

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA  
BADJI MOKHTAR- ANNABAUNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur  
Département : Electrotechnique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

ETUDE ET CONTROLE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Présenté par:

- ACHAICHIA Rym Ines
- HAMEL Djamel Abderaouf

Encadrant: *BAHI Tahar*

Jury de Soutenance :

<b>MOHAMMEDI Moufid</b>	<b>MCB</b>	<b>UBMAnnaba</b>	<b>Président</b>
<b>BAHI Tahar</b>	<b>PROF</b>	<b>UBMAnnaba</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>MERABET Leila</b>	<b>MCA</b>	<b>UBMAnnaba</b>	<b>Examinatrice</b>

Année Universitaire : 2020/2021

**RESUME**

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tels que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coût élevé. Dans le but d'augmenter le rendement de ces systèmes. Une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge permet de diminuer le coût de l'installation.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, le dimensionnement et la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil. Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, le moteur, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

**Mots-clés:** Panneaux photovoltaïque, Energie solaire, Modélisation, Simulation, Dimensionnement et Réalisation, Maximum Power Point tracking (MPPT), Pompe centrifuge.

**ABSTRACT**

The use of Solar Energy in isolated sites for different applications, such as water pumping, is of primary interest to people in developing countries who do not have safe Access to water drinking. But photovoltaic generators have two major drawbacks That are a low yield and a high Blow. In ordre to increase the performance of these systems. Proper adaptation Between the Solar generator and the load reduces the cost of installation.

The work presented in this memory the modeling, simulation, sizing and realization of a photovoltaic pumping system operating over the Sun. This system consists of a set of interacting elements; namely the photovoltaic panels, the motor, the centrifugal pump and the hydraulic circuit.

**Keywords:** Photovoltaic panels, Solar Energy, Modeling, Simulation, Sizing and Realization, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Centrifugal Pump.

**الملخص**

يعد استخدام الطاقة الشمسية في مواقع معزولة لتطبيقات مختلفة، مثل ضخ المياه، من الاهتمامات الرئيسة للأشخاص في البلدان النامية الذين لا يحصلون على مياه آمنة للشرب. لكن المولدات الكهروضوئية لها عيبان رئيسيان هما العائد المنخفض وضربة عالية

من أجل زيادة أداء هذه الأنظمة. التكيف السليم بين المولد الشمسي والحمل يقلل من تكلفة التركيب يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بالنمذجة والمحاكاة والتحجيم وتحقيق نظام الضخ الكهروضوئي الذي يعمل فوق الشمس. يتكون هذا النظام مجموعة من العناصر المتفاعلة؛ وهي الألواح الكهروضوئية، ومحول التيار الكهربائي والمحرك غير المترامن، ومضخة الطرد المركزي، والدائرة الهيدروليكية.

**كلمات مفتاحية:** الألواح الضوئية، الطاقة الشمسية، النمذجة، المحاكاة، التحجيم الإدراك، الحد الأقصى لتتبع نقطة القدرة، مضخة الطرد المركز

# REMERCEMENTS

*Avant tout, je remercie le bon Dieu tout puissant pour la foi, le courage et la patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces années d'études.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. BAHI Tahar pour ses conseils et sa grande assistance.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'évaluation de travail de ce mémoire.*

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

*Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation du travail de ce mémoire.*

# ***DEDICACES***

*Je dédie ce travail de mémoire de fin d'études à qui me  
sont les plus chers*

*A ma très chère mère, mon père*

*A mes très chers frères*

*A mes chères sœurs*

*A toute la famille et à tous mes amis*

*A tous mes amis de la promotion*

*RYM INES ACHAICHA*

# ***DEDICACES***

*Je dédie ce travail de mémoire de fin d'études à qui me  
sont les plus chers*

*A ma très chère mère, mon père*

*A mes chères sœurs*

*A toute la famille et à tous mes amis*

*A tous mes amis de la promotion*

*Djamel Abderraouf HAMEL*

## LISTES DES FIGURES

### **Chapitre1**

Figure (1.1)	Analyse spectrale du rayonnement solaire	7
Figure (1.2)	Composante du rayonnement placée sur un plan horizontal	8
	a) Caractéristique (courant/tension)	
	b) Caractéristique (puissance / tension)	
Figure (1.3)	puissance maximale sur une caractéristique courant-tension	10
Figure (1.4)	Différentes zones de la caractéristique $I(V)$ , $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	11

### **Chapitre2**

Figure (2.1)	Schéma d'une cellule photovoltaïque idéale	13
Figure (2.2)	schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	14
Figure (2.3)	schéma équivalent à deux diodes d'une cellule	15
Figure (2.4)	Cellules identiques connectées en série	16
Figure (2.5)	Cellules identiques connectées en parallèle	17
Figure (2.6)	Schéma de connexion mixte des modules	17
Figure (2.7)	Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques	18
Figure (2.8)	protection des modules par les diodes anti retour et by-pass	18
Figure (2.9)	les caractéristiques $I = f(U)$ et $P = f(U)$ en fonction de la température	19
Figure (2.10)	les caractéristiques $I = f(U)$ et $P = f(U)$ en fonction de l'éclairement.	20

### **Chapitre3**

Figure (3.1)	Schéma bloc d'un hacheur	21
Figure (3.2)	Hacheur parallèle	22
Figure (3.3)	Hacheur série	23
Figure (3.4)	hacheur réversible	23
Figure (3.5)	configurations du convertisseur réversible	24
Figure (3.6)	<i>ondulation de courant</i>	24
Figure (3.7)	<i>ondulation de tension</i>	26
Figure (3.8)	Schéma de principe d'un l'onduleur	27
Figure (3.9)	Onduleur de tension en pont Monophasé	27
Figure (3.10)	Signaux de commande	28
Figure (3.11)	Chaine de conversion photovoltaïque	29
Figure (3.12)	La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM	29
Figure (3.13)	La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM	30
Figure( 3.14)	caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire	31
Figure (3.15)	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	31
Figure (3.16)	caractéristique tension-puissance du panneau $P_{pv} = f(V_{pv})$	32
Figure (3.17)	Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance	33
Figure (3.18)	différents modes de convergence pour la trajectoire d'état	33
Figure (3.19)	Existence du mode de glissement	34
Figure(3.20)	Convertisseur élévateur sous Matlab/Simulink	36
Figure(3.21)	Tension d'entrée du convertisseur Boost	36
Figure(3.22)	Signal de commande du convertisseur Boost	37

Figure(3.23)	Tension de sortie du convertisseur Boost	37
Figure(3.24)	Schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O)	38

### **Chapitre 4**

Figure(4.1)	Schéma synoptique simplifié de Pompage PV	39
Figure(4.2)	Caractéristiques débit- vitesse ; couple -vitesse d'une pompe Volumétrique...	40
Figure(4.3)	Caractéristiques débit-hauteur d'une pompe volumétrique	41
Figure(4.4)	Constitution d'une pompe centrifuge	42
Figure(4.5)	Courbe H (Q) de la pompe centrifuge et la caractéristique de Canalisation	43
Figure(4.6)	Courbe de rendement d'une pompe	44
Figure(4.7)	Représente vitesse(rad/s), débit, couple (N.M)	45

**LISTES DES TABLEAUX*****Chapitre 1***

<i>Tableau (1.1)</i>	Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques	11
----------------------	---	----

***Chapitre 2***

<i>Tableau (2.1)</i>	Caractéristiques du panneau photovoltaïque	19
----------------------	--	----

# Sommaire

Résumé	1
Introduction générale	4

## Chapitre 1

### SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1	Introduction	7
1.2	Rayonnement solaire	7
	Rayonnement direct	
	Rayonnement diffus	
	Rayonnement réfléchi	
	Rayonnement global	
1.3	Cellule photovoltaïque	8
	Le Courant de court-circuit, $I_{cc}$	
	La Tension à circuit ouvert, $V_{co}$	
	Puissance et facteur de forme	
	Le facteur de forme	
	Le rendement	
1.3.1	Type des cellules photovoltaïques	10
1.4	Zone de fonctionnement du module solaire	11
1.5	Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	12
1.5.1	Les avantages	
1.5.2	Les inconvénients	
1.6	Conclusion	12

## Chapitre 2

### MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

2.1	Introduction	13
2.2	Présentation et modélisation du panneau solaire	13
2.2.1	Cellule photovoltaïque idéal	
2.2.2	Modèle à deux diodes	15
2.3	Le module photovoltaïque	16
2.3.1	Connexion en série	
2.3.2	Connexion en parallèle	
2.3.3	Connexion mixte	
2.4	Protection du générateur photovoltaïque	18
2.5	Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$	19
2.5.1	Influence de la température	
2.5.2	Influence de l'éclairement	
2.6	Conclusion	20

## Chapitre 3

### ALGORITHMES MPPT POUR UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

3.1	Introduction	21
3.2	Hacheurs	21
3.2.1	hacheur parallèle	
3.2.2	<i>hacheur série</i>	
3.2.3	<i>hacheur réversible</i>	
3.3	Détermination des paramètres de l'hacheur Boost	24

3.3.1	Calcul de l'inductance L	
3.3.2	Calcul du condensateur C	
3.3.3	Définition et principe de l'onduleur	
3.4	Onduleur de tension	27
3.5	La Commande MPPT	28
3.6	Techniques MPPT	30
3.6.1	Algorithme 'Perturbation et Observation	
3.6.2	Algorithme incrémentation de conductance	
3.6.3	Théorie de la commande par mode glissement	
3.6.3.1	conception de la commande par mode glissant	
3.6.3.2	Bases mathématiques de la commande à structure variable	
3.6.3.3	Condition d'existence du mode glissant	
3.6.3.4	Choix de la surface de glissement	
3.7	<i>Simulation</i>	35
3.7.1	Simulation d'un hacheur élévateur (Boost)	
3.7.2	Simulation de l'algorithme P&O	
3.8	conclusion	38
<b>Chapitre 4</b>		
<b>LE SYSTEME POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE</b>		
4.1	Introduction	39
4.2	Moteur à courant continu	40
4.3	pompe photovoltaïque	40
4.3.1	La pompe volumétrique	
4.3.2	La pompe centrifuge	
	a) Principe de fonctionnement	
4.4	Modélisation de la pompe centrifuge	42
4.4.1	Les pertes de charge linéaires	
4.4.2	Les pertes de charge singulières	
4.4.3	La caractéristique Q (H) de la pompe	
4.4.4	La caractéristique couple vitesse C ( $\omega$ ) de la pompe	
4.4.5	Calcul de puissance	
4.4.6	Calcul du rendement	
4.5	Le choix d'une pompe	45
4.6	Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	45
4.6.1	Avantages	
4.6.2	Inconvénients	
4.7	Simulation	45
4.8	Conclusion	46
Conclusion générale		48
Bibliographie		49

## INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est à base d'énergie renouvelable doit être amplement encouragée pour faire face aux besoins énergétiques des sociétés industrialisées qui ne cessent de croître. Ceci afin de prévenir le remplacement des systèmes de production d'énergie à partir des sources fossiles par ceux à base de ressources renouvelables [1].

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide. Comme source renouvelable, on distingue le solaire, l'éolienne, la biomasse.... [2]. Elles sont alors exploitables à travers le monde grâce à leur existence. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et la plus exploitable. On la retrouve dans la nature en quantité largement suffisante pour satisfaire les besoins de la demande énergétique qui est de plus en plus en nette croissance. Cependant, la disponibilité de l'énergie solaire permet de produire de l'électricité de manière suffisante en tout lieu. Ceci leur donne l'avantage d'être exploitée même dans des zones isolées géographiquement. Donc, la contrainte de pouvoir satisfaire le besoin en électricité des habitants des zones éloignées à cause du vaste saharien. Alors, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée dans l'Algérie en raison de l'existence d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond, et elle dispose un gisement solaire Le plus élevé au monde telle que la durée d'ensoleillement peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara et la moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m<sup>2</sup> dans la mesure. Le pompage photovoltaïque est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse [3].

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Ce travail comporte quatre (4) chapitres :

- ✚ Le premier chapitre présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques leurs composants, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.
- ✚ Le deuxième chapitre présente la modélisation d'un système photovoltaïque.
- ✚ Dans le troisième chapitre, on considère essentiellement trois les algorithmes MPPT d'un panneau photovoltaïque et nous analyserons leurs performances.
- ✚ Dans le quatrième chapitre, un système pompage photovoltaïque fonctionnent au fil du soleil est d'étudié par simulation en utilisant le logiciel MatLab /Simulink.
- ✚ Finalement, une conclusion générale clôture ce travail de mémoire.

# CHAPITRE 1

## SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

### 1.1 Introduction

Avec l'exploitation des systèmes photovoltaïques dans les sites isolés (région saharienne, région montagneuse), la demande en besoin d'électricité pourra être satisfaite car l'énergie solaire photovoltaïque constitue la solution la plus avantageuse.

Ce chapitre présente une étude générale sur le système d'énergie solaire photovoltaïque avec leurs caractéristiques de base ainsi qu'une étude sur l'effet de l'éclairement et de la température sur les systèmes photovoltaïques.

### 1.2 Rayonnement solaire

Le spectre solaire se décompose en trois bandes distinctes comme suit [4].

- 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 ( $> 0,8 \mu\text{m}$ ).

La densité de la puissance solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à  $1370 \text{ w/m}^2$ . Mais, en traversant l'atmosphère, cette quantité est égale à  $1000 \text{ w/m}^2$ . Elle varie selon la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu. La figure (1.1) présente l'analyse spectrale du rayonnement solaire.

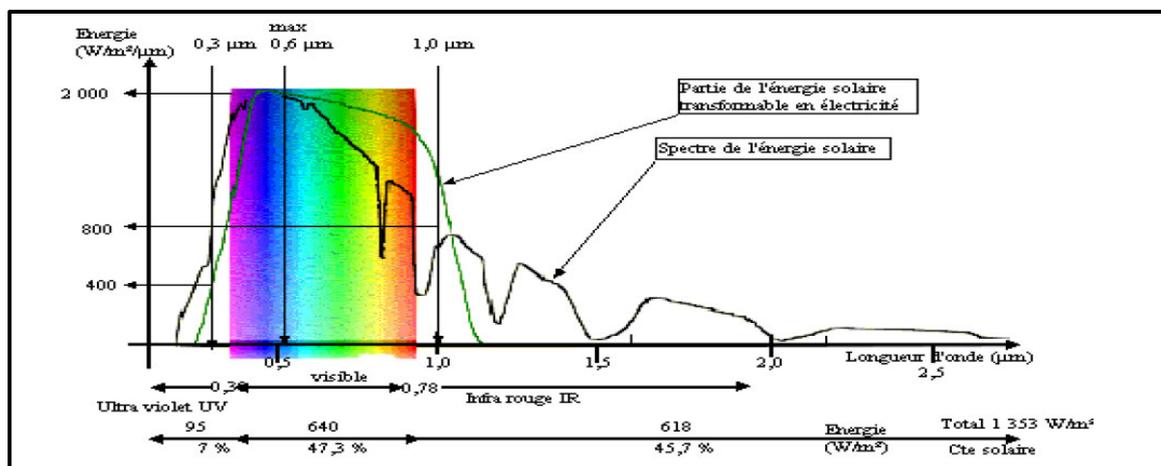


Fig.1.1 Analyse spectrale du rayonnement solaire [5]

Sachant, qu'en traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses déperditions du fait de son absorption par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Cela même à distinguer les types suivants de rayons solaires :

- **Rayonnement direct**

Il est reçu directement du soleil sans diffusion par l'atmosphère.

- **Rayonnement diffus**

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, ...) et à sa réflexion par les nuages.

- **Rayonnement réfléchi**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface.

- **Le rayonnement global**

C'est les résultats de la somme de tous les rayonnements reçus. Il est mesuré par un pyromètre placé horizontalement en lieu de mesure. Alors, rayonnement global est la somme algébrique du rayonnement direct et des rayonnements diffus et le rayonnement réfléchi.

le rayonnement global est donné par :  $R_{gl} = R_{d2} + R_{df} + R_2$

Et, la figure (1.2) regroupe la représentation de ces différentes composantes sur un plan horizontal.

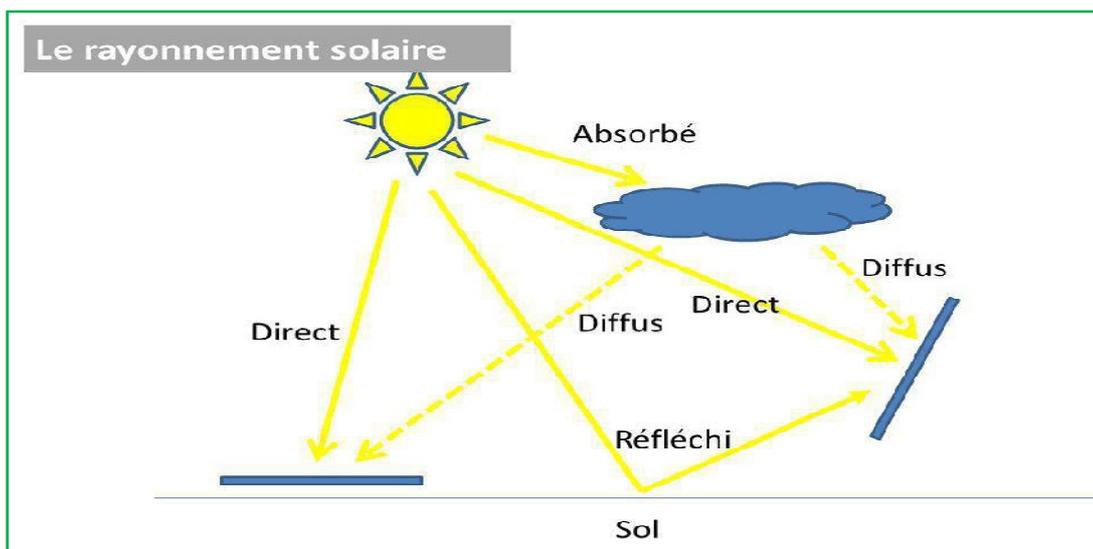
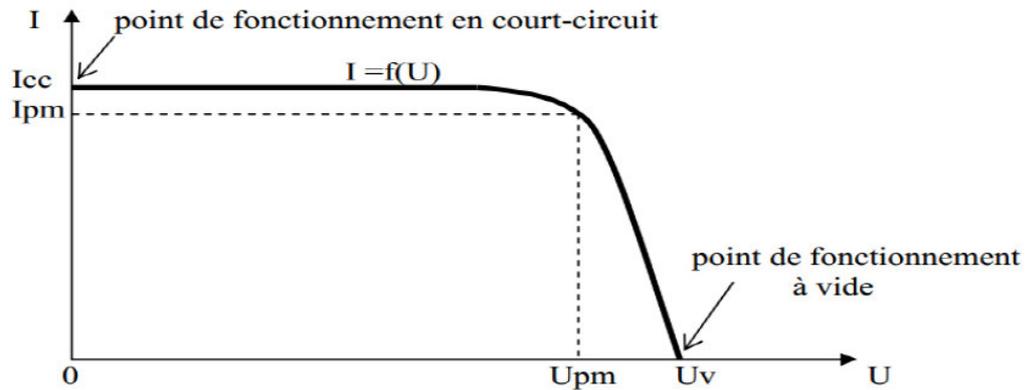


Fig.1.2 Composantes du rayonnement placée sur un plan horizontal.

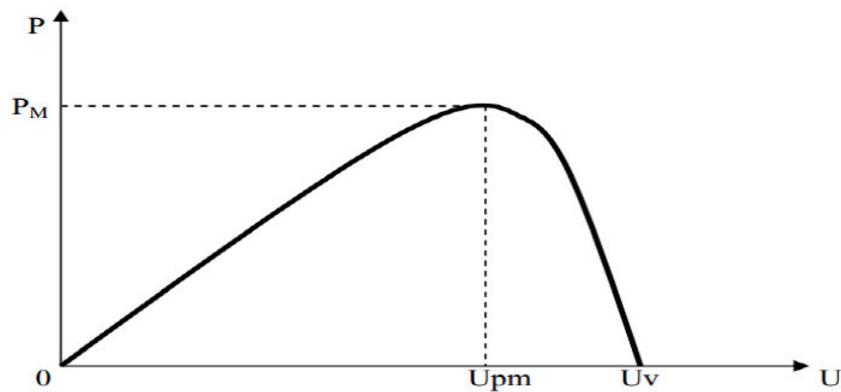
### 1.3 Cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet de convertir l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité [6]. Il génère selon, le matériau avec lequel la cellule est fabriquée une tension continue qui varie entre 0.3 V et 0.7 V [7, 8].

Pour chaque cellule photovoltaïque, on distingue fondamentalement, deux (2) types de caractéristiques dont les allures sont montrées par la figure suivante :



a) Caractéristique (courant / tension).



b) Caractéristique (puissance / tension).

De ces deux caractéristiques, on retient essentiellement, les paramètres suivants :

- **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  :**

IL est défini pour une tension nulle ( $V=0$ ), et qui n'est en réalité que le photo-courant qui est proportionnel à l'intensité de l'irradiation solaire.

$$I_{cc}=I_{ph} \quad (1.1)$$

- **Tension à circuit ouvert  $V_{co}$  :**

C'est la tension aux bornes de la cellule en l'absence de tout courant, pour un éclairage à plein soleil.

$$V_{co}=V(I=0)=m * v_t * \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (1.2)$$

- **Puissance**

C'est le critère de choix de la cellule, tout chercheur ou constructeur a tendance de chercher la photopile qui génère le maximum de puissance ou d'énergie. La figure (1.3) montre la courbe caractéristique sous lumière d'une photopile ainsi que des courbes théoriques de puissance constante (en pointillés) [9].

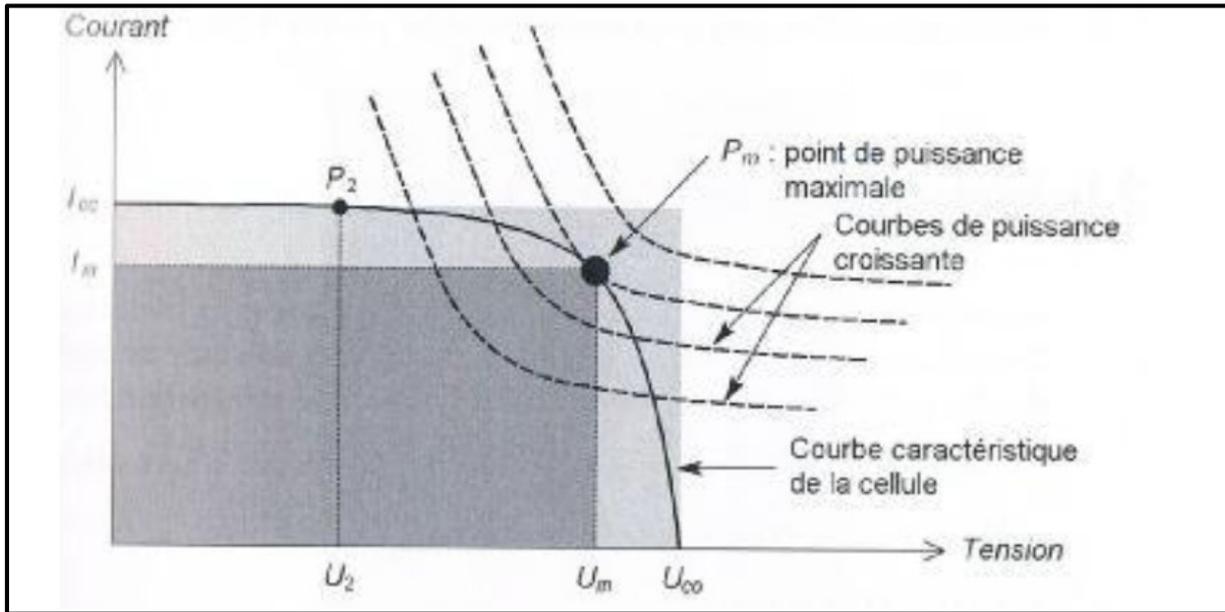


Fig.1.3 Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

Le point  $P_m$  caractérise la puissance maximale, associé à une tension  $U_c$  et un  $I_{cc}$  courant :

$$P_m = U_{co} * I_{cc} \quad (1.3)$$

- **Le facteur de forme**

Rapport entre la puissance maximale et la puissance forme par le rectangle  $I_{cc} * V_{co}$ .

$$FF = (P_{max} / I_{cc} * V_{co}) = (I_{opt} * V_{opt} / I_{cc} * V_{co}) \quad (1.4)$$

- **Le rendement**

Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation Incidente (solaire).

$$\eta = P_{opt} / S * E \quad (1.5)$$

$E$  : L'éclairement [ $W/m^2$ ].

$S$  : Surface de la cellule ou du module [ $m^2$ ].

### 1.3.1 Type des cellules photovoltaïques

Il existe trois (3) principaux types de cellules :

- La cellule au silicium monocristallin ;
- La cellule au silicium poly cristallines ;
- La cellule au silicium amorphe.

Chaque type de cellule est caractérisée par ses propres performances, comme il est montré sur le tableau 1.1

Tableau 1.1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient
<b>Silicium monocristalline</b>	13-17%	Bon rendement pour une cellule.	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.
<b>Silicium poly-cristalline</b>	11-15%	Bon rendement pour un module.	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.
<b>Silicium amorphe</b>	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvaise rendement

L'association des cellules en séries et en parallèles constitue un module solaire et à leur tour le montage en série et en parallèle des modules forme un panneau solaire.

#### 1.4 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; Seule la courbe I (V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (1.4) représente trois zones essentielles :

- Zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- Zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- Zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

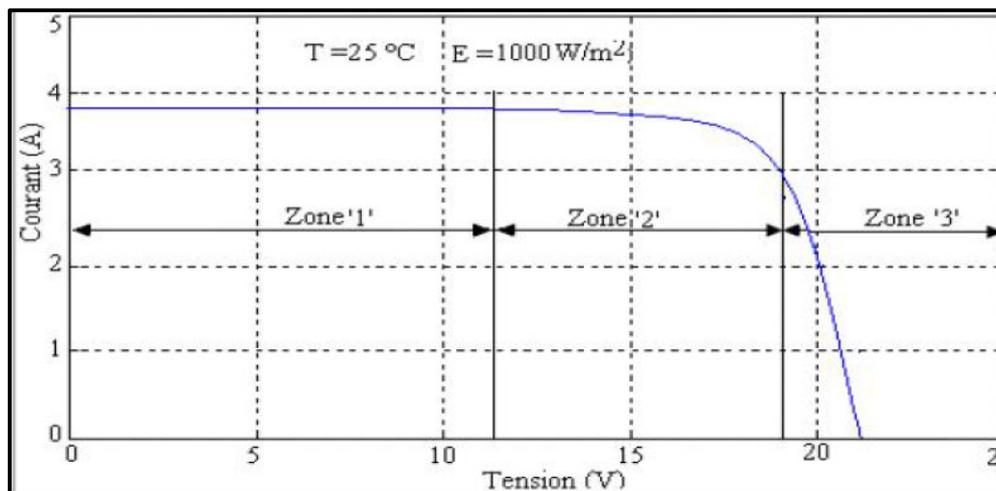


Fig.1.4 Différentes zones de la caractéristique I (V),  $T = 25\text{ °C}$

## 1.5 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

### 1.5.1 Avantages

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé [10].

### 1.5.2 Inconvénients

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 %. L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [10].

## 1.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que les différentes technologies d'une cellule PV. Par ailleurs, les différentes caractéristiques remarquables sont présentées et discutées. Elles serviront comme base des stratégies de commandes pour le suivi de l'extraction du maximum de puissance.

## CHAPITRE 2

### MODELISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

#### 2.1 introduction

L'étude d'un système photovoltaïque pour la production de l'énergie électrique, l'objet de ce mémoire de fin d'études nécessite la modélisation des différentes composantes de la chaîne. Le processus de la production de cette énergie est non linéaire et varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température sachant que l'intensité lumineuse ( $E$ ) et la température ( $T$ ) sont de nature aléatoire et dépendent des conditions méthodologiques. Ce chapitre est organisé comme suit : le paragraphe 2 détaille l'étude du système photovoltaïque ; le premier sous-paragraphe est réservé à la présentation du panneau photovoltaïque tandis que le troisième paragraphe traite la modélisation sous l'environnement MatLab/Simulink, enfin nous concluons sur nos résultats de simulations.

#### 2.2 Présentation et modélisation du panneau solaire

Un panneau solaire est une connexion série/parallèle d'un certain nombre de modules qui sont à leur tour une connexion de cellules photovoltaïques [11].

On distingue, principalement, deux schémas équivalents des cellules photovoltaïques :

- Schéma équivalent à une diode ;
- Schéma équivalent à deux diodes.

##### 2.2.1 Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque est schématisée d'une manière idéale comme le montre la figure (2.1). Cette configuration à une seule diode est très utilisée pour représenter le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque. En effet, en première approximation on a une source de courant ( $I_{ph}$ ) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, montée en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV [12].

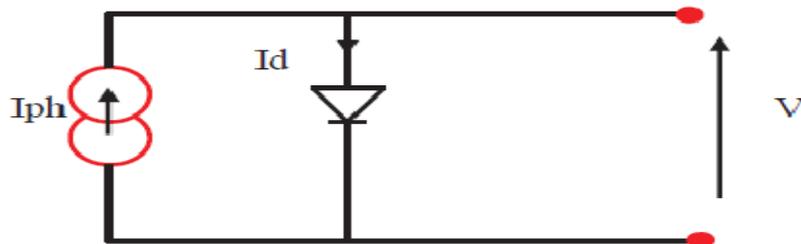


Fig.2.1 Schéma d'une cellule photovoltaïque idéale

D'après la loi des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

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

$$V = V_d \quad (2.2)$$

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

$$I_d = I_0 * e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \quad (2.3)$$

Avec :

$I_0$  : courant de saturation de la diode ;

$V_d$  : tension au borne de la diode ;

$V_t$  :  $\frac{KT}{q}$  potentiel thermique ;

Où :

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

$q$  : charge d'électron =  $1.6 * 10^{-19}$  ;

$T$  : température de la cellule en Kelvin ;

$I_{ph}$  : courant photonique ;

Donc, la relation (2.4) s'écrit alors, comme suit :

$$I = I_{ph} - [I_0 * e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1] \quad (2.4)$$

Réellement, le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté par la figure (2.2).

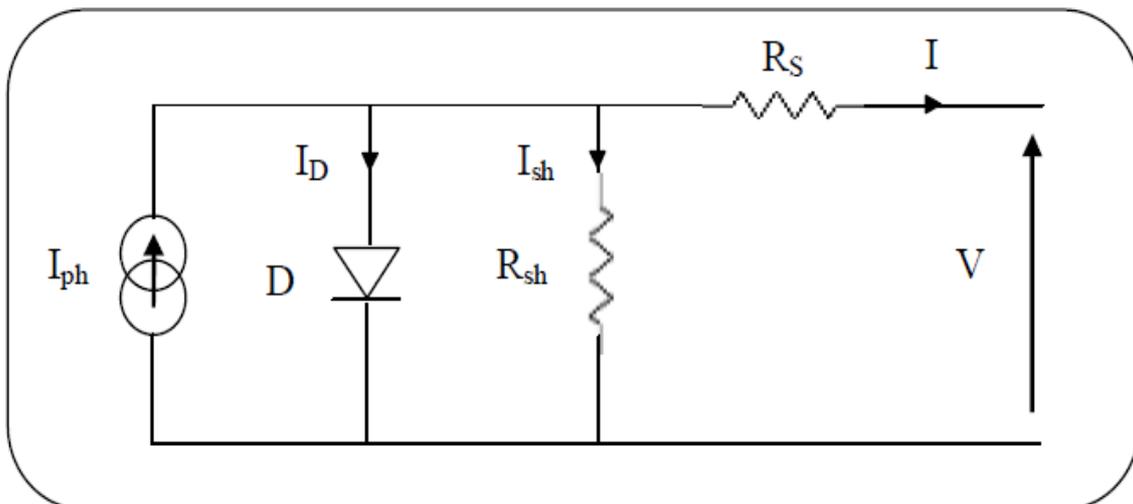


Fig.2.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

- $R_s$  : résistance série est la résistance interne de la cellule . Elle est principalement la résistance du semi-conducteur utilisé pour la construction de la cellule, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- $R_{sh}$  : résistance shunt. Elle est due au courant de fuite au niveau de la jonction et dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [13].

Le courant à travers la diode est donné par :

$$I_d = I_0 * \left[ e^{\frac{q*(V+R_s I)}{K T A}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Donc, le courant généré par la cellule PV est déduit en utilisant la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.6)$$

Alors,

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[ e^{\frac{q*(V+R_s I)}{K T A}} - 1 \right] - \left[ \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Modèle à deux diodes

Dans ce cas, le schéma équivalent est composé d'une source de courant ( $I_{ph}$ ) modélisant le flux lumineux, deux diodes ( $I_{d1}$  et  $I_{d2}$ ) pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série, comme l'illustre la figure (2.3).

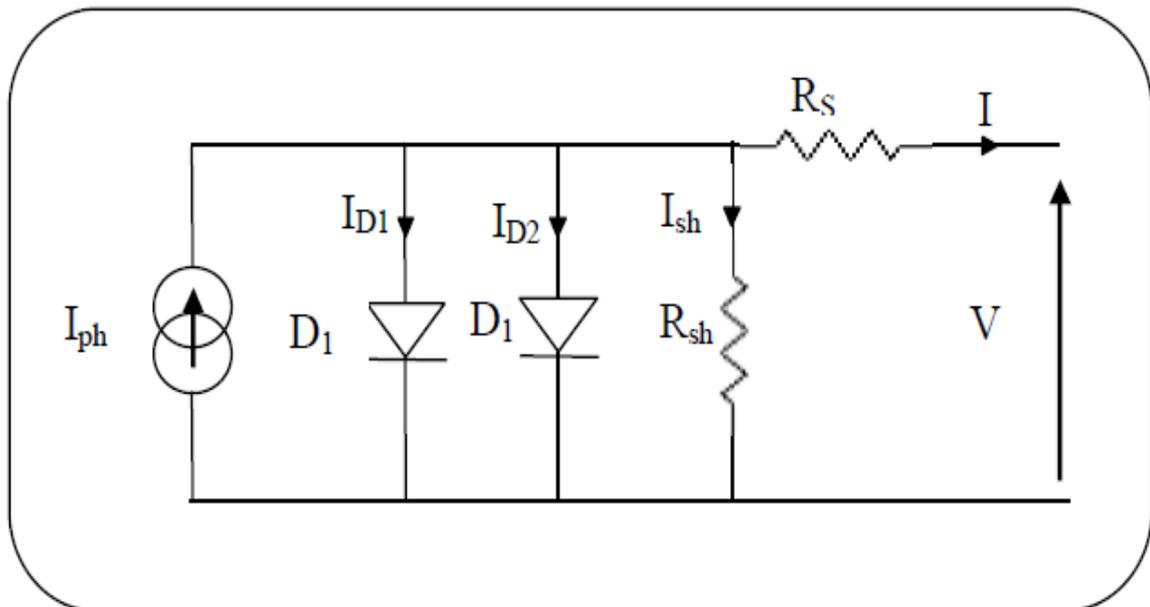


Fig.2.3 Schéma équivalent à deux diodes d'une cellule.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \tag{2.8}$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{d1} = I_{01} * \left[ e^{\frac{q*(V+RsI)}{KAT}} - 1 \right] \tag{2.9}$$

$$I_{d2} = I_{02} * \left[ e^{\frac{q*(V+RsI)}{KAT}} - 1 \right] \tag{2.10}$$

Avec :  $I_{01}, I_{02}$  les courants de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{01} * \left[ e^{\frac{q*(V+RsI)}{KAT}} - 1 \right] - I_{02} * \left[ e^{\frac{q*(V+RsI)}{KAT}} - 1 \right] - \left[ \frac{V+RsI}{Rsh} \right] \tag{2.11}$$

### 2.3 Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est un regroupement des cellules photovoltaïques connectées en série et /ou en parallèle afin d'augmenter, respectivement, la tension ou le courant [14].

#### 2.3.1 Connexion en série

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. Le principe des cellules connectées en série pour former un module solaire est représenté par la figure ci-dessous :

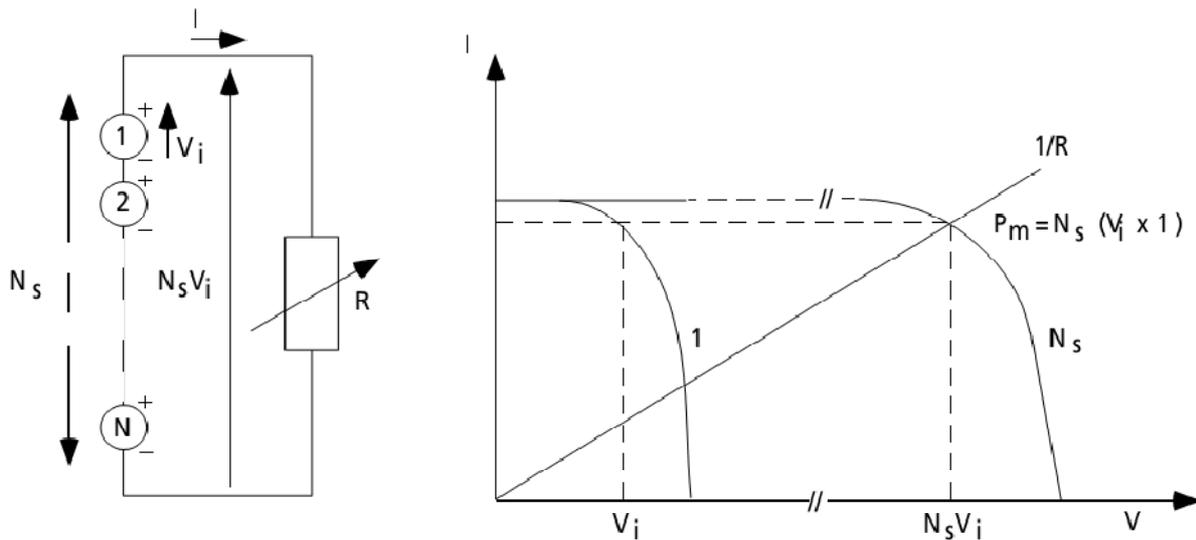


Fig.2.4 Cellules identiques connectées en série

### 2.3.2 Connexion en parallèle

L'association en parallèle des cellules délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule. Le principe d'un tel cas est représenté par la figure (2.5).

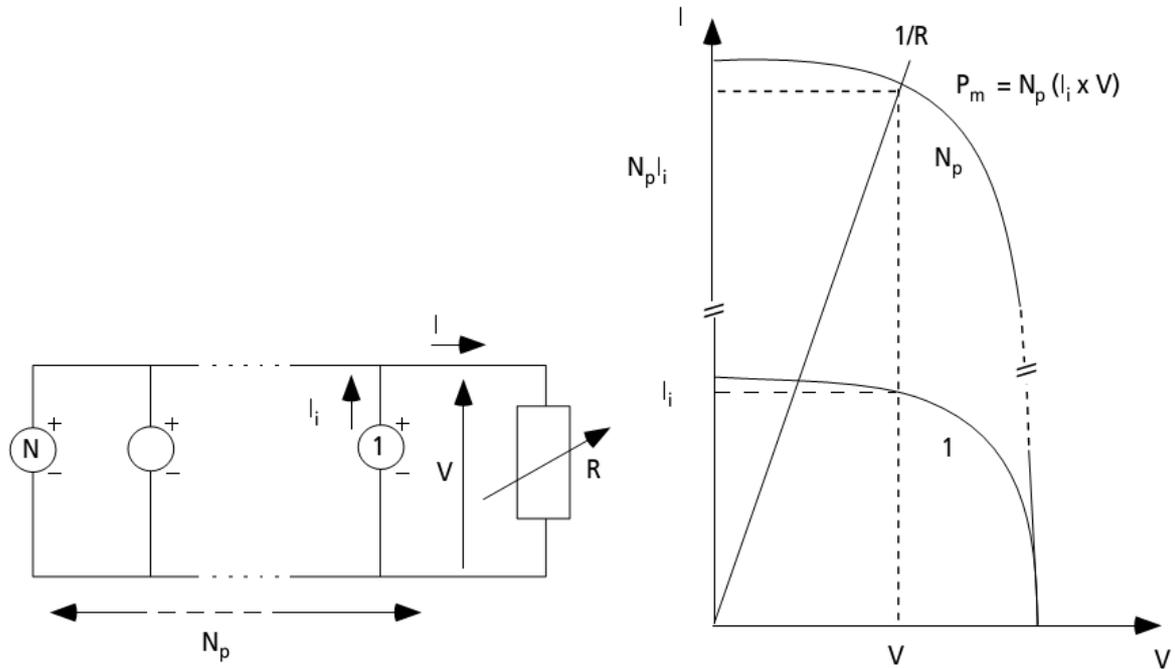


Fig. 2.5 Cellules identiques connectées en parallèle.

### 2.3.3 Connexion mixte

Pour profiter des avantages des deux (2) types de connexion précédentes et produire une puissance importante, il faut associer plusieurs modules en série et en parallèle. Communément appelée connexion mixte ou hybride, comme le montre le figure (2.6).

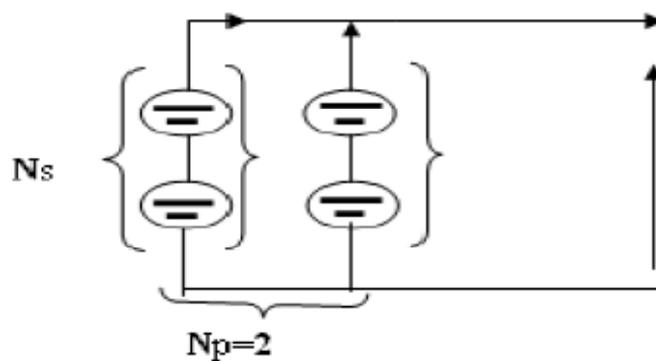


Fig.2.6 Schéma de connexion mixte des modules

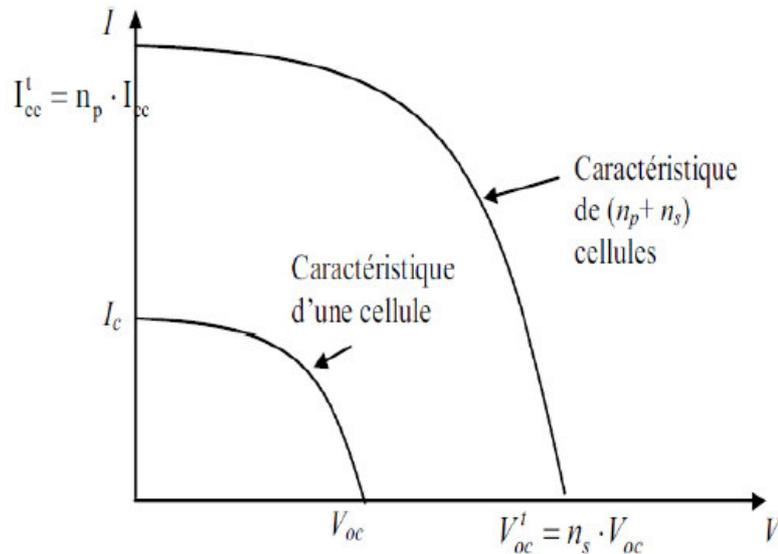


Fig.2.7 Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques

## 2.4 Protection du générateur photovoltaïque

Pour pallier aux pannes destructives liées à l'association de cellules en série et de générateur en parallèle, il s'agit des protections par les diodes anti-retour et by-pass. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations solaires qui sont montrés par la figure (2.8) [15].

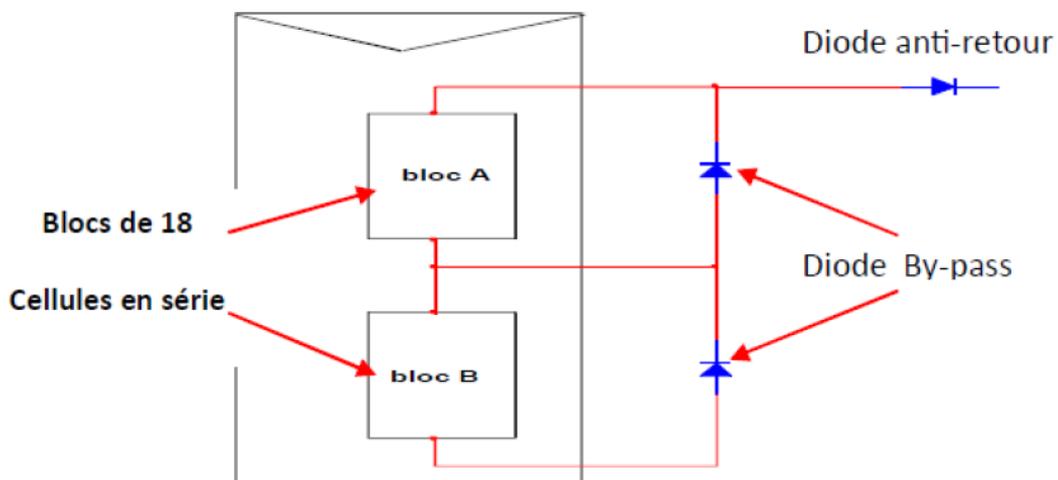


Fig.2.8 Protection des modules par les diodes anti retour et by-pass [15].

- ✚ La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- ✚ Les diodes by-pass isolant un sous réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi des points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

## 2.5 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$

Lors de la simulation on choisit le panneau (Kyocera Solar KD130GX-LP).

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau sont données par le tableau (2.1) :

Tableau .2.1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque.		
<u>Paramètres</u>	<u>Symbole</u>	<u>Valeur</u>
Tension de circuit ouvert(V)	$V_{oc}$	22.1
Courant de court-circuit(A)	$I_{sc}$	8.06
Tension de puissance maximale(V)	$V_{mP}$	17.7
Courant de puissance maximale(I)	$I_{mp}$	7.35
Puissance maximale(W)	$MPP$	130.095
Nombre de cellules en série	$N_{cell}$	36

### 2.5.1 Influence de la température

Pour un éclairement fixé ( $1000\text{w/m}^2$ ), les caractéristiques  $I = f(U)$  et  $P = f(U)$  varient avec la température de la cellule photovoltaïque :

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction.

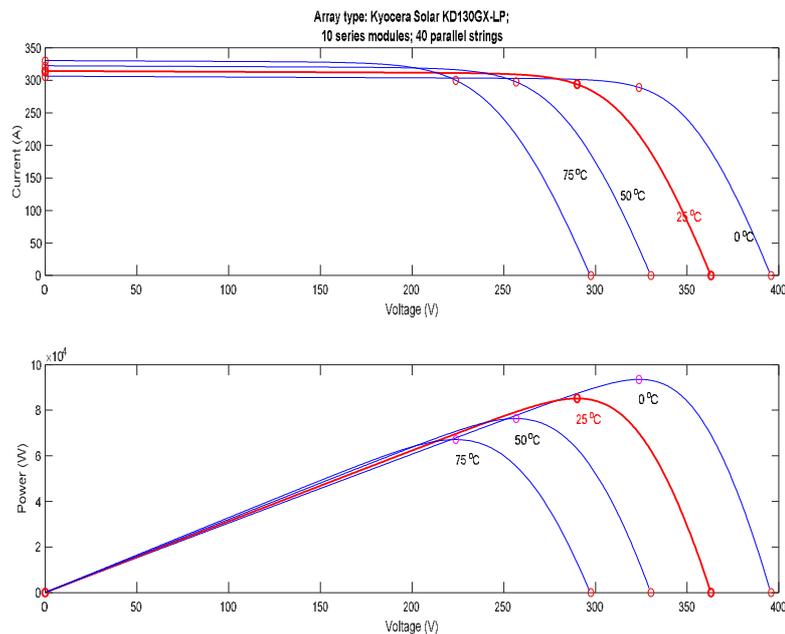


Fig. 2.9 Caractéristiques  $I = f(U)$  et  $P = f(U)$  en fonction de la température.

On remarque que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule [16]. En effet, l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la puissance maximale disponible.

### 2.5.2 Influence de l'éclairement

La base des cellules photovoltaïques est une jonction PN, cette dernière réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit de l'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement très faible de l'ordre 15%. La figure (2.10) représente les courbes  $I = f(U)$  et  $P = f(U)$  pour différents niveaux d'irradiation sur un module PV (Kyocera Solar KD130GX-LP).

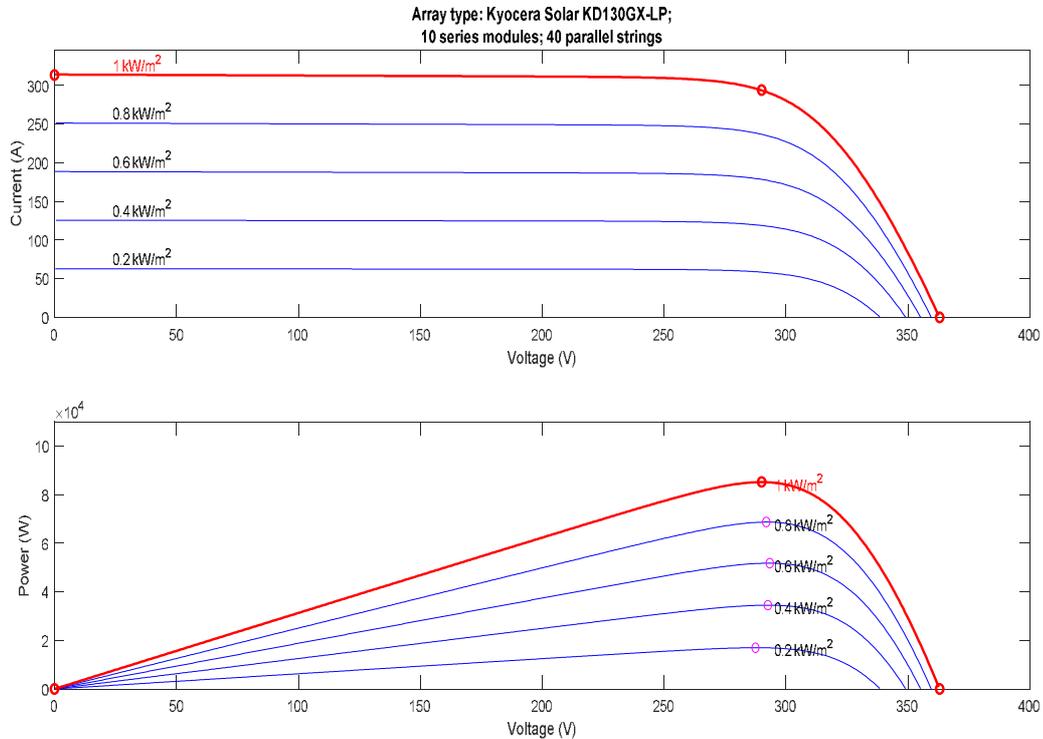


Fig.2.10 Caractéristiques  $I = f(U)$  et  $P = f(U)$  en fonction de l'éclairement

La figure(2.10) représente les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

On remarque que la tension correspondante à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant qui augmente fortement avec l'éclairement [17].

### 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présente des différents modèles (à une seule exponentielle et celui en double exponentielle). Ce qui nous a permis de modéliser et simuler le modèle de la cellule PV en montrant l'influence de la température et de l'éclairement.

## CHAPITRE3

### ALGORITHME MPPT POUR UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

#### 3.1 Introduction

Un convertisseur statique permet d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Il est bien connu que les systèmes de conversion d'énergie à base du soleil produisent de l'énergie en fonction des conditions météorologiques ces dernières étant aléatoires donc il est nécessaire de prévoir des dispositifs qui permettent d'extraire le maximum de puissance [18]. Cependant, plusieurs méthodes existent dans la littérature. Toutefois, dans ce travail de mémoire de fin d'études, on considère trois (3) méthodes d'extraction de puissance maximale dont l'abréviation en anglais ont MPPT : maximum power Tracking.

Ce chapitre comprend deux (2) parties essentielles : une première partie sur le hacheur et la seconde sur les méthodes MPPT, notamment Perturbe and Observe(P&O), incrémentale(INC), le mode glissante(MG).

#### 3.2 Hacheurs

L'hacheur est un convertisseur continu/continu qui permet de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) [19].

La figure (3.1) montre le schéma bloc d'un hacheur.

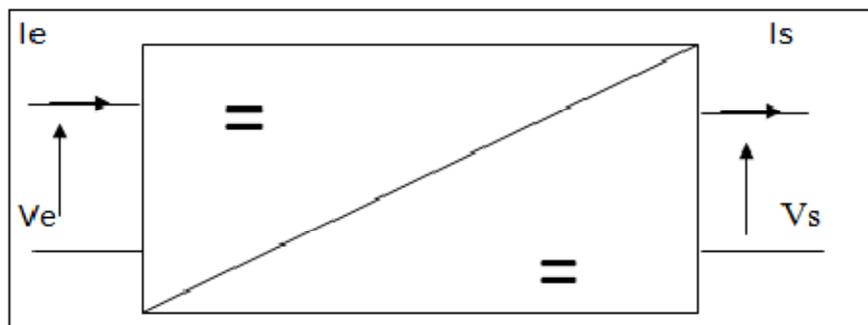


Fig.3.1 Schéma bloc d'un hacheur

On distingue des hacheurs parallèle(Boost), série (Buck) et réversible (Buck-Boost).

##### 3.2.1 Hacheur parallèle

Un hacheur parallèle est un convertisseur direct DC-DC où la source d'entrée  $V_e$  est de type courant continu, inductance  $L$  en série avec  $V_e$  et la charge de sortie est de type tension continue, un condensateur  $C$  en parallèle avec la charge [20].

La figure (3.2) montre le circuit de connexion d'un hacheur parallèle semi-conducteur commandé par le bloc de commande (BC) de telle sorte que K soit Fermé(passant) pendant  $\alpha T$ . où  $\alpha$  est le rapport cyclique ,T la période d'un cycle et la diode (D)est bloquée, l'inductance stocke le courant provenant de la source et la capacité maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée.

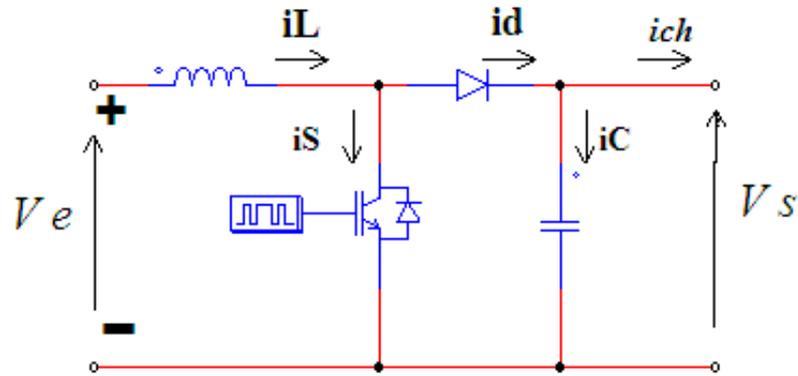


Fig.3.2 Hacheur parallèle

Pour la première période  $\alpha T$  :

$$V_e = V_L \quad (3.1)$$

$$I_c = I_L = \frac{V_s}{R} \quad (3.2)$$

Par contre , durant le laps de temps de  $\alpha T$  jusqu' à T, le semi-conducteur s'ouvre(non passante) et par conséquent, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension quis'ajoute à celle du condensateur.

$$V_L = V_e - V_s \quad (3.3)$$

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Hacheur série

C'est un convertisseur continu-continu où la source d'entrée  $V_e$  est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant[21].

La figure (3.3) montre le circuit de connexion d'un hacheur série.

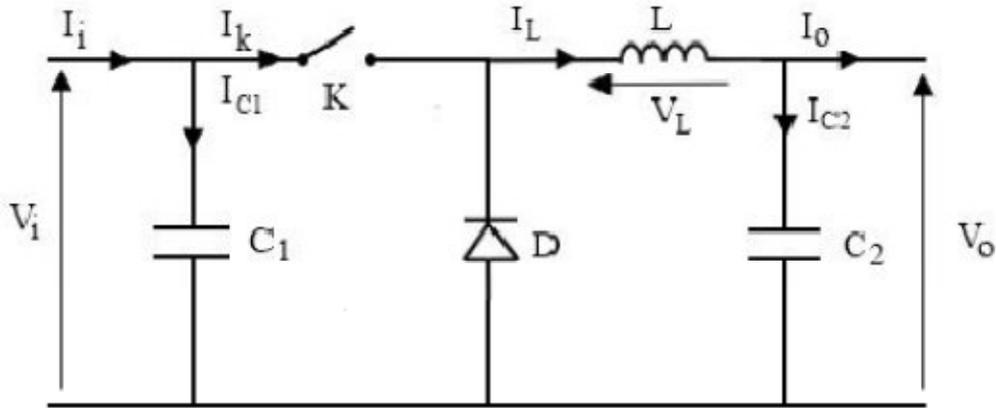


Fig.3.3 Hacheur série

Le semi-conducteur K est fermé pendant la durée  $\alpha T$ . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge à travers l'inductance L. Et, de  $\alpha T$  à T l'interrupteur s'ouvre, l'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la charge.

- $0 \div \alpha T$  (3.5)

- $\alpha T \div T$  (3.6)

### 3.2.3 Hacheur réversible

Dans ce cas, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation [22]. La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

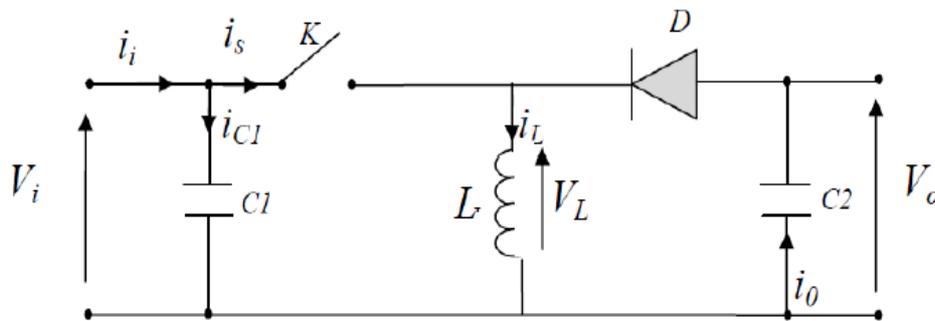


Fig.3.4 Hacheur réversible

Le fonctionnement d'un convertisseur réversible (Buck-Boost) peut être divisé en deux configurations selon l'état de l'interrupteur du semi-conducteur (K), comme le montre le figure (3.5). K dont ferme de l'énergie stockée dans l'inductance augmente.

- Quand K 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.

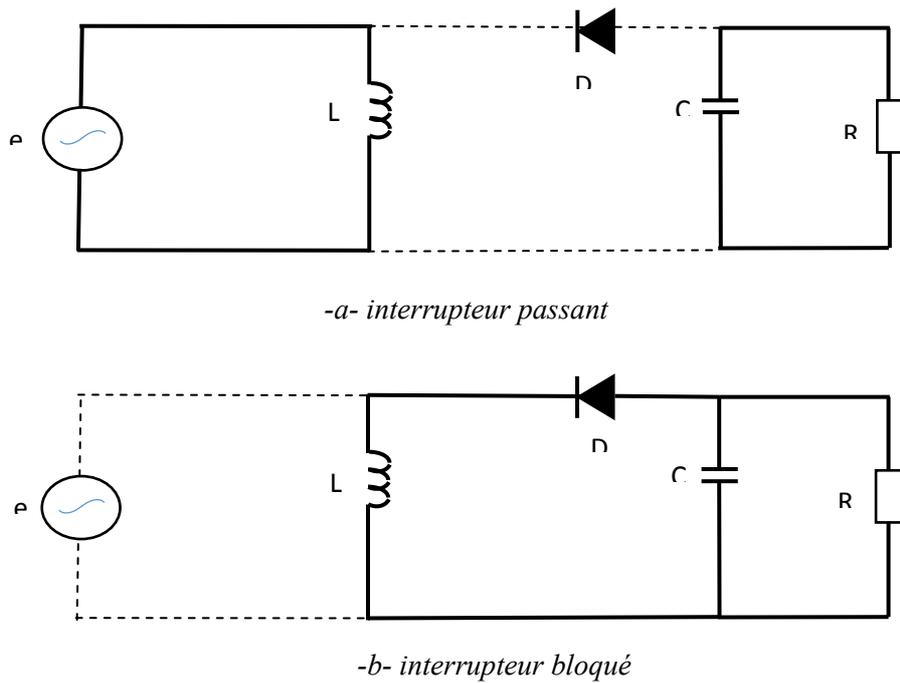


Fig.3.5 Configurations du convertisseur réversible

### 3.3 Détermination des paramètres du hacheur parallèle

#### 3.3.1 Calcul de l'inductance L

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne.

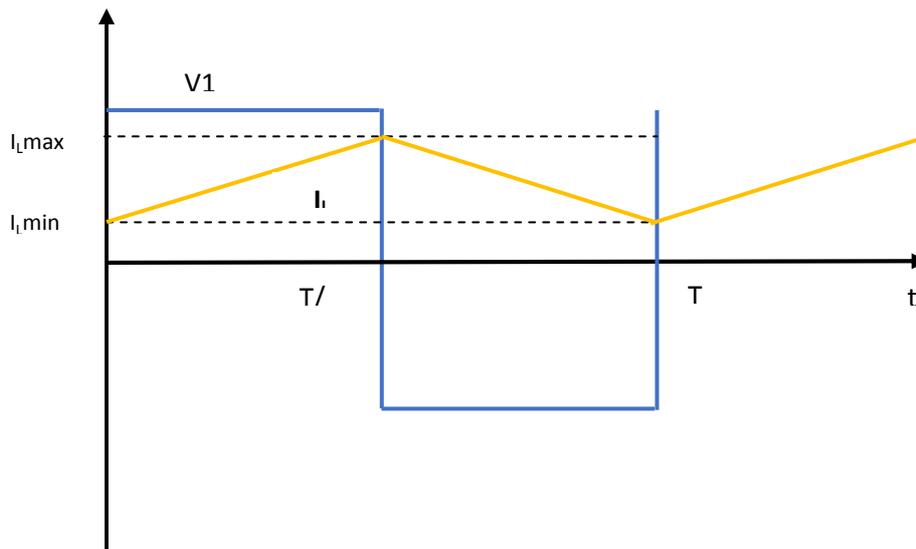


Fig.3.6 Ondulation du courant

Calculons l'ondulation du courant

Pour :  $0 \leq t \leq \alpha T$  ;

$$\text{On a : } V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad \text{avec : } \alpha = \frac{ton}{T} \quad (3.7)$$

$\alpha$  : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur

$$V_L(t) = \frac{V_e}{L} t + I_{Lmin} \quad (3.8)$$

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{Lmin} = I_{Lmax} \quad (3.9)$$

$$\Delta I_L = I_{Lmin} - I_{Lmax} = -\frac{V_e}{L} \alpha T \quad (3.10)$$

$$\Delta I_L = \frac{(1-\alpha)}{L f_p} V_s \quad (3.11)$$

Où :

$V$ : tension aux bornes du générateur (V) ;

$V_s$ : Tension de sortie du convertisseur (V) ;

$T$  : période de découpage du signal de l'interrupteur  $T = \frac{1}{f_p}$  en secondes (s) ;

$I_{Lmin}$  : Courant minimum dans l'inductance (A) ;

$I_{Lmax}$  : Courant maximum dans l'inductance (A) ;

$\Delta I_L$  : Ondulation de courant dans l'inductance (A) ;

$L$ : Valeur de l'inductance de lissage (H) ;

Donc :

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_s}{4L f_p} \quad (3.12)$$

Ainsi, l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$L = \frac{V_s}{4f_p \Delta I_{Lmax}} \quad (3.13)$$

### 3.3.2 Calcul du condensateur (C)

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance. L'ondulation de tension en sortie, voir le figure (3.7) résulte du courant alternatif dans le condensateur.

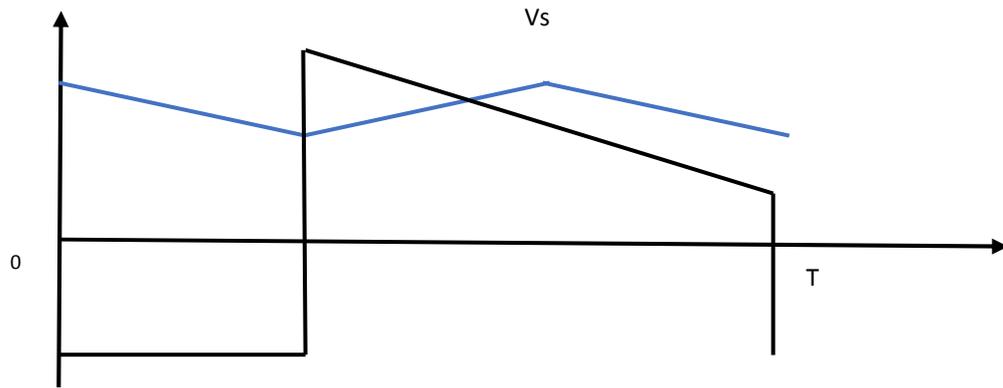


Fig.3.7 Ondulation de tension.

Calculons l'ondulation de la tension

Pour :  $0 \leq t \leq \alpha T$  ;

On a :

$$Vs(t) = Vs_{max} - \frac{Is}{C} t \quad (3.14)$$

A,  $t = \alpha T$

$$Vs(\alpha T) = Vs_{max} - \frac{Is}{C} \alpha T = Vs_{max} \quad (3.15)$$

Avec :

$$Is = \frac{Ie}{1-\alpha} \quad (3.16)$$

$$\Delta Vs = \frac{Ie}{Cfp} \alpha \quad (3.17)$$

$$\Delta Vs = \frac{\alpha(1-\alpha)}{Cfp} \quad (3.18)$$

Où :

$$\Delta Vs_{max} = \frac{Il}{4Cfp} \quad (3.19)$$

Ainsi, la capacité minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$C = \frac{Il}{4fp\Delta Vs_{max}} \quad (3.20)$$

### 3.3.3 Définition et principe de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative [23]. La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la Figure (3.8)

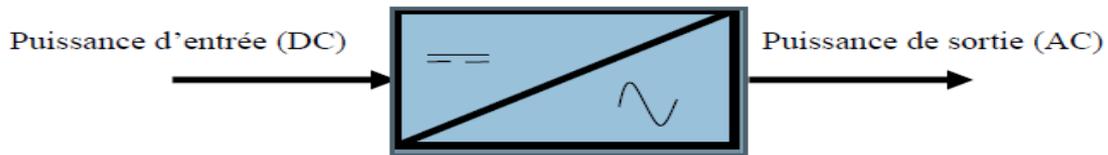


Fig.3.8 Schéma de principe d'un l'onduleur

- ❖ Les onduleurs sont classés en onduleurs non autonome, onduleur autonome et onduleurs à résonance.

Pour les non autonomes l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif.

Or, les autonomes utilisent l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation de semi-conducteurs [24].

Pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les semi-conducteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome [25].

### 3.4 Onduleur de tension

On appelle onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue. Dans le cas où la sortie est monophasée, l'onduleur utilisé est en pont à quatre semi-conducteurs :  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  et  $K4$  [26] et dont le circuit de puissance) et les signaux de commande sont montrés, respectivement, pour les figures (3.9) et (3.10)

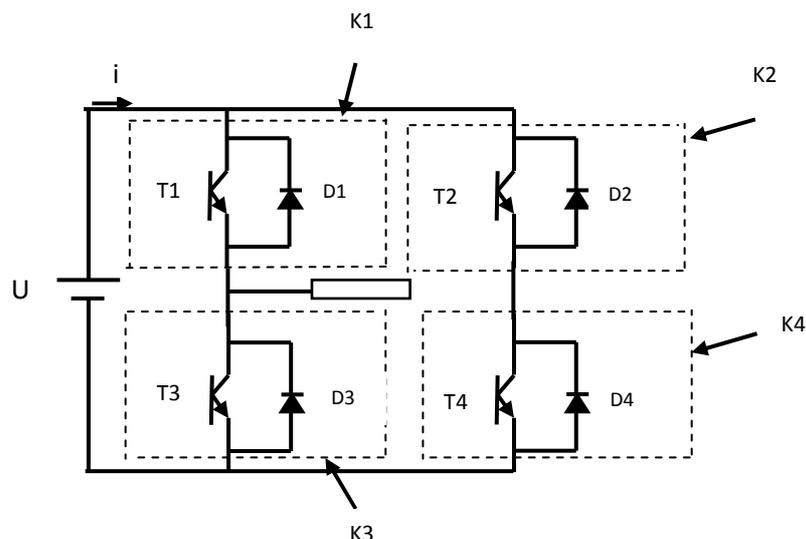


Fig.3.9 Onduleur de tension en pont Monophasé

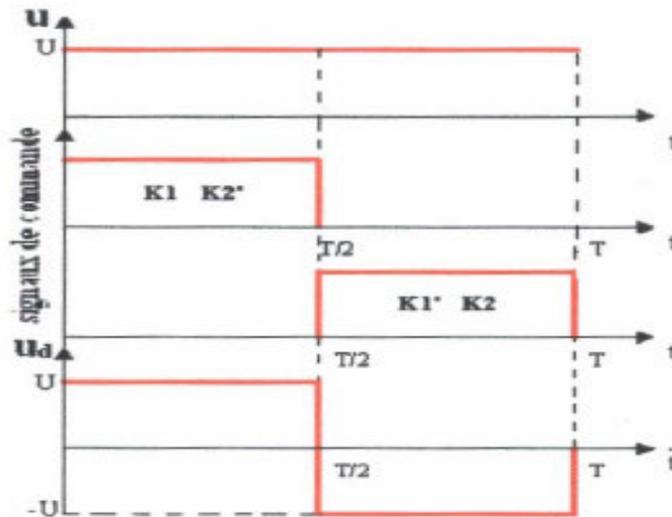


Fig.3.10 Signaux de commande.

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $U_d(t)$  comme suit : Si la tension d'entrée de l'onduleur est constante et égale à  $U$ , quel que soit  $I$  on a :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les semi-conducteurs, **K1**, **K4** sont fermés, et **K2**, **K3** sont ouverts.

D'où :

$$U_d = +U \quad (3.21)$$

- Pour  $T/2 < t < T$  : les semi-conducteurs, **K2**, **K3** sont fermés, et **K1**, **K4** sont ouverts.

D'où :

$$U_d = -U \quad (3.22)$$

Le courant de la sortie est donc le courant  $I$  à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternative.

### 3.5 Commande MPPT

La chaîne de conversion solaire, comprend généralement un hacheur commandé par une MPPT voir la figure (3.11). La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du hacheur de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (GPV) soit la puissance maximale disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le point de puissance maximum (PPM), mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions du courant et tension du GPV [27].

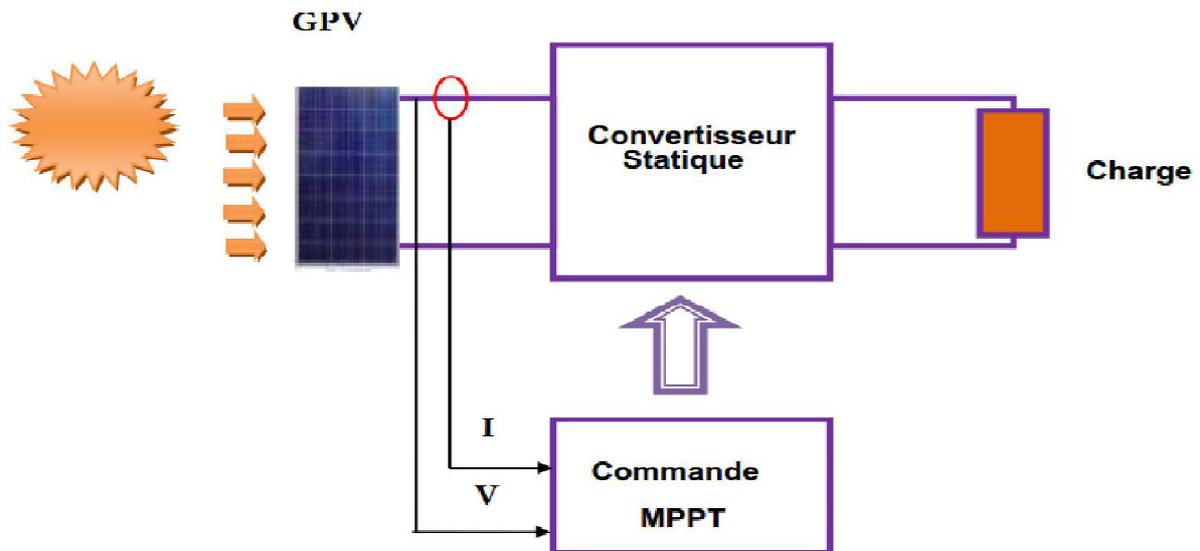


Fig.3.11 Chaîne de conversion photovoltaïque.

Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le hacheur de manière à assurer en permanence le maximum de puissance à la charge. Les figures (3.12et3.13) représentent ,respectivement, les caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour diffèrent valeur de l'irradiation et la trajectoire de PPM.

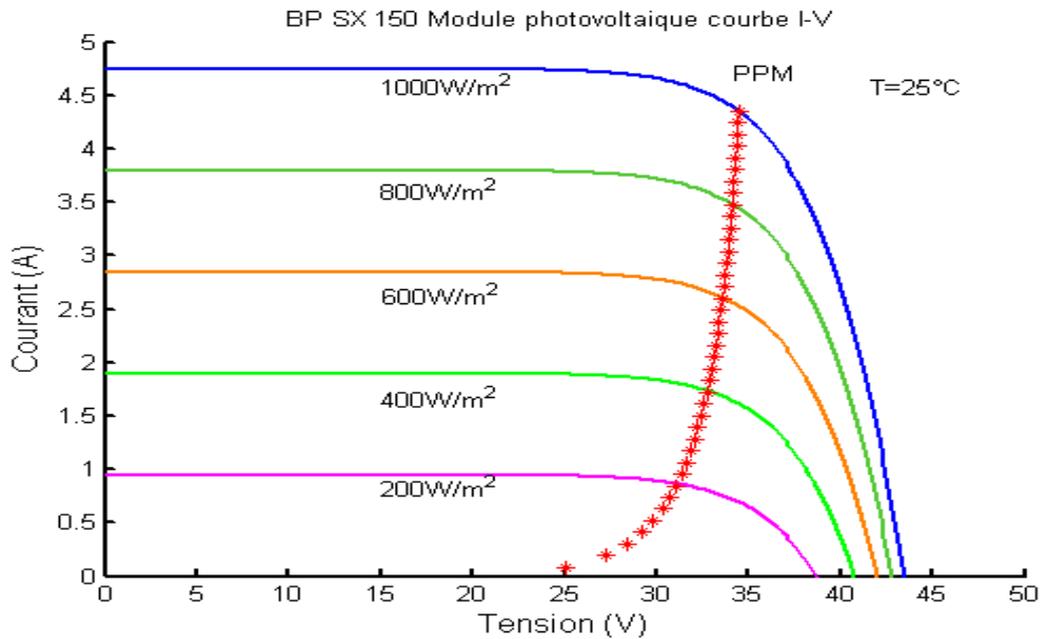


Fig.3.12 Caractéristique I-V et la trajectoire de PPM.

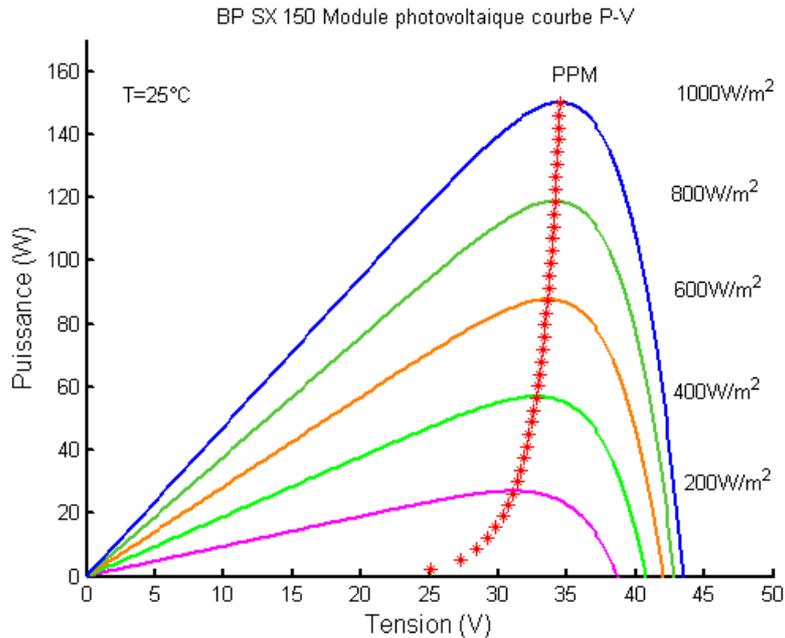


Fig.3.13 Caractéristique P-V et la trajectoire de PPM.

### 3.6 Techniques MPPT

Dans la littérature, on a trouvé différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Parmi lequel, on considère trois méthodes dans ce travail. Celles-ci, sont Perturbe & Observe (P & O), incrémentation de conductance (IncCond), et MPPT par mode glissant.

#### 3.6.1 Algorithme "Perturbation et Observation"

Consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte.

Ainsi, on déduit que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$  voir la figure (3.14), cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Contrairement, si la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée par reprendre la convergence vers le nouveau PPM [28].

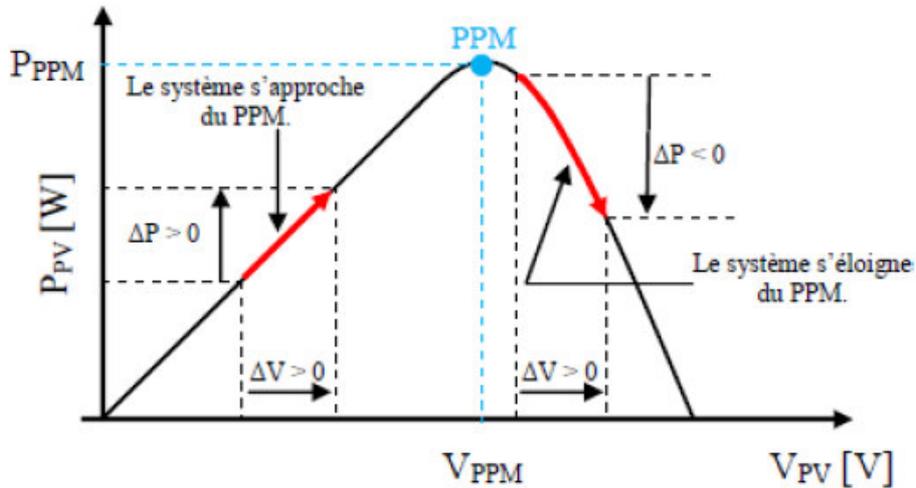


Fig.3.14 Caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  d'un panneau solaire

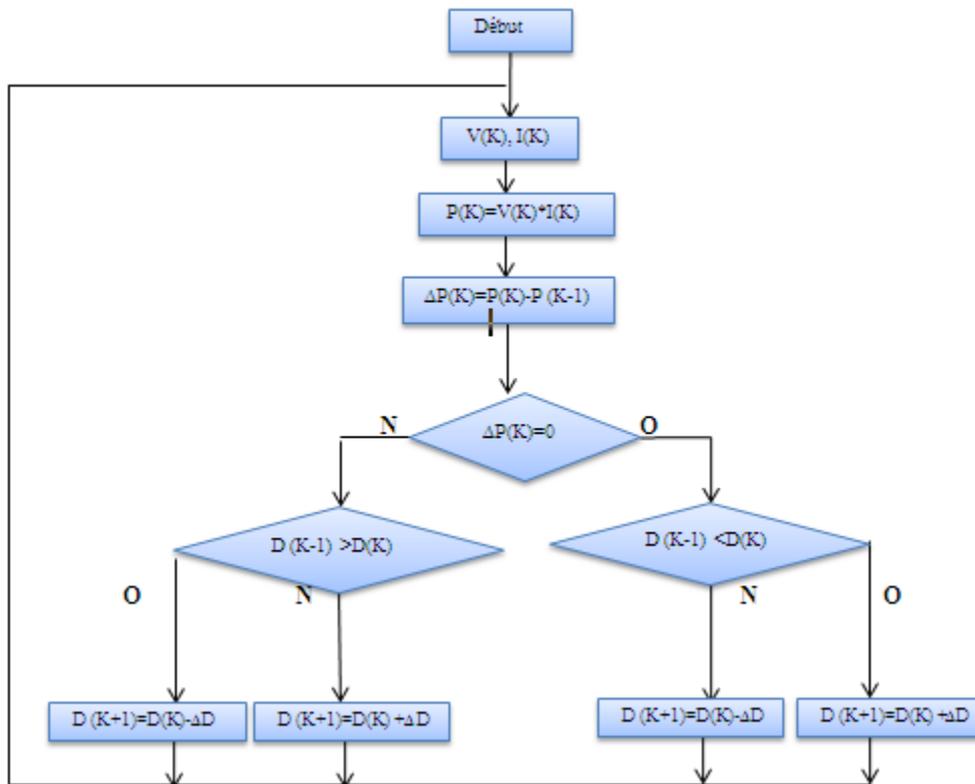


Fig.3.15 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

### 3.6.2 Algorithme incrémentation de conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro [29]. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_v}{dV_p} = \frac{d(V_p \cdot I_{pv})}{dV_p} = I_{pv} + V_p \frac{dI_{pv}}{dV_p} = 0 \tag{3.23}$$

$$\frac{dIv}{dVp} = -\frac{I_{pv}}{Vp} \tag{3.24}$$

Le terme  $(\frac{I_{pv}}{Vp})$  représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et  $(\frac{dIv}{dVp})$  représente le terme d'incrément de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation (3.23) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM).

$$\frac{dIv}{dVp} = -\frac{I_{pv}}{Vp}, \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \tag{3.25}$$

$$\frac{dIv}{dVp} > -\frac{I_{pv}}{Vp}, \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \tag{3.26}$$

$$\frac{dIv}{dVp} < -\frac{I_{pv}}{Vp}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \tag{3.27}$$

En utilisant la relation (3.23), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme :

➤ Si  $I_{pv} + Vp \frac{dI_{pv}}{dVp} = 0$

Alors :  $-\frac{I_{pv}}{Vp} = \frac{dI_{pv}}{dVp}$  le point de fonctionnement est sur le PPM.

➤ Si  $I_{pv} + Vp \frac{dI_{pv}}{dVp} > 0$

Alors :  $-\frac{I_{pv}}{Vp} < \frac{dI_{pv}}{dVp}$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

➤ Si  $I_{pv} + Vp \frac{dI_{pv}}{dVp} < 0$

Alors :  $-\frac{I_{pv}}{Vp} > \frac{dI_{pv}}{dVp}$ , le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

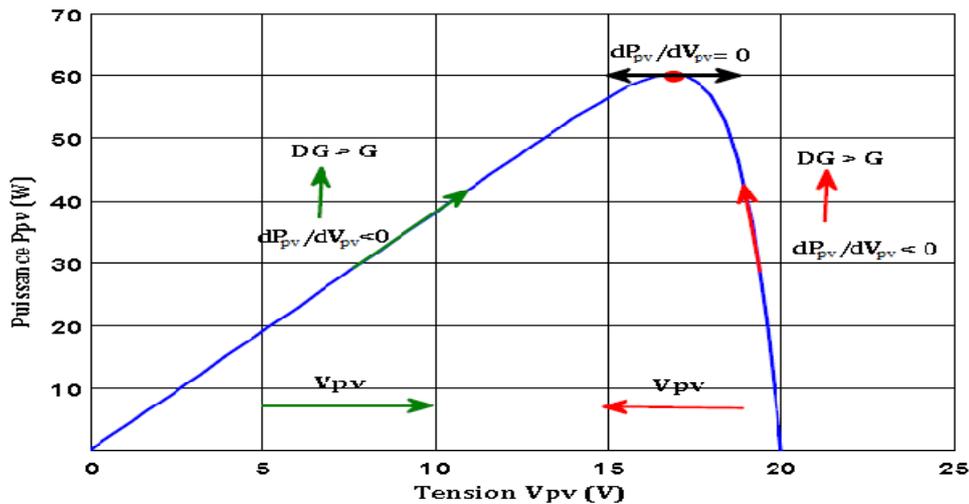


Fig.3.16 Caractéristique tension-puissance du panneau  $P_{pv} = f(V_{pv})$

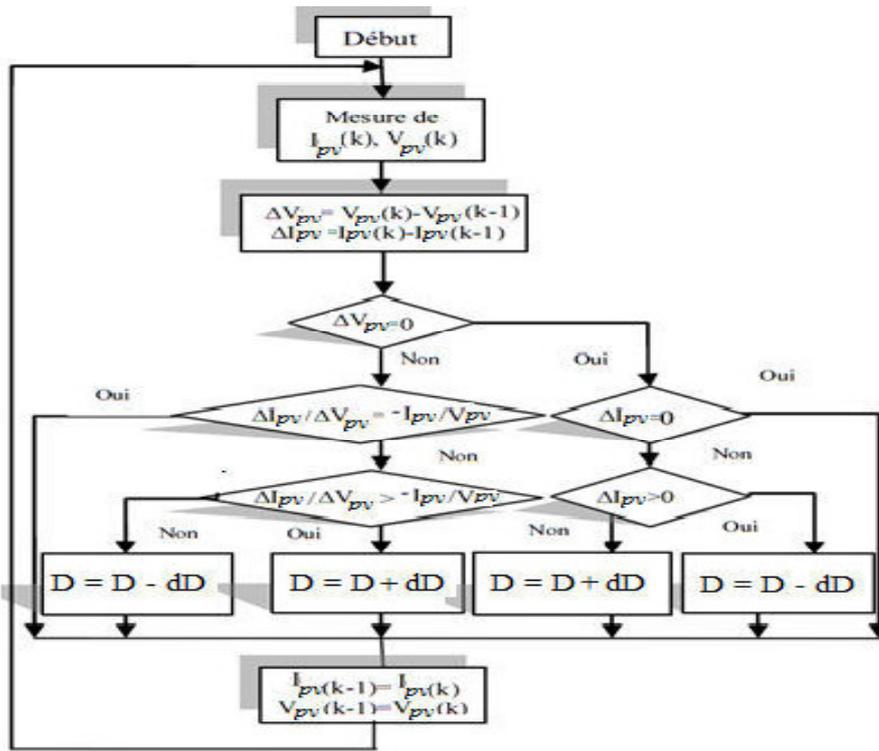


Fig.3.17 Organigramme de l’algorithme incrémentation de conductance

**3.6.3 Théorie de la commande par mode glissement**

La commande par mode glissant d’ordre 1 (SMC) est une commande à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique  $s(x)$  [30].

Le principe de la commande par mode glissant est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d’y demeurer jusqu’à l’équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci, Figure (3.18).

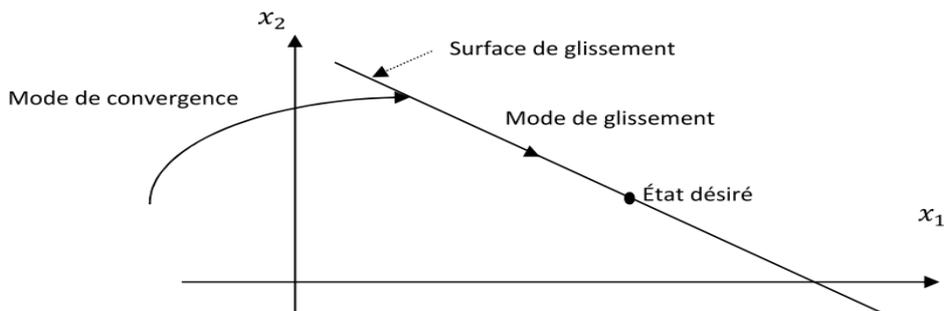


Fig.3.18 Différents modes de convergence pour la trajectoire d’état

**3.6.3.1 Conception de la commande par mode de glissement**

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d’une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

- choix de la surface de glissement ;
- Etablir la condition de convergence.

**3.6.3.2 Bases mathématiques de la commande à structure variable**

La modélisation mathématique de la commande à structure variable conduit à des équations différentielles de la forme :

$$X(t) = f(x, t) + B(x, t)V \tag{3.28}$$

Avec :

$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$  : vecteur d’état

$f$  : vecteur en fonctions de  $x$  et  $t$

$B$ : matrice de fonctions de  $x$  et  $t$  (une matrice  $m * n$ )

$V$  : un vecteur commande de dimension  $m$ , dont chaque composante subit une discontinuité sur une surface  $s_i(x)=0$ .

La surface « S » peut s’écrire comme :

$$S(x) = 0 \tag{3.29}$$

Avec :

$$\begin{cases} v_i(x) = v_i^+(x) & \text{si } S_i > 0 \\ v_i(x) = v_i^-(x) & \text{si } S_i < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{3.30}$$

Dans le cas multi variables le régime glissant s’effectue sur une variété  $S(x) = 0$  de dimension  $(n * m)$ .

**3.6.3.3 Condition d’existence du mode glissant**

Le mode de glissement existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre  $U_{max}$  et  $U_{min}$ , figure (3.19), lorsque le système réglé est considéré du deuxième ordre, les grandeurs d’état sont  $X_{s1}$  et  $X_{s2}$ .

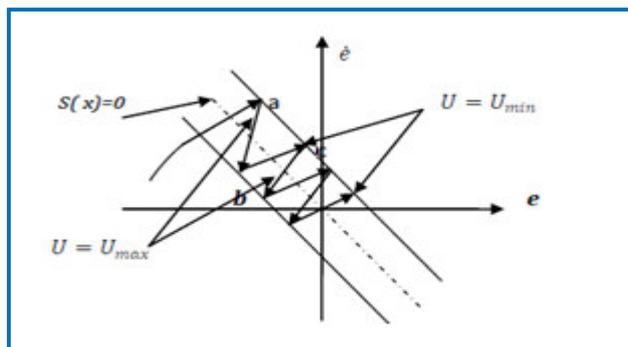


Fig.3.19 Existence du mode de glissement

Les commutations ont lieu sur les droites décalées parallèlement de  $\pm \Delta S_h$ . Une trajectoire avec  $U=U_{\max}$  touche au point (a) le seuil de basculement inférieur. Si avec, la trajectoire est orientée vers l'intérieur de la zone montrée par la figure (3.19). Elle touche au point (b) le seuil de basculement ou a lieu une commutation sur  $U=U_{\min}$  Si la trajectoire est de nouveau orientée vers l'intérieur, elle touche le point (c) le seuil de basculement inférieur et ainsi de suite. Il y a donc un mouvement continu à l'intérieure de cette zone.

### 3.6.3.4 Choix de la surface de glissement

Elle est déterminée sur la base du système et des performances désirées. Dans un cas général, considérons le système décrit par la représentation d'état non linéaire suivante :

$$\{\dot{x} = f(x) + g(x).u \quad (3.31)$$

$$\{y = h(x) \quad (3.32)$$

La forme d'équation générale pour la surface de glissement, proposée par « J.J. Slotinie » [31]. Et, assurant la convergence d'une variable vers sa valeur désirée, est donnée par :

$$S(x) = \left[ \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda x \right) \right]^{r-1} e(x) \quad (3.33)$$

Avec :

$e(x) = x_{\text{ref}} - x$ : écart de la variable à régler

$\lambda x$ : constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré

$r$ : degré relatif.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ . Pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence .

## 3.7 Simulation

A l'issue de la présentation des principes des trois (3) algorithmes qui 'on va appliquer, des programmes de simulation sous le logiciel Matlab/Simulink ont été développés. Puis, dans les mêmes conditions de fonctionnement on a analysé le comportement du système fin d'évaluer les performances de chacune de ces techniques.

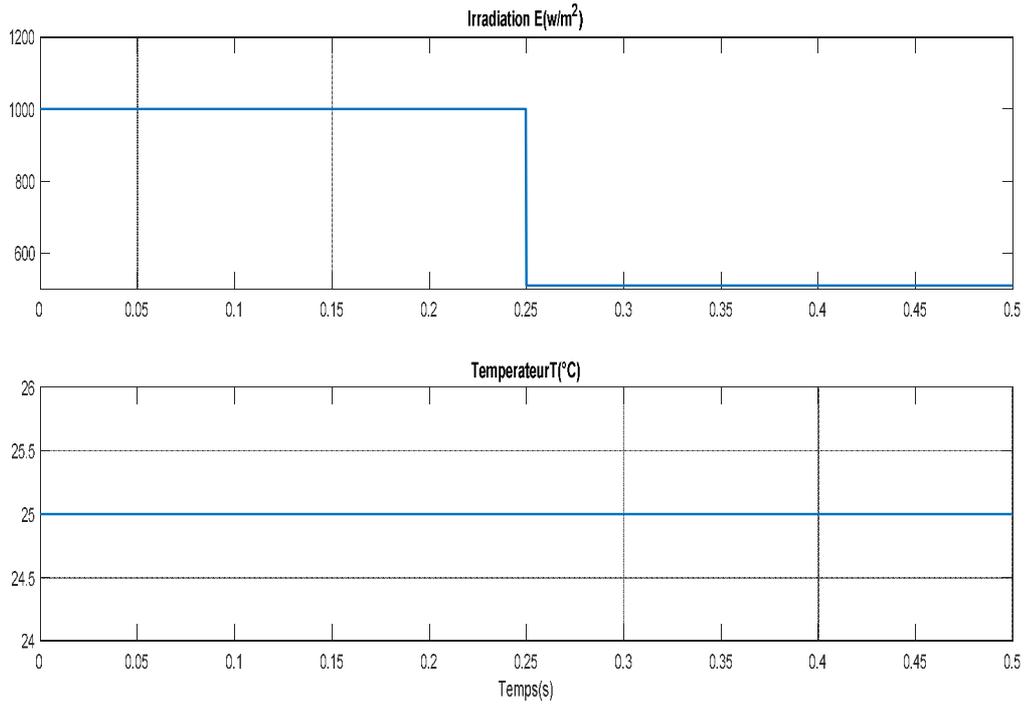


Fig.3.20 Les conditions climatiques  $E=1000w/m^2$ ,  $T=25^{\circ}C$

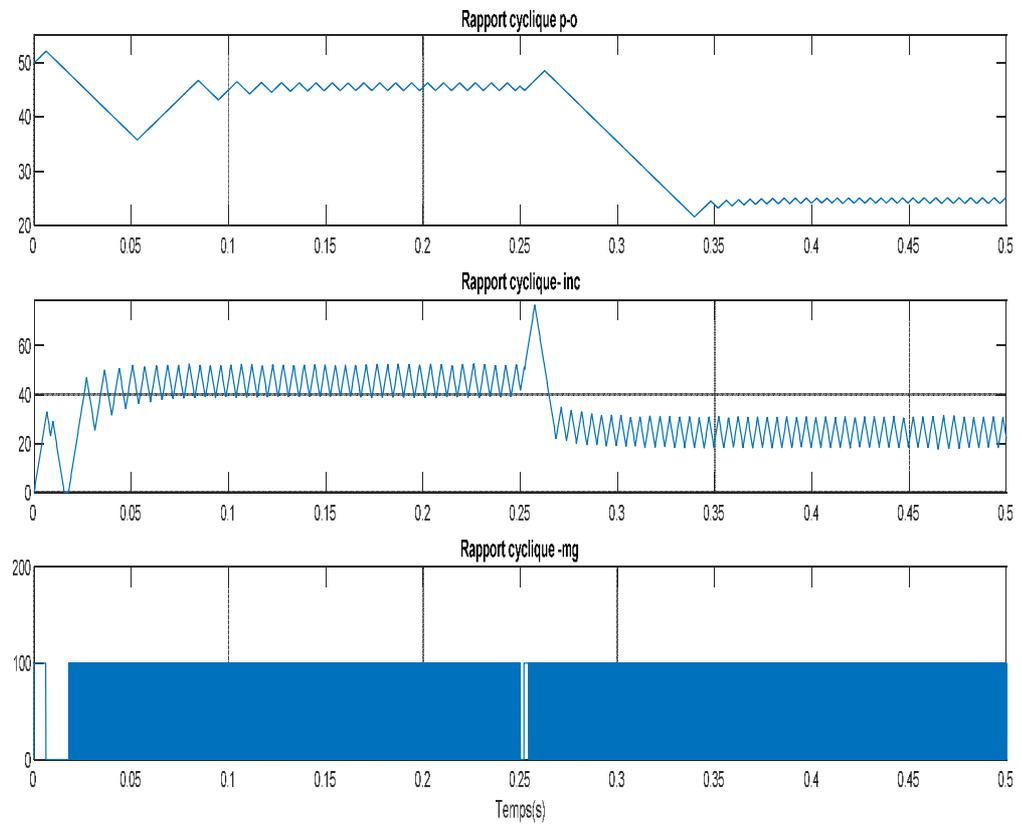


Fig.3.21 Représente le rapport cyclique PO, INC, MG

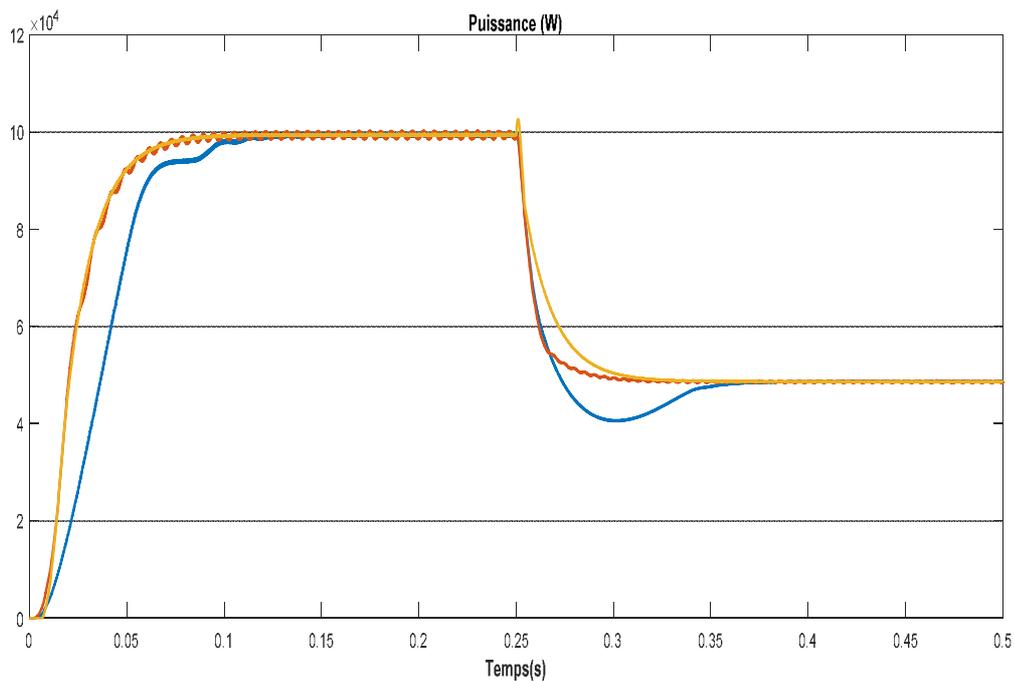


Fig.3.22 Représente la puissance globale  $P_{global}$  (W)

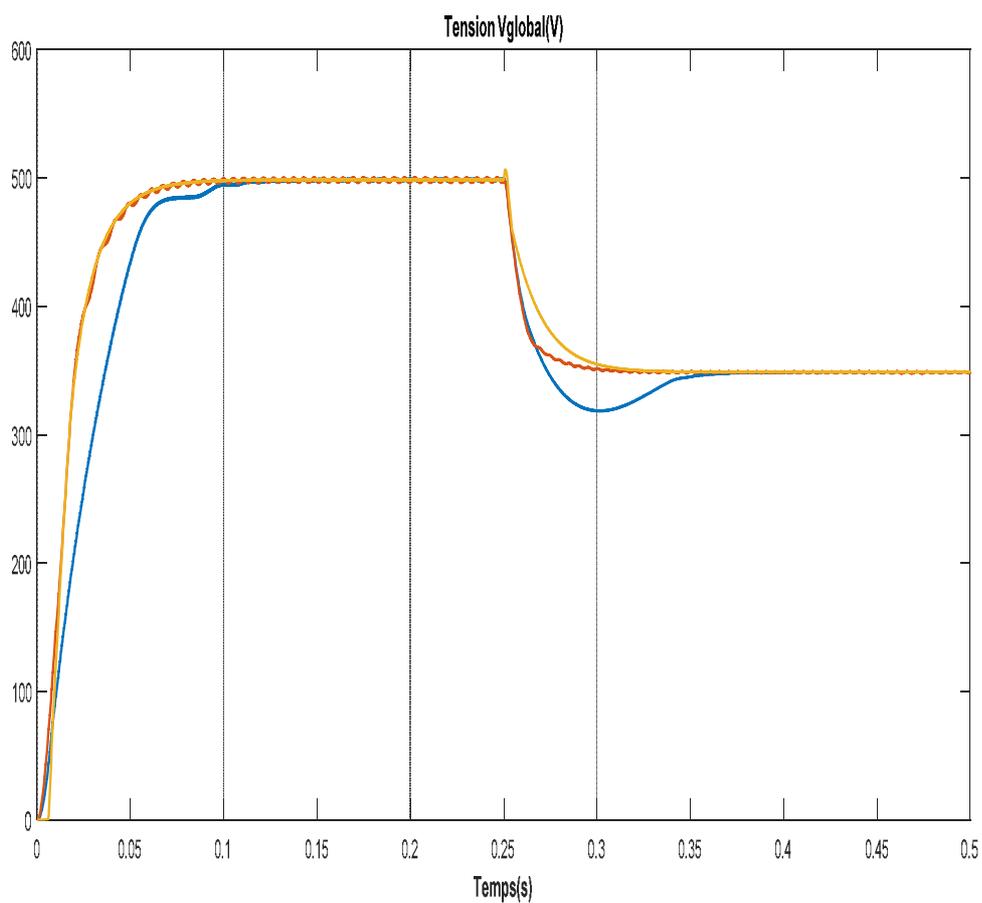


Fig.3.23 Représente la tension global  $V_{global}$  (V)

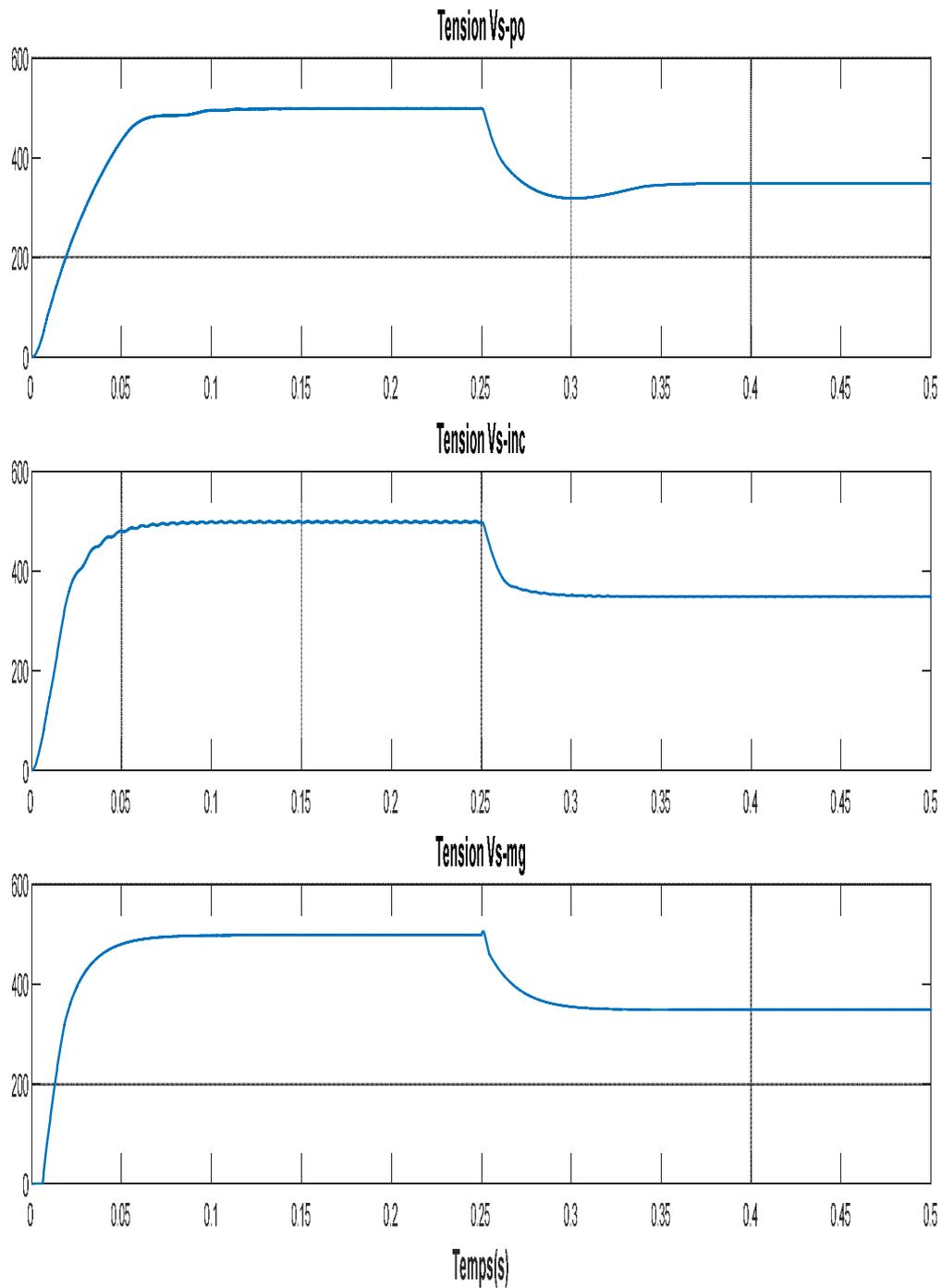


Fig.3.24 Représente la tension de sortie po,inc,mg

### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié deux types de convertisseurs statiques, qu'on va utiliser dans la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque et on a étudié trois méthodes MPPT tels que l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation et la méthode mode glissant.

## CHAPITRE 4

### LE SYSTEME POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

#### 4.1 Introduction

Le développement des systèmes de conversion photovoltaïque constitue un incontestable pour l'encouragement de l'installation d'un système de pompage photovoltaïque, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques.

Un système de pompage photovoltaïque nécessite, outre le générateur, un "sous-système" constitué au moins d'un moteur électrique destiné à faire fonctionner une pompe. La figure(4.1) représente les différents éléments d'un système de pompage solaire photovoltaïque.

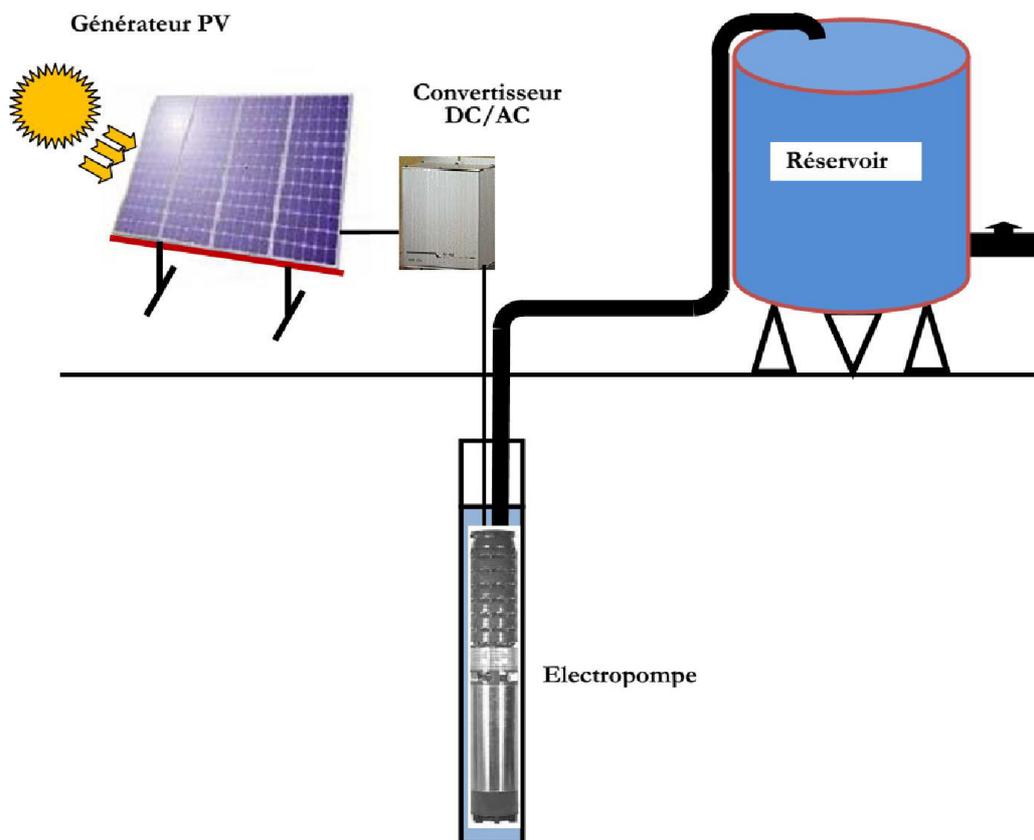


Fig.4.1 Schéma synoptique simplifié de Pompage PV [32].

## 4.2 Moteur à courant continu

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique [33].

## 4.3 Pompe photovoltaïque

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou autres (pétrole, huile...) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression. Un système de pompage sans batterie, est communément appelé « pompage au fil du soleil ». Il utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge.

### 4.3.1 Pompe volumétrique

Elle transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement [34]. Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

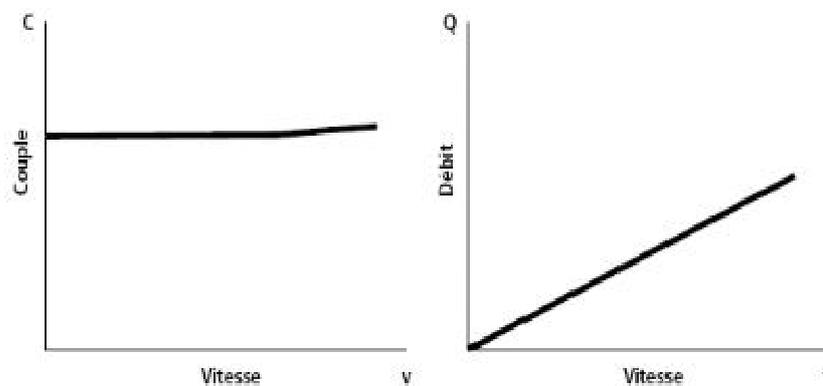


Fig.4.2 Caractéristiques débit- vitesse ; couple -vitesse d'une pompe volumétrique.

### 4.3.2 Pompe centrifuge

Elle est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à  $Q \cdot HMT$ , variera donc dans le rapport du cube de la vitesse [35].

Dans la présente étude, le principe de base d'opération de la pompe centrifuge et le modèle mathématique sont développés pour décrire son comportement opérationnel.

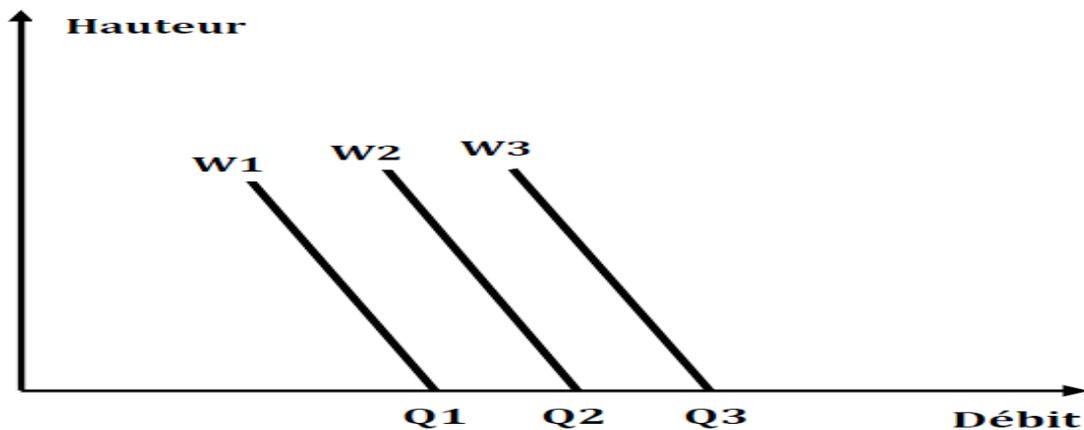


Fig.4.3 Caractéristiques débit-hauteur d'une pompe volumétrique.

#### a) Principe de fonctionnement

L'écoulement à l'intérieur d'une pompe est toujours d'une grande complexité. Il est non stationnaire et tridimensionnel, c'est-à-dire qu'il dépend du temps et des trois variables d'espace ( $t, x, y, z$ ). Sans une simplification préalable, il ne peut être ni analysé par des moyens de calcul simples, ni même décrit ou expliqué par les moyens ordinaires de la communication.

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

Les pompes centrifuges sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute. Ces machines comprennent donc.

- *un distributeur (arrivée du liquide)*
- *l'ouïe d'aspiration*
- *le corps de la pompe ou volute*
- *le refoulement qui va s'élargir*
- *l'ouïe de refoulement*

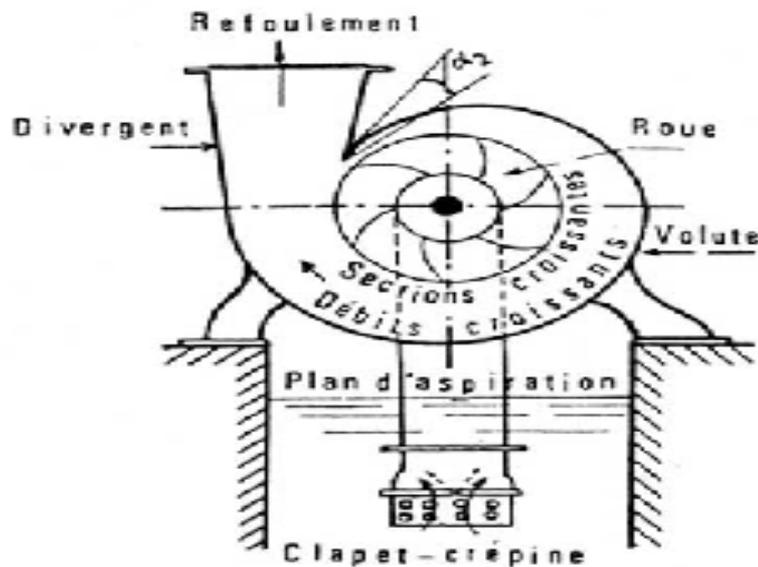


Fig.4.4 Constitution d'une pompe centrifuge

#### 4.4 Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [36] :

$$f(H, Q, W) = 0 \quad (4.1)$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des trois (3) paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante. La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (4.2)$$

Avec :

$H$  : Hauteur totale du pompage ;

$H_s$  : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

$H_d$  : Est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

##### 4.4.1 Les pertes de charge linéaires

Produites par le frottement du fluide sur les parois des conduites. Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.3)$$

Avec :

$\lambda$ : coefficient de pertes de charges linéaires ;

$L$ : longueur de la tuyauterie (m) ;

$D$  : diamètre de la tuyauterie (m) ;

$g$ : accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ) .

$v$ : vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \tag{4.4}$$

Avec,

Q : débit (m3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \tag{4.5}$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

#### 4.4.2 Les pertes de charge singulières

Produites par tout phénomène local tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne, etc. Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \tag{4.6}$$

avec  $\varepsilon$  : coefficient de pertes de charges locales .

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 \tag{4.7}$$

$$H_d = \left( \lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) * \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} = K f_r * q^2 \tag{4.8}$$

$K f_r$ : constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + K f_r * q^2 \tag{4.9}$$

#### 4.4.3 La caractéristique Q (H) de la pompe

La relation liant la hauteur d'eau H avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de «peleider-petermann »;

$$H = a_0 * w^2 - a_1 * w * q - a_2 * q^2 \tag{4.10}$$

Avec,  $a_0, a_1, a_2$  sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

La courbe H (Q) est donnée par la figure suivante :

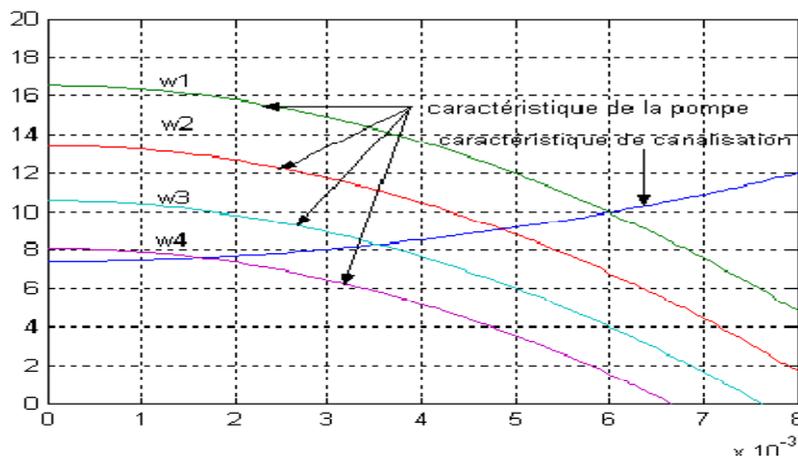


Fig.4.5 Courbe H (Q) de la pompe centrifuge et la caractéristique de canalisation

Le point de fonctionnement est l'intersection de ces deux caractéristiques. Alors pour une vitesse donnée, il y a seulement un point de fonctionnement qui dépend fortement des caractéristiques de tuyauterie d'une pompe indiquée. Par conséquent une bonne conception et une tuyauterie de bon choix donnent de bons résultats dans le système de pompage.

#### 4.4.4 La caractéristique couple vitesse $C(\omega)$ de la pompe

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant qui est de la forme suivante :

$$C_r = K_p * \omega^2 \quad (4.11)$$

Avec :

$$K_p = P_m / \omega^3 \quad (4.12)$$

#### 4.4.5 Calcul de puissance

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \rho g Q H(\omega) \quad (4.13)$$

$\rho$ : masse volumique de l'eau = 1000 Kg/ m<sup>3</sup>.

G : accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>).

#### 4.4.6 Calcul du rendement

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement global [37].

$$\eta = P_h / P_a \quad (4.14)$$

La figure (4 .6) montre que le rendement d'une pompe centrifuge varie sensiblement en fonction du débit.

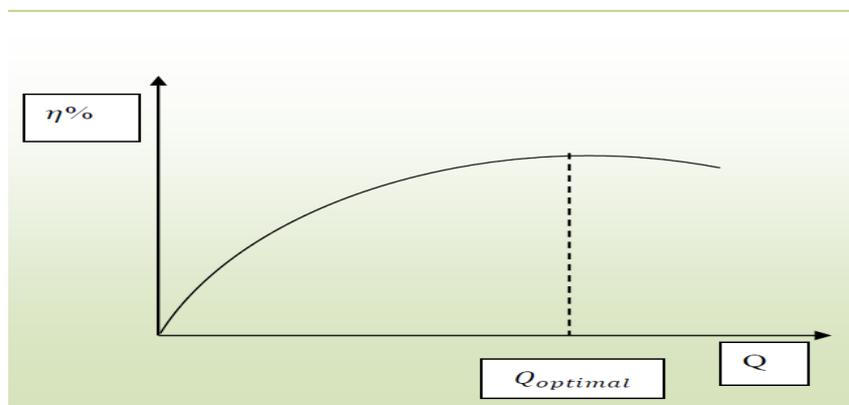


Fig.4 .6 Courbe de rendement d'une pompe

## 4.5 Choix d'une pompe

Il portera sur la nature du site ou elle va être installée et en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée et une classification des pompes selon la hauteur manométrique totale et le débit demandé. Pour les HMT supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers, la pompe volumétrique sera la plus utilisée mais, Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible [38].

## 4.6 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges

### 4.6.1 Avantages

- ✓ Faible encombrement ;
- ✓ Simple construction ;
- ✓ Moins de bruits ;
- ✓ Régularité du débit.

### 4.6.2 Inconvénients

- ✓ Diminution de rendement à faible débit ou à grande hauteur ;
- ✓ Apparition du phénomène de cavitation en cas d'insuffisance de pression à l'aspiration ;
- ✓ Diminution de la hauteur de refoulement en cas de fuite dans la conduite.

## 4.7 Simulation

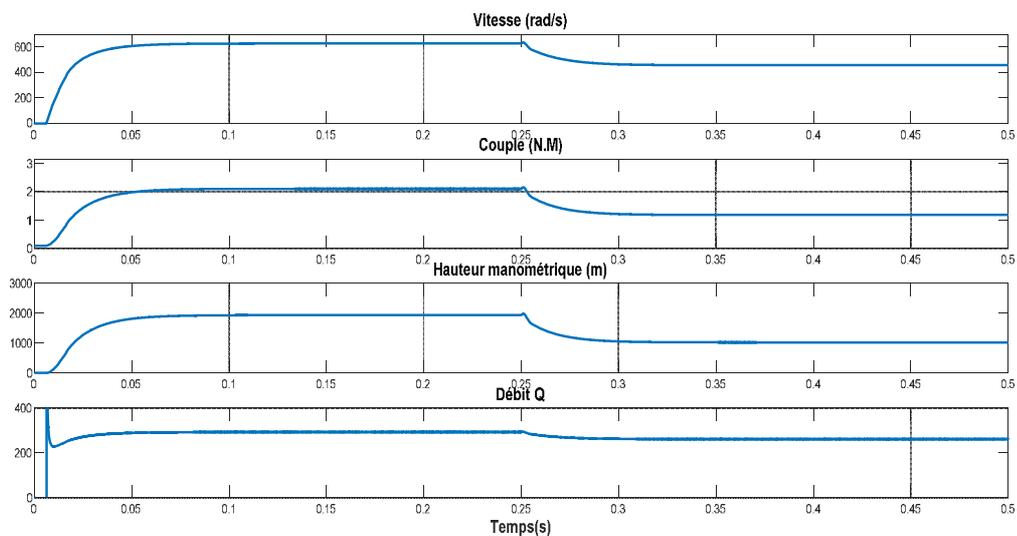


Fig.4.7 Représente vitesse(rad/s), couple (N.m), HMT(m), débit Q

#### **4.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons abordé le système motopompe, à commencer par la modélisation de la MCC en se basant sur les équations électriques et mécaniques, ensuite pour la deuxième partie de ce chapitre nous avons considérée principe et les différents types des pompes, ainsi qu'une modélisation de la pompe centrifuge en tenant comptes des pertes de charges linéaires et singulières, ainsi qu'une simulation de la pompe centrifuge.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce travail nous avons fait l'étude et la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque (avec une seule diode), un étage d'adaptation (convertisseur DC /DC Boost), une charge DC (résistance) et un étage de commande pour piloter le convertisseur (une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O, IncCond et puis la commande MPPT mode glissant).

Dans ce cadre , le modèle électrique à une seule diode du PV décrit par le modèle mathématique. Pour le convertisseur Boost qui est dont le modèle Simulink. Différentes simulations, sous l'environnement Matlab/Simulink, sont réalisées pour mettre en évidence l'influence des variations des conditions climatiques (éclairage et température) sur le MPP où la puissance du système est maximale.

La commande MPPT soit classique (P&O, IncCond, MG) permet la meilleure connexion entre le panneau photovoltaïque (PV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT mode glissant conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

En perspectives , on souhaite une continuité de travail dans ce domaine tout particulièrement commencer par l'implémentation expérimentale et manipuler sur une installation réelle.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Degla Mohammed et Larbi Ben Ahmed Bachir, Mémoire de master professionnel, domaine Sciences et Technologies, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque » Filière Electronique, Spécialité Instrumentation, université kasdi merbah ouargla, 2017.
- [2] Bouzeria Hamza, Thèse de doctorat 3ème cycle LMD en Électrotechnique, « modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque », université hadj Lakhdar Batna, 2016.
- [3] S. Bentouba, A. Slimani et M.S. Boucherit « Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie » Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda pp, (109 – 112), 2007.
- [4] P. Besse moulin, J. Olivier. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La météorologie 8e série n° 31 septembre (2000), 42-59.
- [5] Kalaidji Farah, Chekrouni Nesrine « Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT) » Université ABOU BAKR BELKAID, 2013/2014.
- [6] Mekemeche Abdelkader « Conversions Photovoltaïques » Thèse de Doctorat L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem Faculté des Sciences Exactes et Informatique Département de Physique. Soutenu le 04/07/2017.
- [7] Zerguine Bilal, Houabes Mourad, « Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque ». Université Badji MOKHTAR ANNABA, 2010.
- [8] A. Jaafari "Contribution à la Modélisation, l'Analyse et l'Optimisation de Lois de Commande pour Convertisseurs DC-DC de Puissance," Thèse de Doctorat, Supélec, 2011.
- [9] [Http://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneauxphotovoltaïques/\\_dfinition\\_de\\_la\\_puissance\\_de\\_crte.html](http://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneauxphotovoltaïques/_dfinition_de_la_puissance_de_crte.html). Consulter le 23/07/2018.
- [10] Belaid Lalouni Sofia, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque» Université A. MIRA de Bejaia, 2014/2015.
- [11] Akihiro OI, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system», Master Thesis California Polytechnic State University, 2005.
- [12] B, Makhoulf" Commande et modélisation d'un onduleur à cinq bras alimenté par un générateur photovoltaïque ", Mémoire master, université de Jijel, 2011.
- [13] [www.cder.dz](http://www.cder.dz).
- [14] Mohamed Lakhdar Louazene, mémoire de magister, électrotechnique, option maîtrise d'énergie, Université El hadj Lakhdar – Batna, 2008.
- [15] Rapport technique de la station radiométrique, „Enger MENA““ High Précision Météorologique Station of Research Unit for Renewable Energies in the Saharien Environment in ADRAR, Algeria, 2014.

- [16] Degla Mohammed Larbi, Ben Ahmed Bachir. « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque ». Master professionnel, Université Kasdi merbah Ouargla, 24/05/2017 –p 2.
- [17] Le photovoltaïque Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3, 4, 5,6/10.
- [18] Ali Jaafari "Contribution à la Modélisation, l'Analyse et l'Optimisation de Lois de Commande pour Convertisseurs DC-DC de Puissance," Thèse de Doctorat, Supélec, 2011.
- [19] Cours d'Électronique de Puissance" Chapitre 9 - Modélisation des Alimentations à Découpage" EDP – IUT GEII 2emeannée – Option EEP – 2004/2005.
- [20] ABBASSEN Lyes « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale Photovoltaïque » mémoire de Magister université mouloud Mammeri de Tizi ousou-2011.
- [21] B. Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergies solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv.2014.
- [22] Jacques Kamga et Idris Ouatah « conception et simulation d'une source hybride composée d'une pile à combustible et un pack de super condensateurs » Projet master 1 Université de Franche-Comté 2010.
- [23] *Onduleur de tension : mise en oeuvre et Structures-principes-applications*. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [24] Wildi : *Electrotechnique*, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [25] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [26] *Onduleurs et harmoniques*, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [27] A, Zegaoui, M. Aillerie1, P. Petit1, J.P. Sawicki, A. Jaafar, C. Salame and J.P. Charles: " Comparison of Two Common Maximum Power Point Trackers by Simulating of PV Generators". Energy Procedia 6 (2011) 678–687.
- [28] Yassine Lasmi, "Optimisation de la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un Système Photovoltaïque par les Techniques Intelligentes", Mémoire de Magister, Université Sétif, 2013.
- [29] B. Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergies solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv.2014.
- [30] BOUKHELKHAL Abdelouahab ; HACHEMI Ahmed Adel "Commande par mode de glissement d'une suspension active d'un vé chile" Mémoire d'Ingénieur Université de M'SILA,2006.
- [31] Zorig Abd elaziz ; Belouadah Ahmed hamza " Commande en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone à aimant permanent " Mémoired'Ingénieur Université deM'SILA,2006.
- [32] Debili Narimene, " Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister de l'Université de Constantine1,2014.

- [33] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [34] Amine belaid, etude et conception d'une pompe centrifuge, mémoire de master en génie mécanique, option conception mécanique et productique, université Mohammed Khidher de Biskra 2017.
- [35] Melle DEBILI Narimene, mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister en Electronique, « étude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Université Constantine1, 2014/2015.
- [36] Ksb" Determination Des Pompes Centrifuges " 0101.5/5 / 12.05 / Ottweiler / Germany.
- [37] K. Benlarbi« Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.
- [38] Site web (Internet), [www.panellipumps.it](http://www.panellipumps.it).