le convertisseur MPPT et le bloc motopompe. Cette simulation nous permet de voir la vitesse et le couple électromagnétique du moteur ainsi que le débit de la pompe.

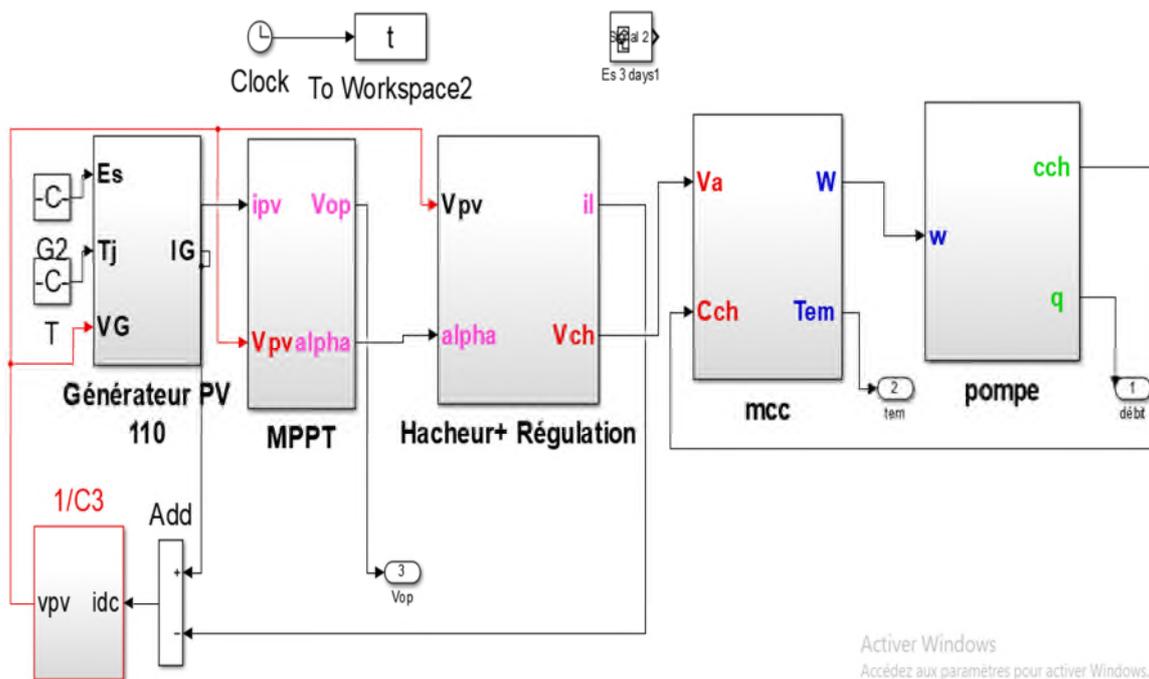


Figure III.13 : Schéma bloc du système complet sous Matlab/Simulink

➤ Résultats de la simulation :

On simule le système global pour une hauteur 5m pour différents ensoleillements et températures mesurées précédemment dans la partie pratique. Cette simulation montre l'influence de l'éclairement et de la température et nous permet de faire une comparaison entre les résultats :

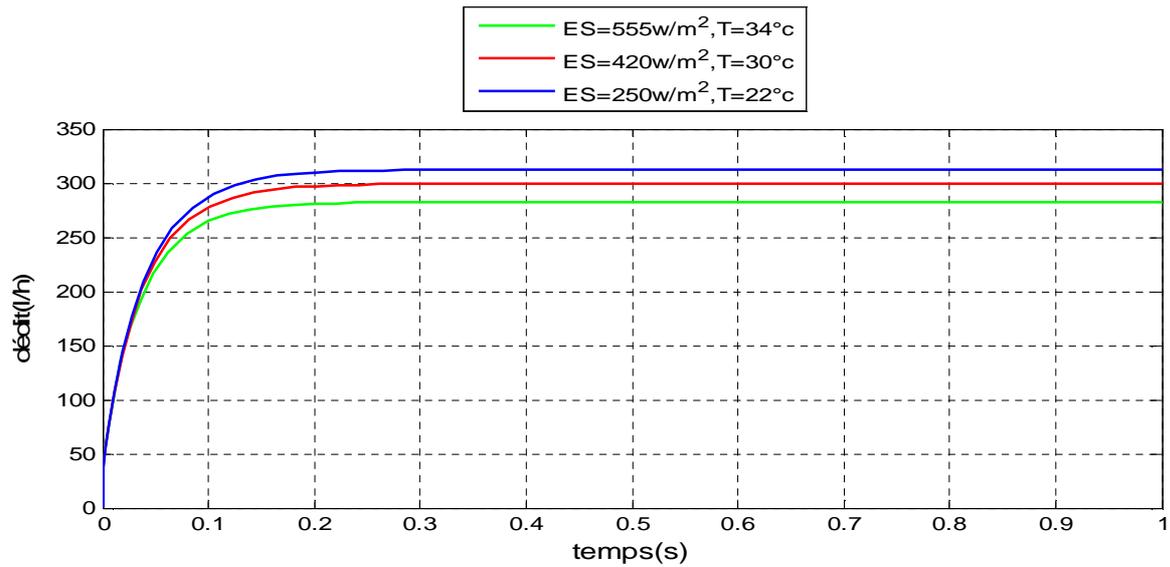


Figure III.14: Influence de l'éclairement et de la température sur le débit

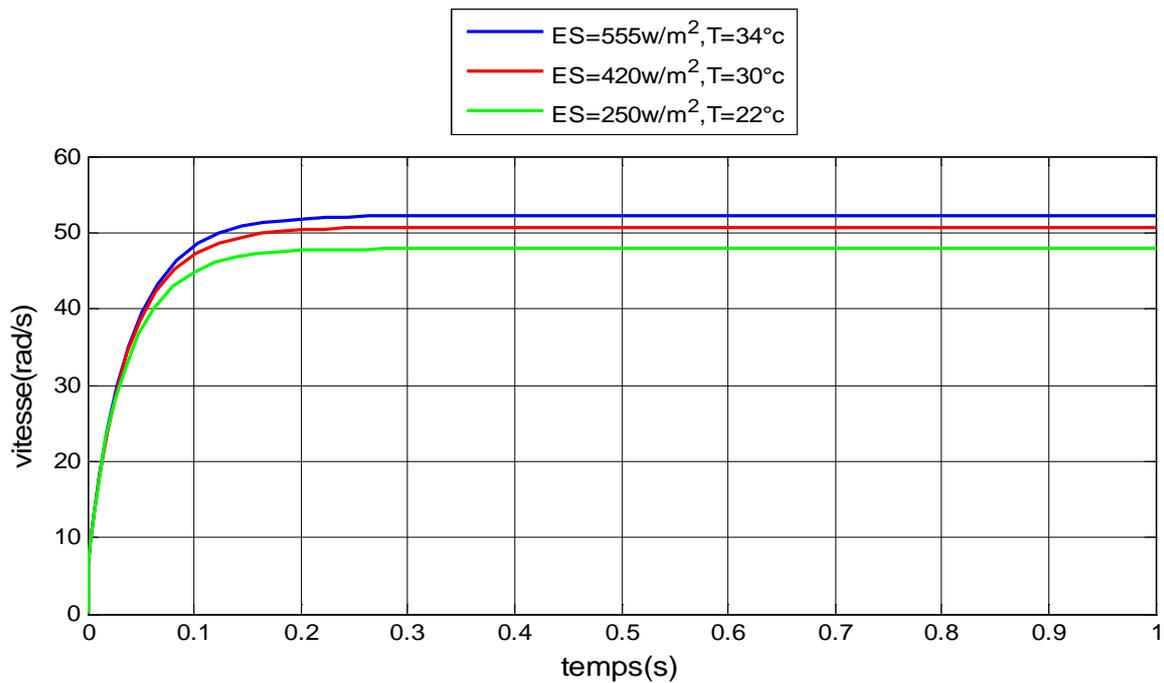


Figure III.15: Influence de l'éclairement et de la température sur le vitesse.

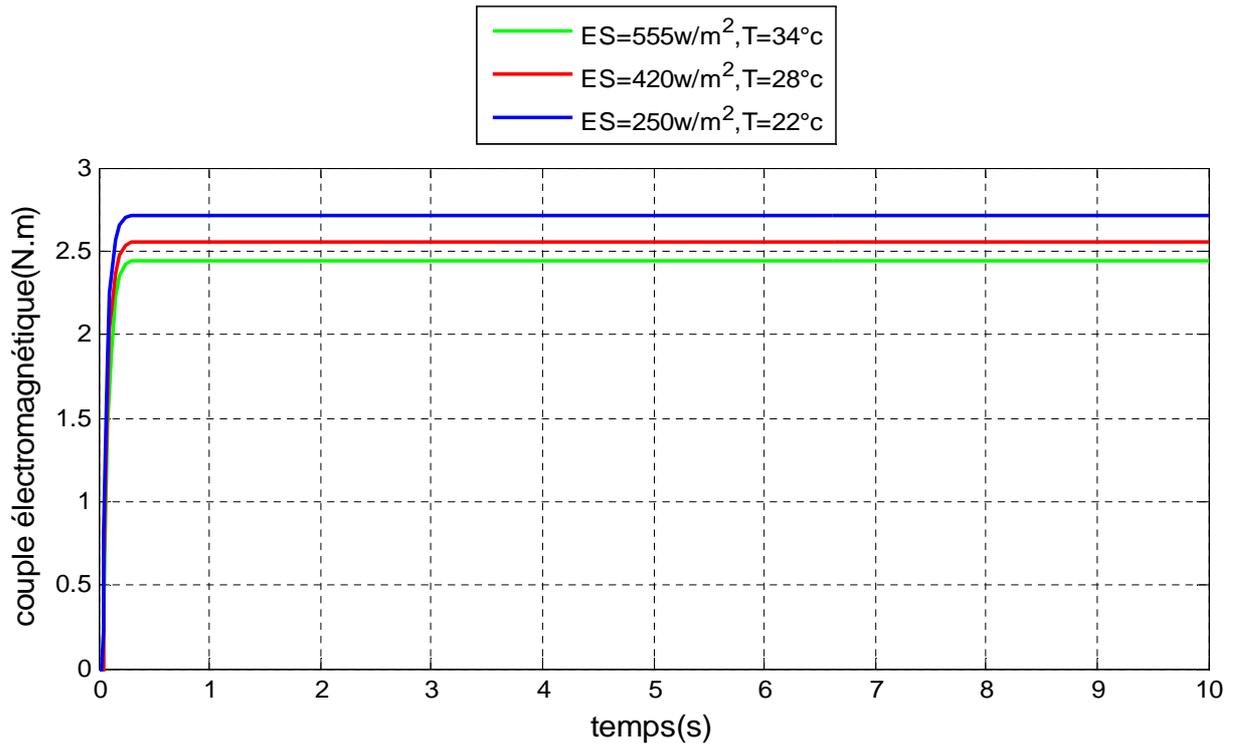


Figure III.16: Influence de l'éclairement et de la température sur Couple électromagnétique.

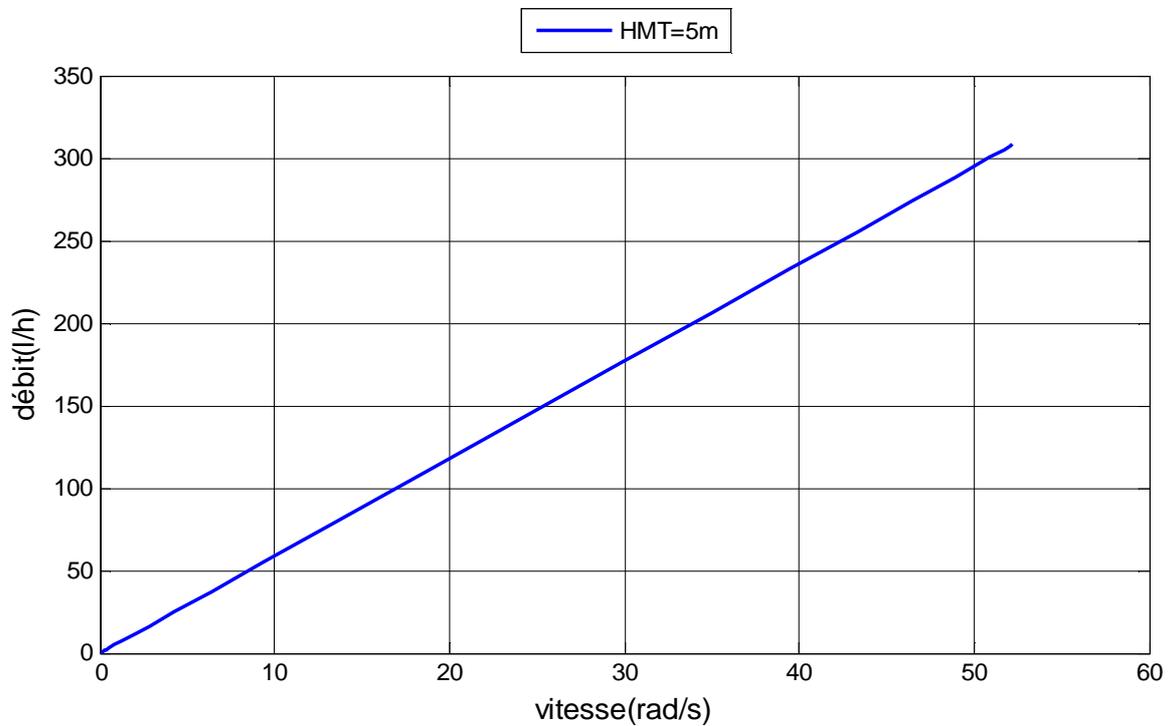


Figure III.117: Caractéristique du débit en fonction de la vitesse

III. 7. Comparaison entre les résultats pratique et simulation

On injecte une cloche d'ensoleillement et une autre pour la température dans le bloc complet du système de pompage, nous permet de voir l'influence de la hauteur sur le débit de la pompe ainsi la vitesse et le couple du moteur durant la journée, le bloc est représenté sur la figure suivante :

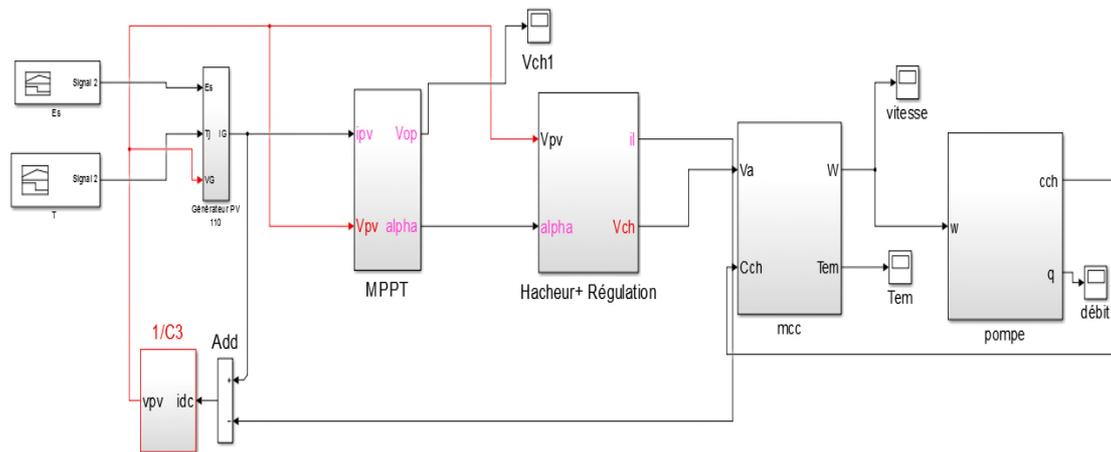
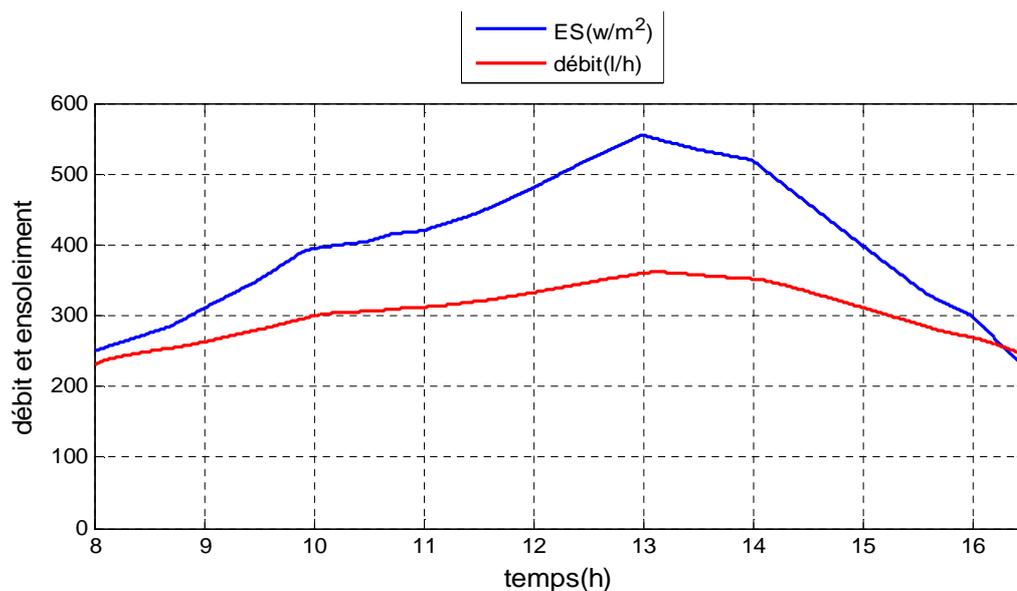


Figure III.18:Schéma général du système de pompage PV avec la cloche.

- Les résultats obtenus de la simulation par un système de pompage au fil du soleil pour une hauteur de 5msont représentés ci-dessus :



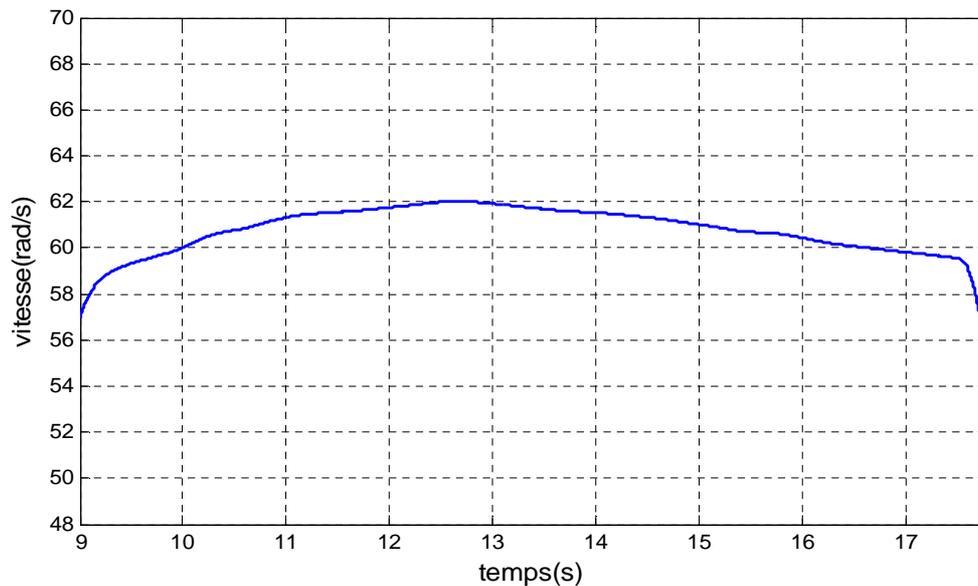


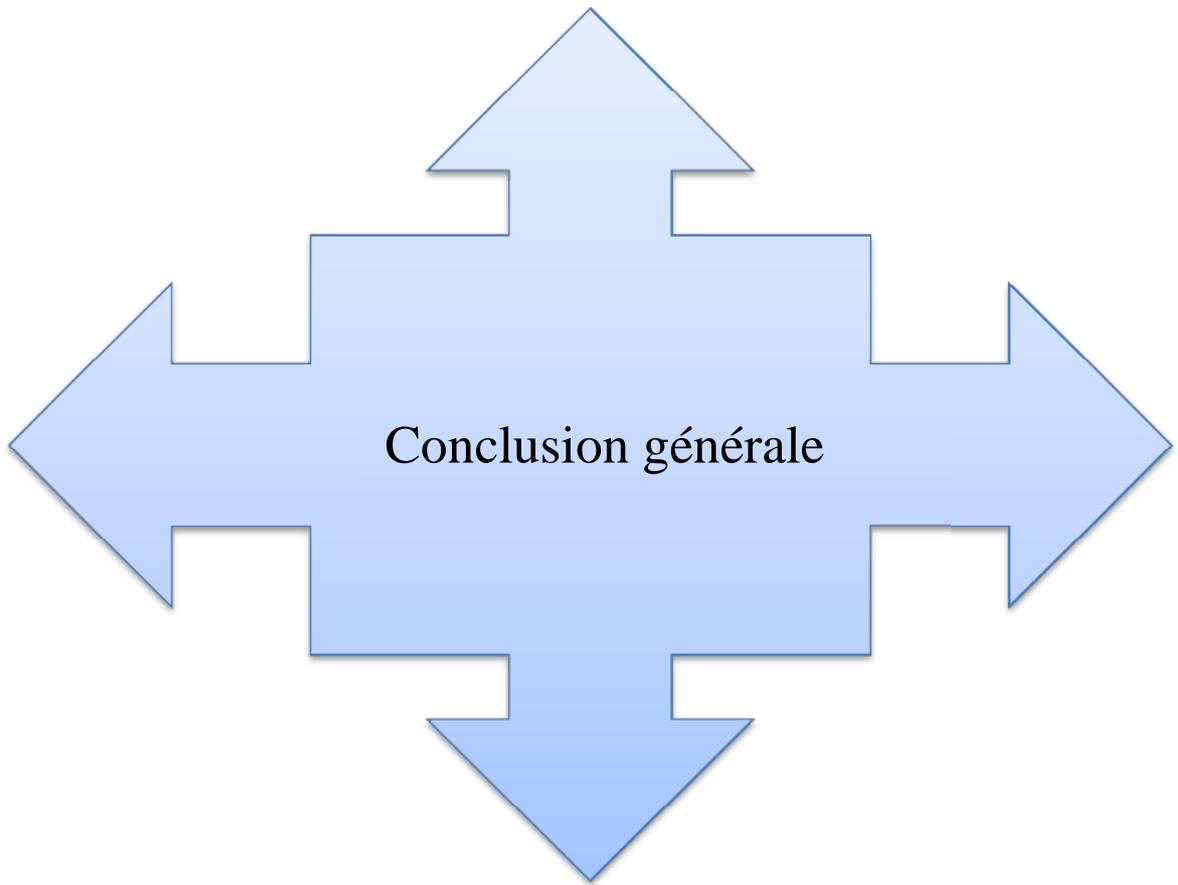
Figure III.119: Résultats de simulation durant la journée pour 5m.

III. 7. 1. Interprétation des résultats

- La courbe du débit est proportionnelle à la vitesse, la pompe volumétrique ne nécessite pas une certaine vitesse pour le démarrage de la pompe.
- La vitesse du moteur dépend de l'ensoleillement, cela veut dire que pour des valeurs d'éclairement élevé le moteur s'accélère et le volume d'eau pompé augmente, dans le cas contraire le moteur ralentis cela provoque une diminution du volume d'eau pompé.
- Le débit délivré par la pompe est en fonction de l'éclairement solaire, cela veut dire qu'une variation de l'éclairement engendre la variation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque qui va être ressentie par le moteur.
- Nous constatons que, le débit est presque identique entre les tests pratiques et la simulation
- La courbe du débit est proportionnelle à la vitesse, la pompe volumétrique ne nécessite pas une certaine vitesse pour le démarrage de la pompe.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés toutes les caractéristiques obtenus du système de pompage photovoltaïque, ainsi les résultats de la simulation du système complet sous Matlab /Simulink. Une étude comparative entre la simulation et la pratique a été faite, cela nous permet de conclure le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque étudié.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail s'est porté sur l'étude et simulation d'un système de pompage Photovoltaïque, auquel nous avons implanté un algorithme d'optimisation.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques en générale. Nous nous intéressés à l'application pompage

Ensuite, Nous avons présentés la modélisation des différents composants du système. On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode qui présente un bon compromis entre simplicité et précision. Le modèle de la machine à courant continue ainsi que le convertisseur statique appelé convertisseur DC-DC (boost).et de la pompe...imméré sont aussi données.

Afin d'exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum, l'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale est la P&O «Méthode de perturbation et d'observation».

Pour le dernier chapitre, on a procédé à une étude expérimentale et simulation du système de pompage photovoltaïque, Nous pouvons conclure que les résultats de simulation concordent avec ceux de la pratique.

Liste des symboles et abréviations

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PV : Photovoltaïque.

Eph : Energie de photon (W/m^2)

λ : Représente la longueur d'onde.

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière.

A : Facteur de qualité de la diode.

Es : Ensoleillement (W/m^2).

PN : Représentant la jonction de la cellule.

HMT : Hauteur manométrique totale (m).

DC/DC : Convertisseur continu-continu.

DC/AC : Convertisseur continu-alternatif.

Ppv : Puissance photovoltaïque (W).

Rs : Résistance série (Ω).

Rsh: Résistance shunt (Ω).

Iph: photo courant (A). I

0: Courant de saturation de la diode (A).

K: Constante de Boltzmann ($k= 1.38.10^{-23}J/K$).

q : Charge de l'électron ($q=1.602.10^{-19}C$).

T : Température de la cellule ($^{\circ}K$).

Id : Le courant de la diode (A).

I0d : courant inverse de saturation de la diode.

Vco : Tension en circuit ouvert (V).

Icc : Courant de court-circuit (A).

ΔT_c : Représente la variation de la température.

Liste des symboles et abréviations

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

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

STC : Les conditions standards.

P&O : Méthode de perturbation et d'observation.

P : Puissance disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (W).

I : Courant continu fourni par une cellule photovoltaïque (A).

V : Tension continue donnée par une cellule photovoltaïque (V).

P_{max} : Puissance au point maximum (W).

V_{ppm} : Tension au point de puissance maximale (V).

I_{ppm} : Courant au point de puissance maximale (A).

P_{in} : La puissance du flux lumineux incident.

P_c : Puissance crête (Wc).

P_n : Puissance nominale du panneau (W).

P_{pv} : Puissance photovoltaïque (W).

N_s : Nombre de module en série.

N_p : Nombre de module en parallèle.

E_{ref} : Ensoleillement de référence (W/m²).

T_j : Température de jonction (°C).

T_{ref} : Température de référence (°C).

T_a : Température ambiante (°C).

Noct : Température de fonctionnement nominal des cellules (Nominal operating cell temperature).

P1, P2, P3, P4: Paramètres constants.

I_{sat} : Courant inverse de saturation de la diode (A).

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

E_g : Energie de gap (eV).

I_{Rsh} : Courant passe par la résistance shunt (A).

Liste des symboles et abréviations

I_m : Courant maximal (A).

$I_{pv.nouv}$: Nouvelle valeur de courant après la correction (A).

ISC.STC : Courant photovoltaïque dans les conditions standard (A).

$V_{pv.nouv}$: Nouvelle valeur de tension après la correction (V).

V_m : Tension maximal (V).

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} (mA/°C).

β_{oc} : Coefficient d'incrémentation de la tension (mV/°C).

ΔI : La variation du courant (A).

ΔV : La variation de la tension (V).

ΔT : La variation de la température (°C).

FF : Facteur de forme.

S : Surface du panneau utilisée (m²).

α : Rapport cyclique.

V_e : Tension aux bornes de la source (V).

V_s : Tension aux bornes de la charge (V).

R_a : Résistance de l'induit (Ω)

L_a : Inductance de l'induit (H)

E : La force électromotrice (V).

J : Le moment d'inertie de la machine (Kg.m²).

Γ : Le couple électromagnétique (N.m).

Γ_r : Couple résistant (N.m).

Fr : Coefficient de frottement.

Cch : Couple de charge (N.m).

Q : Le débit d'eau pompée (l/h).

Hg : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

Pc : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites.

Ns : Niveau statique.

Liste des symboles et abréviations

Nd : Niveau dynamique.

Rm : Rabattement.

P : La puissance électrique (W).

V : Le volume d'eau (l).

t : Le temps (s) ou (h).

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s²).

ρ : La masse volumique de l'eau (1000 Kg/m³).

Pv : Rendement du générateur photovoltaïque.

pomp : Rendement du groupe motopompe.

tot : Rendement total.

m: Le débit massique.

H : La hauteur manométrique totale (m).

Δt : La différence de temps de pompage (min).

ε : L'erreur du débit (entre la pratique et la simulation).

Références bibliographiques

- [1] H. Reeves ; Mal de Terre, Science ouverte, Editions de Seuil, mars 2003.
- [2] C. Serrir, «Optimisation des Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique Option : Systèmes Electro-Energétiques, Université A. Mira-Bejaia ; 2012.
- [3] B. Flèche, D. Delagnes, «Energie solaire photovoltaïque » Cours production d'énergie électrique. www.scrib.com.juin 2007.
- [4] A.labouret ,D.delagne «énergie solaire photovoltaïque ,le manuel du professionnel» édition de nord , paris (France) aout 2003 , paris (France)
- [5] N. Hadim, K. Ferhat, «Etude et Optimisation d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de Master en Electrotechnique Option: Energies Renouvelables, Université A.Mira de Bejaia ; 2016.
- [6] L. Lazari, N. Mebarki, « Etude D'un Système Photovoltaïque » ; Mémoire De Master En Electrotechnique Option : Energies Renouvelables, Université A. Mira Bejaïa, 2014.
- [7] K. Dehouche, K.Mouhoubi, « Etude et Conception d'un System de Pompage Photovoltaïque avec Stockage Electrochimique », Mémoire Master en Génie Electrique Option : Energie Renouvelable, Université A. Mira de Bejaia ; 2014.
- [8] A. Soualmia, « Intégration De La Production Décentralisée Dans Un Système De Pompage Photovoltaïque », Thèse De Magister En Electronique, Option : Instrumentation, Spécialité : Matériaux, Microsystèmes Et Nanotechnologie, Université Constantine1, 2014.
- [9] I.Bendjamâa, « Modélisation Et Commande D'un Système De Stockage Photovoltaïque », Mémoire De Magister, Unité De Recherche Matériaux Et Energies Renouvelables, Ecole Doctorale : Energies Renouvelables Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [10] M. Mezzai, S.Mouloudji, « Contribution A L'étude D'un Système De Pompage Photovoltaïque », Mémoire De Master En Electrotechnique Option: Energies Renouvelables, Université A. Mira De Bejaia, 2014.
- [11] S. Aoufi, «Modélisation Et Commande D'un Système De Pompage Photovoltaïque », Mémoire De Magister Option: Commande Electrique ; Université F.ABBAS de SETIF, 2014
- [12] R N Can «les systèmes photovoltaïques » ressources manuelles canada(énergies renouvelables).
- [13] F. Domain, « Formation Présentation Des Technologies Solaires », Institut National de L'énergie Solaire (INES), Novembre 2007.

- [14] I. Compaore, B. Dakyo, Y. Coulibaly, « Une Méthode Simplifiée Pour La Conception Des Unités De Pompage Photovoltaïque A Couplage Direct », Université le Havre, 2009.
- [15] T. Bouguerra, « Optimisation D'un Système Photovoltaïque : Application En Continu Et En Alternatif » ; Mémoire Master En Génie Electrique ; Université Mentouri De Constantine 1 ; 2014
- [16] K. Rahrah, « Dimensionnement Et Optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque Destinés Pour L'alimentation En Eau Potable », Thèse Doctorat En Electrotechnique Option Système Electro Energétique, Université A.Mira De Bejaia, 2016
- [17] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sadasy, « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Éditions Multi Mondes, Université d'Ottawa, 1998.
- [18] A. Daoud, « Contrôle De La Puissance D'un Générateur Photovoltaïque Pour Le Pompage Solaire », Thèse De Doctorat Es-Sciences Spécialité : Electronique Option : Systèmes Photovoltaïques ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf ; 2013.
- [19] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique
- [20] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Machines_.C3.A0_c
- [21] R.MAOUEDJ « application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » ; Mémoire de Magister en Physique ; Université de Tlemcen ; 2005.
- [22] KY. Thierry, S. Maurice « Système Photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte-à-goutte » ; Mémoire de DEA en Physique Appliquée ; université de OUAGADOUGOU, 2007.
- [23] A.mohammedi « étude d'un système de pompage photovoltaïque » Option Electromécanique, Université A.Mira De Bejaia, 2016
- [24] M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA « Le Pompage Photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69-73) ,2002.
- [25] K. EL-Melouani « dimensionnement d'un hacheur survolteur ». Application note de polytech Clermont-Ferrand, FRANCE, 2010
- [26] http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boos
- [27] H.Bonneviot. M,Courllon. Y,Maigne « technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque » fondation énergie pour le monde
- [28] N. Achaibou, A Malek , N Bacha, « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » , N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.

- [29] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga, « Etude Comparative Des Modeles De La Caracteristique : Courant-Tension D'une Cellule Solaire Au Silicium Monocristallin », Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, 301 – 306, Tlemcen, 2007.
- [30] D. Bellala, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna.
- [31] O. GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan spécialité : Electrotechnique, Bretagne, 2002.
- [32] 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.
- [33] L.Zarour, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [34] D. Rekioua, E. Matagne, « Optimization Of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation And Control », Series: Green Energy and Technology. Ed Springer, 2012.
- [35] A. Hamidat, B. Benyoucef, T. Hartani. « Small-Scall Irrigation With Photovoltaic Water Pumping System In Sahara Regions », Renewable Energy, Vol. 28, pp.1081 1096, 2003.
- [36]: Site Web: www.physique-appliquée.net/physique-appliquée/hacheur/cours-hacheur-serie.htm.
- [37]: Dj. Rekioua, A. Hamidat, K. Haddouche, L. Katti, « Dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque ». Colloque national sur l'énergie solaire ; CNESOL Bejaïa 2006.