

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département d'Automatique**

**Mémoire de Fin d'Études**

**Pour l'obtention du diplôme Master en Automatique**

**Spécialité : Automatique et Systèmes**

**Thème :**

---

**Commande par mode glissant d'un système de pompage  
photovoltaïque à base d'un moteur à courant continu**

---

Réalisé par :

Bouhar Mohammed Toufik

Chelgham amine

Encadré par :

Dr. Doudou Sofiane

Année Universitaire 2019/2020

# *Remerciements*

*Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.*

*Nous voudrions aussi exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. DOUDOU SOFIANE pour sa sollicitude, et ses précieux conseils.*

*Nous tenons également, à remercier vivement notre très cher ami BOUBOUKRI NOUR-EDDINE pour son précieux aide*

*Nous voudrions remercier tous les enseignants de département automatique qui ont contribué à notre formation.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui nous ont apporté aide et encouragement, de près ou de loin*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail : A mon très cher père **ZINEEDDINE**, et ma chère mère **NABILA** que Dieu les garde et les protège pour leur soutien moral, encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mes sœurs **FERIEL** et **RANIA**. A tous mes camarades d'étude.*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment.*

**TOUFIK**

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail : A toute ma famille, mon père **BOUDJEMAA** ma mère **ZAHIRA** et mes sœurs que Dieu les garde et les protège pour leur soutien moral, encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A tous mes amis et mes camarades d'étude*

*Dédicace spécial au groupe **SILMIYA***

**AMINE**

# Table des matières

<b>Table des figures</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>ix</b>
<b>Symboles et abréviations</b> .....	<b>x</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur les systèmes pompes</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Domaines d'application des systèmes de pompage .....	3
I.3 Structure du système de pompage .....	3
I.4 Moteurs thermiques .....	4
I.5 Moteurs électriques .....	4
I.5.1 Moteur à courant continu .....	5
I.5.1.1 Constitution d'une machine à courant continu.....	5
I.5.1.2 Types des moteurs à courant continu .....	6
I.5.2 Moteur à courant alternatifs.....	8
I.5.2.1 Moteurs synchrones.....	8
I.5.2.2 Moteurs asynchrones .....	9
I.5.2.3 différence entre le moteur synchrone et asynchrone .....	9
I.6 Pompes.....	10
I.6.1 Caractéristiques des pompes.....	10
I.6.2 Différentes types de pompes .....	10
I.6.3 Pompes centrifuges .....	11
I.6.4 Roues de pompe.....	12
I.6.5 Pompes volumétriques .....	13
I.6.5.1 Types des pompes volumétriques .....	14
I.6.5.2 Comparaison entre la pompe centrifuge et volumétrique .....	15
I.7 Choix des systèmes de pompage.....	15
I.8 Conclusion .....	16
<b>Chapitre II : Généralité sur les systèmes photovoltaïques</b>	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Cellule photovoltaïque .....	17
II.2.1 Type des cellules PV.....	18

II.2.2 Rendement d'une cellule photovoltaïque.....	20
II.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	20
II.2.3.1 Modèle réel .....	20
II.2.3.2 Définition du courant de modèle.....	21
II.2.3.3 Modèle simplifié .....	22
II.2.3.4 Association des cellules .....	22
II.2.3.4.1 Association des cellules en série .....	23
II.2.3.4.2 Association des cellules en parallèle .....	23
II.2.3.4.3 Association des cellules série parallèle .....	23
II.3 Générateur photovoltaïque (GPV) .....	24
II.3.1 Générateur photovoltaïque simplifié .....	24
II.3.2 Simulation d'un générateur photovoltaïque .....	24
II.3.2.1 Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule PV du SM55.....	25
II.3.2.2 Influence de la température sur le GPV .....	27
II.3.2.3 Influence de l'éclairement sur le GPV .....	28
II.4 Commande MPPT .....	29
II.4.1 Principe de la commande .....	29
II.4.2 Convertisseur statique.....	30
II.4.2.1 Convertisseur DC/DC.....	31
II.4.2.2 Convertisseur DC/AC.....	31
II.4.3 Méthode de conception de la commande MPPT.....	31
II.4.3.1 Méthode indirect (Méthode offline) .....	31
II.4.3.2 Méthode direct (méthode online) .....	31
II.5 Conclusion .....	35
<b>Chapitre III : Commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage PV</b>	
III.1. Introduction.....	36
III.2. Types de systèmes de pompage photovoltaïque.....	36
III.2.1 Pompage avec batterie.....	36
III.2.1 Pompage au fil du soleil .....	37
III.3. Composants d'un système de pompage photovoltaïque.....	37
III.4. Commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage PV .....	38
III.4.1. Concepts de base de la commande par mode glissant .....	39
III.4.2.1. Principe de la commande par mode glissant.....	39

III.4.2.2. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant .....	40
III.4.2.3. Synthèse de la loi de commande par mode glissant d'ordre un .....	41
III.4.2.4. Phénomène du broutement .....	43
III.4.2. Modélisation mathématique du système de pompage photovoltaïque .....	45
III.4.2.1. Modèle du générateur photovoltaïque .....	46
III.4.2.2. Modèle du convertisseur DC/DC .....	46
III.4.2.3. Modèle du moteur DC .....	47
III.4.2.4. Modèle de la pompe .....	48
III.4.2.5. Modèle global du système de pompage photovoltaïque .....	48
III.4.2.6. Modèle MPPT de référence .....	49
III.4.2.7. Synthèse du contrôleur et analyse de la stabilité .....	50
III.5. Simulation et résultats .....	52
III.6. Conclusion .....	56

# Liste des figures

## Chapitre I : Systèmes de pompes

<b>Figure I.1:</b> Schéma générale d'un système de pompage .....	4
<b>Figure I. 2:</b> schéma d'un moteur à courant continu .....	5
<b>Figure I.3 :</b> schéma du moteur MCC à excitation indépendante .....	6
<b>Figure I.4 :</b> schéma du moteur MCC à excitation série .....	7
<b>Figure I.5 :</b> schéma du moteur MCC à excitation composé .....	7
<b>Figure I.6:</b> Moteur synchrone .....	8
<b>Figure I.7:</b> Moteur asynchrone .....	9
<b>Figure I.8 :</b> pompe centrifuge .....	11
<b>Figure I.9 :</b> Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge .....	12
<b>Figure I.10 :</b> Types des roues .....	13
<b>Figure I. 11:</b> Pompe volumétrique .....	13
<b>Figure I. 12:</b> Caractéristiques d'une pompe volumétrique .....	14

## Chapitre II : systèmes photovoltaïques

<b>Figure II.1:</b> Principe de la conversion photovoltaïque .....	18
<b>Figure II.2 :</b> Cellules à base de silicium. ....	19
<b>Figure II.3 :</b> Cellules à base de couche-mince .....	19



<b>Figure II.4:</b> Schéma d'une cellule pérovskites .....	19
<b>Figure II.5.</b> Modèle réel d'une cellule photovoltaïque .....	20
<b>Figure II.6 :</b> Modèle simplifié .....	22
<b>Figure II.7 :</b> Association en série .....	23
<b>Figure II.8 :</b> Association en parallèle .....	23
<b>Figure II.9:</b> Association série-parallèle .....	23
<b>Figure II.10 :</b> Caractéristique I-V d'une cellule PV .....	25
<b>Figure II.11 :</b> Caractéristique P-V d'une cellule PV .....	26
<b>Figure I.12 :</b> Points critiques de fonctionnement de la cellule PV dans les conditions standards .....	26
<b>Figure II.13 :</b> Simulation pour différentes valeurs de la température .....	27
<b>Figure II.14 :</b> Simulation pour différentes valeurs d'éclairement .....	28
<b>Figure II.15:</b> Chaine de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT	29
<b>Figure II.16 :</b> Architecture générique d'un convertisseur statique .....	30
<b>Figure II.17 :</b> Principe de la méthode perturbation et observation .....	32
<b>Figure II.18 :</b> Organigramme de la méthode perturbation et observation .....	33
<b>Figure II.19:</b> Principe de la méthode Inc-Cond .....	34
<b>Figure II.20:</b> Organigramme de la méthode IncCond .....	34
 <b>Chapitre III : Commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage PV</b>	
<b>Figure III.1:</b> Système de pompage photovoltaïque .....	37
<b>Figure III.2:</b> Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.....	39
<b>Figure III.3:</b> Plant de phase en mode glissant .....	40

<b>Figure III.4:</b> La fonction signe .....	42
<b>Figure III.5:</b> Commande équivalente .....	43
<b>Figure III.6:</b> Phénomène de broutement .....	44
<b>Figure III.7:</b> La fonction sat .....	44
<b>Figure III.8:</b> La fonction tanh .....	44
<b>Figure III.9:</b> Schéma fonctionnel du système de pompage PV .....	45
<b>Figure III.10:</b> Schéma électrique d'un convertisseur DC-DC Boost .....	46
<b>Figure III.11:</b> Variation de la température et de l'éclairement .....	53
<b>Figure III.12:</b> Puissance délivrée et puissance de référence .....	54
<b>Figure III.13:</b> Rapport cyclique .....	54
<b>Figure III.14:</b> Courant fourni par le GPV .....	55
<b>Figure III.15:</b> Tension aux bornes du GPV .....	55
<b>Figure III.16:</b> La vitesse de rotation du moteur et la vitesse nominale .....	55
<b>Figure III.17:</b> Tension aux bornes du moteur et tension nominale .....	56



# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Comparaison entre les pompes .....	15
<b>Tableau II.1</b> . Caractéristiques électriques du module SM55 .....	25
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres électriques du convertisseur Boost.....	52
<b>Tableau III.2</b> : Paramètres électriques du moteur DC.....	52
<b>Tableau III.3</b> : Paramètres du régulateur. ....	53

## Symboles et Abréviation

### Symboles

$E_g$	Energie de la bande de gap ;
$G_{ref}$	Valeur nominale de l'ensoleillement ( $1000 W / m^2$ ) ;
$I_L$	Courant traversant l'inductance L ;
$I_{cc\_ref}$	Courant de court-circuit aux conditions standards ;
$I_d$	Courant qui passé dans la diode ;
$I_e$	Courant engendré par la cellule ;
$I_{opt}$	Courant au point de puissance maximale ;
$I_{ph}$	Photo-courant ;
$I_{pv}$	Courant du générateur photovoltaïque ;
$I_s$	Courant à la sortie du convertisseur ;
$I_{sat}$	Courant de saturation de diode ;
$I_{sat\_ref}$	Courant de saturation de référence ;
$N_p$	Nombre des cellules en parallèle ;
$N_s$	Nombre des cellules en série ;
$P_{max}$	Puissance maximale ;
$R_s$	Résistance série ;
$R_{sh}$	Résistance de shunt ;
$T_d$	Période des impulsions ;
$V_T$	Tension thermique ;
$V_{co\_ref}$	Tension du circuit ouvert aux conditions standard ;
$V_e$	Tension aux bornes de la cellule ;
$V_{opt}$	Tension au point de puissance maximale ;

---

$V_{pv}$	Tension du générateur photovoltaïque ;
$Vt_{ref}$	Tension thermique a la température de référence ;
$k_i$	Coefficient de la température du courant de court-circuit ;
$t_{off}$	Temps d'ouverture du transistor MOSFET ;
$t_{on}$	Temps de fermeture du transistor MOSFET ;
$u_{eq}$	Commande équivalente ;
$u_n$	Commande discontinue ;
$x_d$	Valeur désiré de l'état $x$ ;
$Sat$	Fonction saturation;
$Sign$	Fonction signe;
$FF$	Facteur de forme ;
$K$	Constant de Boltzmann ( $K = 1,38.10^{-23}J/K$ );
$R$	Charge résistive ;
$S$	Surface de glissement ;
$T$	Température de la cellule en kelvin ;
$V(x)$	Fonction de Lyapunov ;
$e(x)$	Erreur de poursuit ;
$n$	Facteur de non idéalité de la jonction ;
$q$	Charge de l'électron ( $q = 1,602.10^{-19}c$ ) ;
$tanh$	Tangent hyperbolique;
$u$	Loi de commande ;
$\alpha$	Rapport cyclique.
$\lambda$	La pente de glissement.

## Abréviations

AC	Courant alternatif (alternating current)
DC	Courant Continu (Direct Current)
GPV	Générateur Photovoltaïque
IncCond	Conductance incrémentale (Incremental Conductance)
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
MOSFET	Transistor à effet de champ à grille isolée (metal–oxide–semiconductor field-effect transistor)
MPPT Tracking)	Recherche de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)
P&O	Perturber et Observer.
PPM	Point de Puissance Maximale
PV	Photovoltaïque
HMT	Hauteur manométrique totale
MCC	Moteur à courant continu

# Introduction général

---

---

L'énergie est la préoccupation essentielle pour l'homme dans le monde actuel depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité. Les combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) restent la principale source de production d'énergie, jusqu'à 80% de part dans le mix énergétique mondial. Cependant, la consommation croissante de l'énergie conduit à la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile et à la dégradation de l'environnement. Cela à inciter le monde à recherche des sources d'énergie durables et respectueuses de l'environnement.

L'énergie renouvelable a diverses formes telles que: énergies éolienne, géothermique, photovoltaïque et hydraulique. L'énergie photovoltaïque (PV) est l'une des plus efficaces ressources alternatives en raison de ses différents avantages. En réalité, l'énergie PV est respectueuse de l'environnement et a un coût inférieur d'installation. La production de l'énergie PV, c.-à-d., la conversion de l'énergie solaire en électricité par l'effet PV, est garanti par l'utilisation des panneaux photovoltaïques. Une caractéristique importante des panneaux est la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelée point de puissance maximale (PPM). Cependant, ce PPM est variée en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. Donc, pour garantir la génération de la puissance maximale en permanence, on fait appel à un mécanisme de poursuite de ce point, connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point tracking ».

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque (PVS) sont largement utilisée pour l'alimentation des régions isolées ou désertés, dans de nombreuses applications (éclairage, charge des batteries, pompages,...etc.). Le pompage de l'eau est l'un des domaines le plus prometteur, il s'agit d'une activité qui consiste à utiliser une pompe et un moteur pour déplacer un fluide d'un point à un autre, cette pompe peut être de type centrifuge ou volumétrique. Et à propos du moteur il peut être thermique ou électrique.



L'objectif de ce mémoire est de présenter une technique de commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage à base d'un moteur à courant continu alimenté par générateur photovoltaïque.

Le manuscrit est divisé en trois chapitres comme suit :

En premier chapitre, on donne la structure générale des systèmes de pompage et on présente en détail ces composantes : Moteurs et Pompes. On donne également les différents critères de choix des systèmes de pompage

En deuxième chapitre, on présente le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, sa modélisation mathématique et ses caractéristiques ainsi que les différents types d'associations des cellules. Aussi, on simule numériquement, sous l'environnement Matlab, le module PV SM55 pour étudier ces caractéristiques et analyser l'effet des conditions météorologiques sur son point de puissance maximale.

En troisième chapitre, on présente une commande par mode glissant d'ordre un sur un système de pompage, composé par une pompe centrifuge et un moteur à courant continu, et alimenté par un panneau PV, dont le but est de forcer le panneau à fonctionner autour de sa puissance maximale. Ensuite, on valide l'approche par une simulation numérique sous l'environnement Matlab.

On termine ce mémoire par présenter l'ensemble des travaux réalisés et donner les perspectives envisagées.

# Chapitre I : Généralités sur les systèmes de pompage

---

---

## I.1 Introduction

Les systèmes de pompes d'eau deviennent indispensables dans la vie quotidienne de l'être humain. Le fonctionnement de ces systèmes consiste à déplacer les fluides qu'ils soient chauds ou froids, propre ou sale, d'un point à un autre. Ils effectuent cette opération de manière extrêmement efficace et préservent l'environnement.

L'objectif de ce chapitre est de fournir des connaissances générales sur les systèmes de pompage. On entame ce chapitre par présenter les différents domaines d'application des systèmes de pompage. Ensuite, on définit la structure générale d'un système de pompage. Par la suite, on s'intéresse à la description détaillée des moteurs et pompes. En fin, on donne les différents critères de choix des systèmes de pompage.

## I.2 Domaines d'application des systèmes de pompage

Les systèmes de pompage sont utilisés pour diverses applications. On peut citer [1]:

- Distribution d'eau dans les villes et les réseaux d'irrigation.
- Evacuation des eaux usées.
- Circulation d'eau chaude sanitaire c.-à-d., que l'eau chaude soit disponible à chaque robinet.
- Relevage des eaux usées qui sont nécessaires lorsque les eaux usées se trouvent à un niveau inférieur au niveau d'évacuation (égouts).
- Fontaines ou d'aquariums
- Relevage des eaux des puits et forages vers un réservoir.

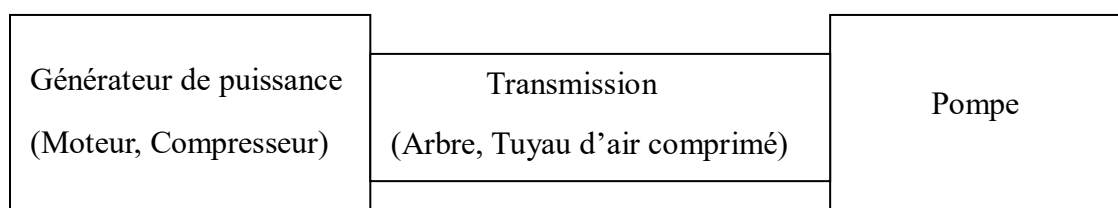
## I.3 Structure du système de pompage

De point de vue conception, le système de pompage est généralement constitué de trois parties distinctes comme l'illustre la figure (I.1) :

- La partie génératrice qui fournit la puissance nécessaire au pompage. Cette puissance peut être mécanique de rotation sous forme d'un couple et d'un mouvement de rotation

(fournie par un moteur électrique ou thermique) ou pneumatique (air comprimé généré par un compresseur).

- La partie de transmission, qui transmet cette puissance à la partie hydraulique. Cette fonction est assurée par un arbre s'il s'agit d'une énergie mécanique ou tuyau d'air comprimé pour l'énergie pneumatique.
- La partie hydraulique (pompe) qui transforme la puissance reçue en une puissance fluide. Cette énergie fluide se traduit sous forme de débit (énergie cinétique) et de pression (énergie potentielle).



**Figure I.1:** Schéma générale d'un système de pompage.

#### I.4 Moteurs thermiques

Un moteur thermique à combustion interne est un organe transformateur d'énergie. Il transforme l'énergie thermique produite par la combustion (carburant + comburant) en énergie motrice mécanique [2].

Un moteur est dit à combustion interne si la combustion se fait à l'intérieur du moteur. On parle de moteur à combustion externe si l'énergie est transportée par un fluide caloporteur à l'extérieur de celle-ci. Cas d'une turbine à vapeur par exemple.

#### I.5 Moteurs électriques

Le moteur est une machine électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation. On distingue deux grands types de moteurs électriques :

- ❖ Moteurs à courants continu.
- ❖ Moteurs à courants alternatifs

### I.5.1 Moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu (C.C) sont généralement employés dans des applications où la vitesse est largement variable comme la traction électrique, usinage, robotique,....etc. Cela est dû à la facilité du réglage de la vitesse, du moment, du couple et du sens de rotation (ne nécessitent pas beaucoup d'électronique de commande). Ils sont également envisageable d'employer ce dernier lorsqu'un système utilise une source d'énergie autonome (pile ou batterie) comme les systèmes automobiles (ventilateurs, lève- vitre, etc.).

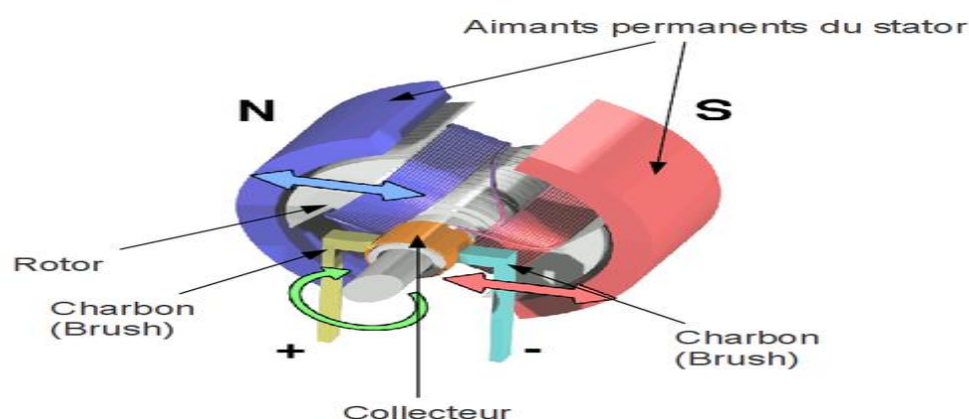


Figure I. 2: schéma d'un moteur à courant continu.

#### I.5.1.1 Constitution d'une machine à courant continu

Un moteur C.C est constitué de trois parties principales [3]:

- ❖ **Partie fixe** : appelée Stator (ou inducteur) formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires parcourues par un courant continu. Cette partie produit un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs. Ce flux et ce champ sont orientés du pôle Nord vers le pôle Sud.
- ❖ **Partie mobile** : dite Rotor (ou induit) composé d'un ensemble de conducteurs (bobines) parcourus par le courant continu absorbé et coupent le flux de champ magnétique provenant de l'inducteur. Ces conducteurs sont identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique formé d'un assemblage de tôles en fer doux isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines. Ce noyau est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur.
- ❖ **Partie collecteurs et balais** : Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre

de la machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.

Les balais assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Les balais étaient constitués de fils de cuivre disposés comme la paille de riz. Les balais en carbone (aussi appelés « charbon ») possèdent une bonne conductivité le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément. La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle.

### I.5.1.2 Types des moteurs à courant continu

On distingue trois grands types de moteur à courant continu : MCC à excitation indépendante, MCC à excitation série, MCC à excitation composée [4].

#### ❖ MCC à excitation indépendante

Dans ce type des moteurs le bobinage inducteur est raccordé à une alimentation à courant continu séparée. Par conséquent le courant qui alimente l'inducteur est indépendant de celui qui alimente l'induit.

Ce type d'excitation est fréquemment utilisé lorsqu'on désire faire varier la vitesse entre de larges limites avec un couple moteur constant. Dans ce cas, le flux étant maintenu constant, on fait varier la tension d'alimentation de l'induit à l'aide d'une génératrice à tension réglable.

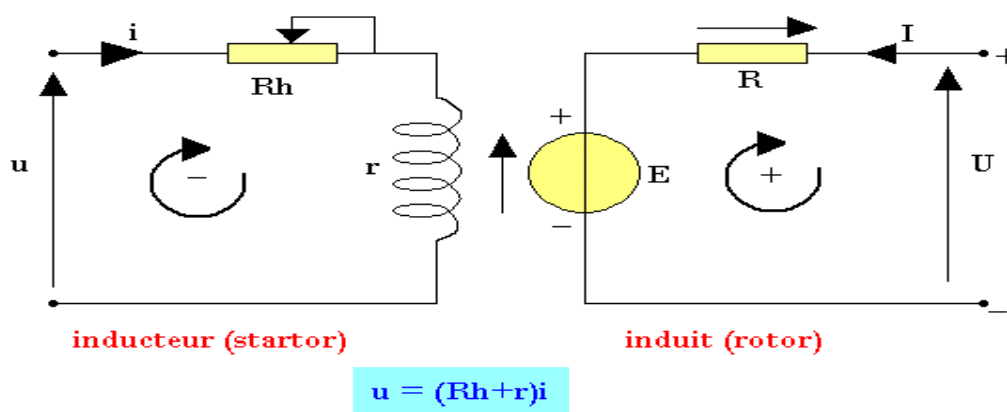


Figure I.3 : Schéma du MCC à excitation indépendante

#### ❖ MCC à excitation série

Dans ce type de moteur le circuit inducteur qui produit le champ est raccordé en série avec l'induit (rotor) ainsi la même tension traverse le stator et le rotor. Par conséquent, le sens de

rotation ne change pas avec le sens du courant; il suffit de brancher le rotor et le stator dans l'autre sens. Et l'induit reçoit une puissance

Ce type de moteur est utile dans l'électroménager par exemple ou dans les actions de traction ou de levage. Le principal inconvénient de ce type de moteur est qu'il s'emballé à vide.

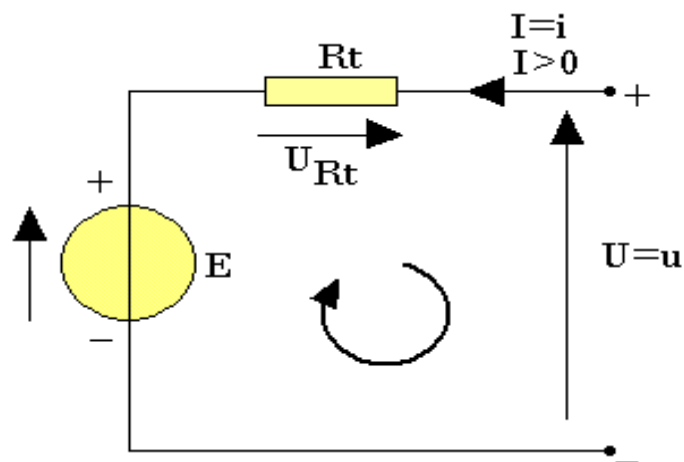


Figure I.4 : schéma du MCC à excitation série

#### ❖ MCC à excitation composée

Le moteur à excitation composée comporte un inducteur série et un inducteur shunt. Comme dans le cas des génératrices, lorsque le flux de l'inducteur série s'ajoute à celui de l'inducteur shunt, le moteur est appelé à excitation composée à flux additif.

Par contre, si l'inducteur série est raccordé de façon que son flux soit dans le sens contraire du flux d'inducteur shunt, le moteur est à excitation composée à flux soustractif [5].

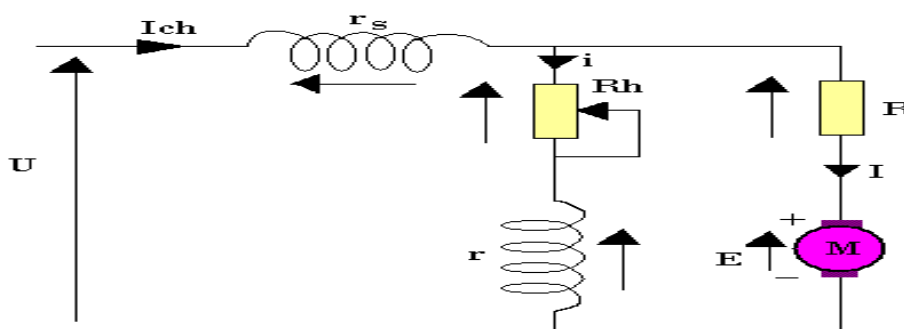


Figure I.5 : schéma du MCC à excitation composé

### I.5.2 Moteur à courant alternatifs

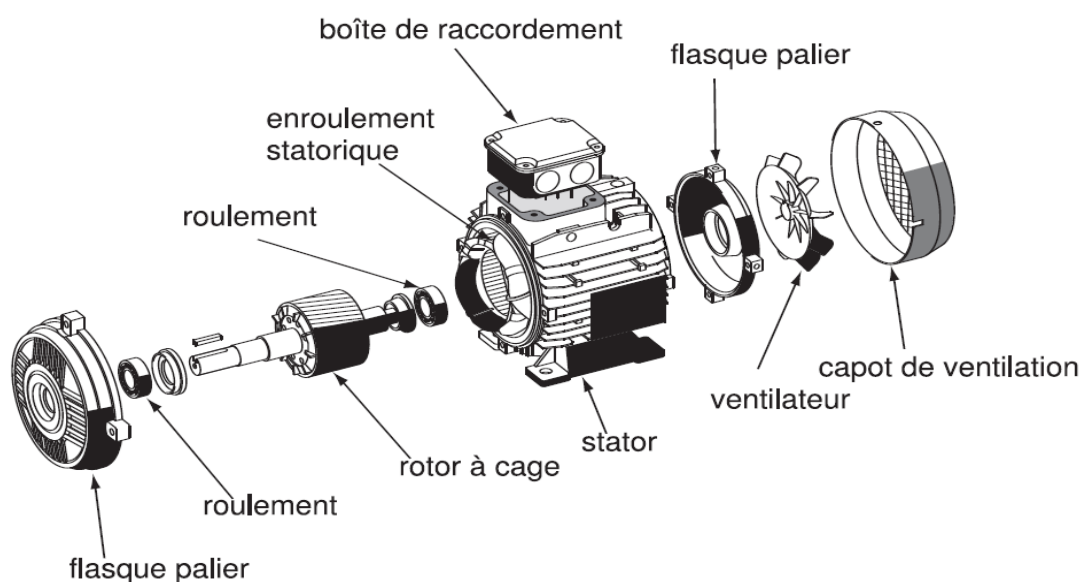
Tous les moteurs fonctionnant en C.A ont en commun l'existence d'un champ magnétique tournant produit par les enroulements du stator

Dans le cas des moteurs triphasés, trois bobines répartir également autour du rotor. Chaque bobine est reliée à l'une des trois phases d'une alimentation électrique triphasée. Le rotor voit le champ magnétique tournant net engendré par les trois bobines et se met à tourner en développant ainsi un couple sur l'arbre de transmission du moteur. Ce champ tourne soit dans le sens horaire, soit dans le sens antihoraire, en fonction de l'ordre des phases raccordées au moteur. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- ❖ Les moteurs synchrones.
- ❖ Les moteurs asynchrones.

### I.5.2.1 Moteurs synchrones

Le terme de moteur synchrone regroupe toutes les moteurs dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant, il présente des caractéristiques remarquables, qui sont, la vitesse constante quel que soit la charge. Il peut fournir de la puissance réactive, ce qui le rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation. Il peut supporter des chutes de tension relativement importante et ceci grâce aux possibilités de surexcitation sans décrocher. Par contre l'inconvénient du moteur synchrone est la difficulté lors de son démarrage [6]



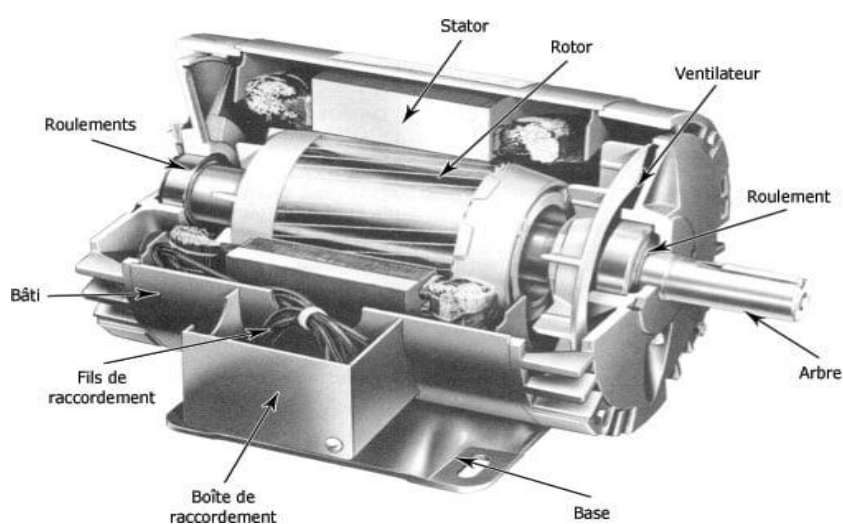
**Figure I.6:** Moteur synchrone.

### I.5.2.2 Moteurs asynchrones

Le moteur 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. Il utilise l'induction électromagnétique du champ magnétique du bobinage du stator pour produire un courant électrique dans le rotor et donc du couple. La vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Il devient le plus courant et le plus important dans l'industrie du fait de sa capacité de charge et de son coût moins cher.

Les moteurs à induction monophasés étant principalement utilisés pour de plus petites charges, comme dans les appareils électroménagers, tandis que les moteurs à induction triphasés sont davantage utilisés dans les applications industrielles telles que les compresseurs, pompes, systèmes de convoyeurs et le matériel de levage.



**Figure I.7:** Moteur asynchrone.

### I.5.2.3 Différence entre le moteur synchrone et asynchrone

La différence entre ces deux moteurs vient du rotor, le rotor du moteur synchrone se compose d'un aimant ou électroaimant alors que celui du moteur asynchrone est constitué d'anneaux (qui forment ce qu'on appelle la cage à écureuil).

## I.6 Pompes

La pompe est l'organe de base d'un système de pompage. Elle produit une énergie fluide qui s'échange et se consomme dans les circuits de l'installation pour déplacer (l'aspirer et/ou la refouler) le fluide.



### I.6.1 Caractéristiques des pompes

Les caractéristiques principales de n'importe quelle pompe sont [7]:

- **La cylindrée:** c'est le volume de fluide aspiré et expulsé pour un mouvement. Elle s'exprime en ( $\text{cm}^3/\text{tour}$ ) ou en ( $\text{m}^3/\text{rad}$ ).
- **Le débit:** c'est la quantité de fluide mise en mouvement en fonction par unité de temps du temps. Il est exprimé en litres par minute (L/min). Le débit d'une pompe hydraulique dépend de deux importants facteurs : la cylindrée de la pompe et la vitesse de révolution de la pompe.
- **La différence de pression:** elle caractérise la capacité de la pompe à augmenter la pression du fluide qui la traverse. La différence de pression est faible pour une pompe centrifuge, elle peut être importante pour une pompe volumétrique. Dans le cas où le liquide pompé est l'eau, on parle plutôt de Hauteur Manométrique Totale ou HMT.
- **Le rendement volumétrique:** Le rendement volumétrique est le rapport entre le débit d'huile réellement fourni par la pompe et le débit théorique. Le rendement volumétrique est toujours inférieur à 1 en raison des fuites.
- **Le rendement mécanique:** c'est le rapport entre le couple (ou la force) théoriquement nécessaire pour produire la différence de pression et le couple effectivement nécessaire.
- **Le rendement global:** c'est le rapport entre la puissance hydraulique fournie par la pompe et la puissance mécanique absorbée par la pompe. C'est aussi le produit du rendement volumétrique par le rendement mécanique.
- **La puissance hydraulique P** (en watts) se calcule en faisant le produit du débit Q (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) par la différence de pression NP (en pascal).

### I.6.2 Différentes types de pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée, la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe a une valeur théorique de 9.8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres.

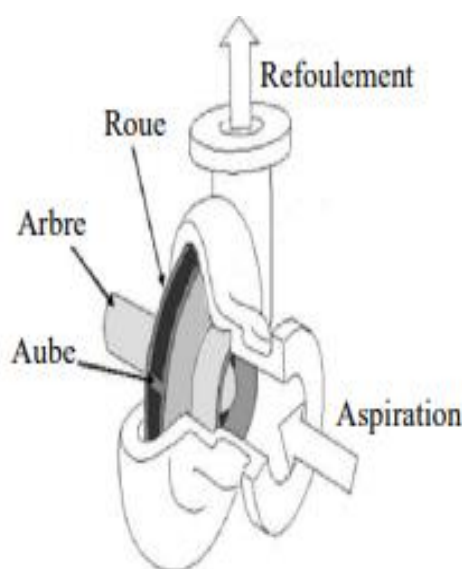
Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celles-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec

la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

### I.6.3 Pompes centrifuges

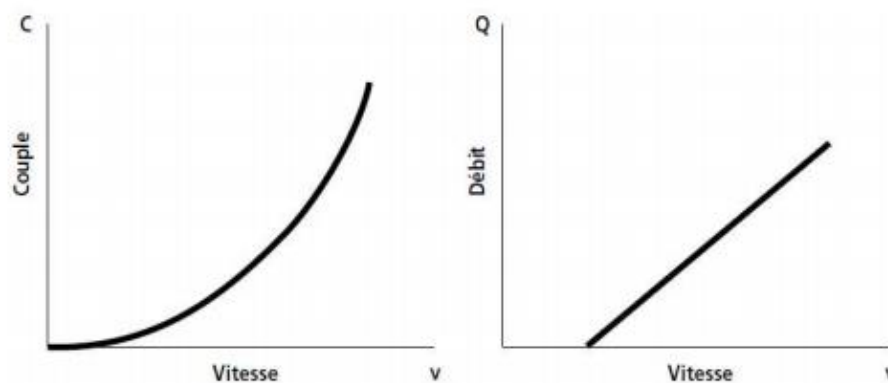
Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.



**Figure I.8 :** pompe centrifuge

Les caractéristiques des pompes centrifuges :

- ❖ Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faible ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- ❖ La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global. [8]



**Figure I.9 :** Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.

À partir de la figure I.9, le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse et le débit est proportionnel à la vitesse, toutefois il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir le débit

#### **I.6.4 Roues de pompe**

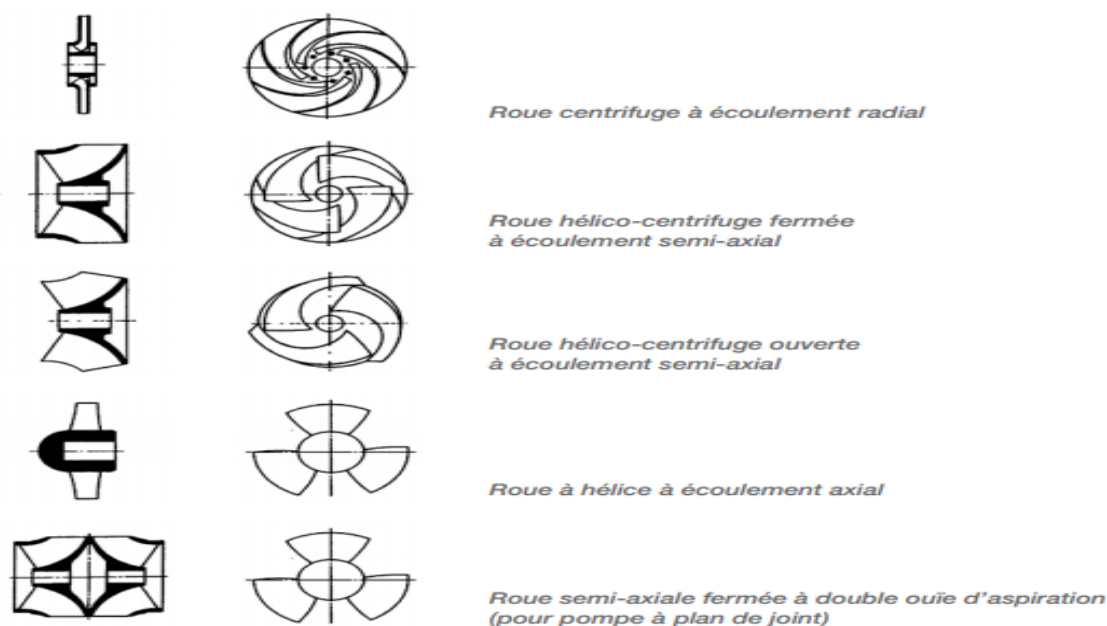
Les pompes centrifuges comportent les organes essentiels suivants :

- ❖ la roue met en vitesse le liquide arrivant par son ouïe centrale
- ❖ la volute transforme l'énergie de vitesse en énergie de pression.

Les formes de roue sont réalisées essentiellement en fonction des caractéristiques hydrauliques à satisfaire. Par ordre décroissant de pression générée à puissance égale, elles peuvent être du type :

- ❖ à écoulement radial : roue centrifuge,
- ❖ à écoulement semi-axial : hélico-centrifuge,
- ❖ à écoulement axial : roue hélice.

A noter que les roues centrifuges et hélico-centrifuges peuvent être à simple ou à double ouïe d'aspiration.



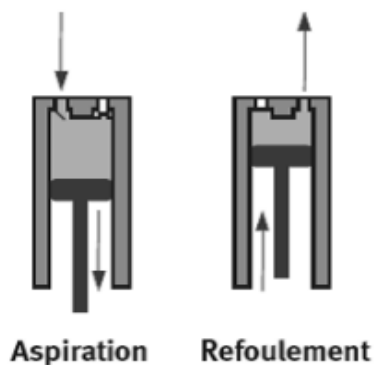
**Figure I.10:** Types des roues.

### I.6.5 Pompes volumétriques

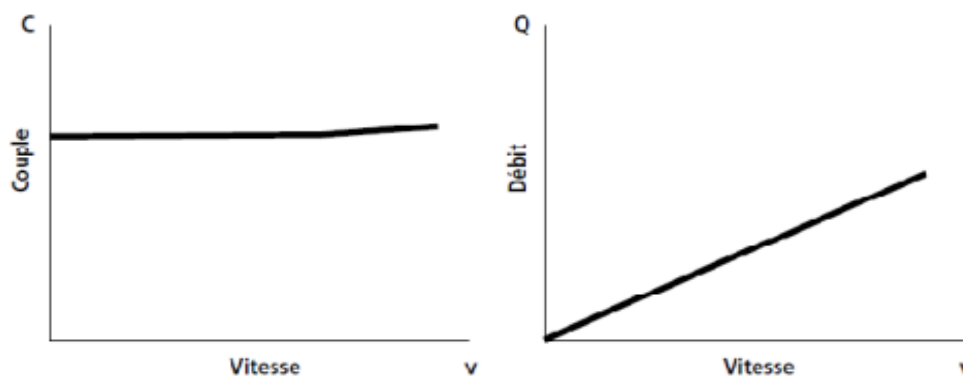
Elles se composent d'un élément mobile se déplace dans un corps fixe parfaitement ajusté. Le fluide est mis en mouvement par une variation du volume entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement dû à la diminution de la pression en amont.

Leurs principaux atouts sont les suivants:

- ❖ Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup> /h) et aux grandes hauteurs
- ❖ Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.
- ❖ Dès leur mise en route elles provoquent une diminution de pression en amont qui permet l'aspiration du liquide. Il est nécessaire néanmoins d'examiner la notice du fabricant. [8]



**Figure I. 11:** Pompe volumétrique.



**Figure I. 12:** Caractéristiques d'une pompe volumétrique.

A partir de la figure I.9, le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse et le débit est proportionnel à la vitesse.

#### **I.6.5.1 Types des pompes volumétriques**

Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.),

1. **Les pompes volumétriques alternatives** : la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.
2. **Les pompes volumétriques rotatives**: ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

### I.6.5.2 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

	<b>Pompes centrifuges</b>	<b>Pompes volumétriques</b>
<b>Mécanique</b>	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression).
<b>Performance</b>	Le débit dépend de la pression variable.	Le débit est constant quelle que soit la pression.
<b>Viscosité</b>	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe.	Le rendement augmente avec la viscosité.
<b>Rendement</b>	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
<b>Conditions d'entrée</b>	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Autoamorçage d'une pompe à sec possible

**Tableau I.1** : Comparaison entre les pompes.

## I.7 Choix des systèmes de pompage

### I.7.1. Choix du moteur

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants :

- ❖ Bon rendement.
- ❖ Souplesse de fonctionnement.
- ❖ Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- ❖ Fiabilité et autonomie de l'installation.

### **I.7.2. Choix de la pompe**

Pour les petites hauteurs et les faibles débits journaliers, on peut choisir les pompes volumétriques. L'utilisation de pompes mécaniques sur cette plage d'utilisation se limitera principalement aux pompes volumétriques de faible puissance. Il est conseillé d'utiliser des pompes à aspiration pour les hauteurs de moins de 7 mètres ce qui correspond généralement au type centrifuge à ailettes. Pour de faibles débits et une puissance disponible variable (par exemple, couplage éolien), l'emploi d'une pompe volumétrique permet un débit plus constant.

Pour une pompe centrifuge est généralement efficace pour les hauteurs moyenne (10 à 50 mètres) . Mais son rendement est très étroitement lié à la hauteur et son dimensionnement est critique. Pour les hauteurs supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers, la pompe volumétrique sera la plus utilisée. Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible.

### **I.8 Conclusion**

Dans ce premier chapitre on a présenté des généralités sur les systèmes de pompage. Les systèmes de pompage sert à aspirer et transférer le fluide d'un point à un autre ou de relever le fluide d'un niveau inférieur vers un niveau supérieur. La plupart des systèmes de pompage comportent un moteur électrique (ou thermique) qui convertie l'énergie électrique (ou thermique) en une énergie mécanique de rotation. Cette énergie est transportée par un arbre vers la pompe (volumétrique ou centrifuge) qui la transforme en une énergie fluide. Pour d'autres systèmes de pompage, le mouvement de la pompe est engendré par un excentrique mû par un piston, une vibration électromagnétique ou actionnée par de l'air comprimé.

# Chapitre II : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

---

---

## II.1 Introduction

L'effet photovoltaïque permet de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette énergie s'avère très intéressante pour l'alimentation de plusieurs systèmes électriques surtout dans les sites isolés. L'énergie photovoltaïque présente les avantages suivants :

- ❖ Energie indépendant.
- ❖ Le combustible est gratuit (rayonnement).
- ❖ Génère l'énergie requise.
- ❖ L'extension des systèmes est facile.

Comme inconvénients, on peut citer les points suivants:

- ❖ Le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle.
- ❖ L'énergie PV produite dépend des conditions météorologiques.
- ❖ Ils ne convient pas aux utilisations à forte consommation.

Dans ce chapitre on va donner des généralités sur l'énergie photovoltaïque. On commence par présenter la cellule PV, son principe de fonctionnement et son modèle mathématique. Ensuite, on fait une description du générateur PV et on le simule sous la variation de la température et l'ensoleillement. On termine ce chapitre par exposer le problème de la commande MPPT et présenter les méthodes utilisées pour la conception de cette commande.

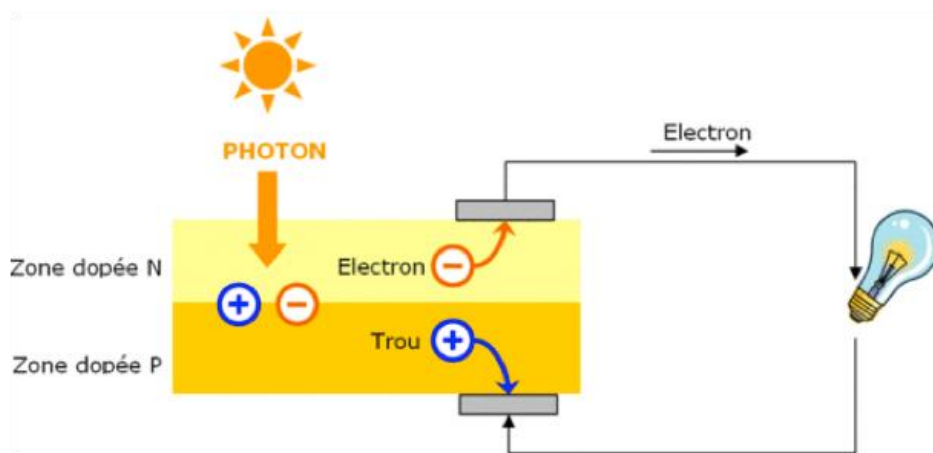
## II.2 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse des rayons solaires sous forme d'ondes électromagnétiques appelées photons et la transforme directement en courant électrique grâce à l'effet PV découvert en 1839 par Becquerel. Le principe de base de l'effet PV est la production et le transport des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière dans le



matériau. Ce matériau comporte deux couches, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons dites respectivement, dopé de type N (chargée négativement) et dopé de type P (chargée positivement). Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P.

Initialement, les zones dopées N et dopée P sont chargées positivement et négativement, respectivement. 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, et par conséquent une jonction (dite P-N) est 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 communique 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 le courant électrique circule. La figure suivante montre ce principe



**Figure II.1:**Principe de la conversion photovoltaïque.

### II.2.1 Type des cellules PV

Il existe trois principales familles de cellules à l'heure actuelle :

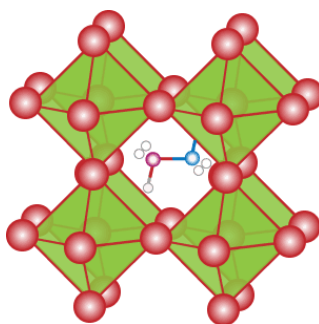
❖ **Cellules à base de silicium cristallin:** Ce sont les cellules, les plus anciennes, utilisant le cristal de silicium comme matière pour la fabrication du semi-conducteur. Leur rendement de conversion est élevé (de 11 à 16 % pour une durée de vie de 30 ans environ). On trouve deux variantes des cellules à base de silicium cristallin: **monocristallin** (12-16%) et **polycristallin** (11% -13%).

❖ **Cellules à base de couche-mince:** Ces cellules utilisant une technologie dite des couches minces (Thin-film) qui consiste à déposer une couche d'un matériau semi-conducteur faible épaisseur sur des substrats variés (verre, acier inoxydable, plastique...) et produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir : cellule en silicium amorphe (A-SI) l'on trouve par exemple sur l'écran de nos calculatrices, cellule en tellure de Cadmium (CdTe), cellule en cuivre/indium/sélénium (CIS) ou en cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIGS).



**Figure II.2 :** Cellules à base de silicium. **Figure II.3 :** Cellules à base de couche-mince.

❖ **Cellules organiques :** Ce sont des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Elles sont constituées de molécules organiques et des matériaux semi-conducteurs. Leurs rendements sont de l'ordre de 3 à 5%. Leur point faible reste aujourd'hui est la durée de vie limitée. Il y a trois types de ces cellules : cellules à molécule, cellules à polymères et cellules à pérovskites.



**Figure II.4:** Schéma d'une cellule pérovskites.

Et enfin, les cellules hybrides qui rassemble des cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés. Comme exemple, on cite les cellules multi-jonctions et les cellules à concentrations.

## II.2.2 Rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement  $\eta$  d'une cellule est la part d'énergie radiative (rayonnement) qu'il est capable de transformer en énergie électrique.

$$\eta[\%] = 100 * \frac{\text{Puissance électrique générée [W]}}{\text{Puissance radiative [W]}} \quad (\text{II.1})$$

Ce rendement dépend des conditions d'exploitation du module.

## II.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

L'élaboration d'un modèle mathématique est indispensable pour l'étude des caractéristiques de la cellule et la conception des lois de commande. Deux modèles sont distingués : Réel et Simplifié.

### II.2.3.1 Model réel

Le modèle réel de la cellule est équivalent à un circuit électrique à une seule diode donné par la figure (II.5).

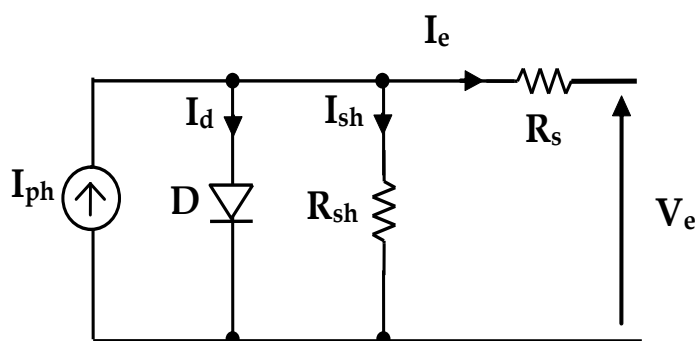


Figure II.5. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.

La relation entre le courant engendré par la cellule ( $I_e$ ) et la tension aux ces bornes ( $V_e$ ) est donnée par l'expression suivante :

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{V_e + R_s I_e}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V_e + R_s I_e}{R_{sh}}, \quad V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.2})$$

Où

- $I_{ph}$ : Photo-courant.
- $I_{sat}$ : Courant de saturation de diode.
- $V_e$ : Tension aux bornes de la cellule.
- $V_T$ : tension thermique.
- $K$  : Constant 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 en kelvin  $=273+T$  (en degrés).
- $n$  : Facteur de non idéalité de la jonction.
- $R_{sh}$  : Résistance en parallèle, très petite (d'ordre de quelques milli-ohms), représente les pertes ohmiques du matériau.
- $R_s$ : Résistance en série, suffisamment grande (d'ordre du méga ohm), elle représente le courants parasite.

### II.2.3.2 Définition des courants du modèle

**Courant de court-circuit** : Il représente le courant lorsque la tension appliquée à la cellule est nulle. Ce courant est le courant maximal fourni par la cellule et dépend principalement de l'éclairement. Son expression est donnée comme suit :

$$I_{cc} = I_{cc\_ref} + k_i(T - T_{ref}) \quad (II.3)$$

Avec

- $I_{cc\_ref}$  : Courant de court-circuit aux conditions standards.
- $G_{ref}$  : Valeur nominale de l'ensoleillement ( $1000 W / m^2$ ).
- $T_{ref} = 25^\circ = 298$  kelvin.
- $k_i$  : Coefficient de la température du courant de court-circuit, donné sur la fiche technique du module.

**Photo-courant**: Le photon courant est proportionnel à l'irradiation et très proche au courant de court-circuit dans les conditions standards. Son expression est donnée par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc} \quad (II.4)$$

**Courant de saturation de la diode** : Le courant de saturation de la diode est dépend de la température. Sa valeur peut être calculée par l'expression suivante :

$$I_{sat} = I_{sat\_ref} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left( \frac{-qE_g}{nK} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (II.5)$$

$$I_{sat\_ref} = \frac{I_{cc\_ref}}{\exp\left(\frac{V_{co\_ref}}{nV_{t\_ref}}\right) - 1} \quad (\text{II.6})$$

Où

- $I_{sat\_ref}$  : Courant de saturation de référence.
- $V_{co\_ref}$  : Tension du circuit ouvert aux conditions standard (voir datasheet).
- $V_{t\_ref}$  : Tension thermique a la température de référence (298 kelvins).
- $E_g$  : Energie de la bande de gap.

### II.2.3.3 Model simplifié

Le modèle réel peut être réduit à un modèle simple par la négligence des courants de parasite au niveau de la diode ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ ).le circuit équivalent à ce modèle est montré par la figure II.6

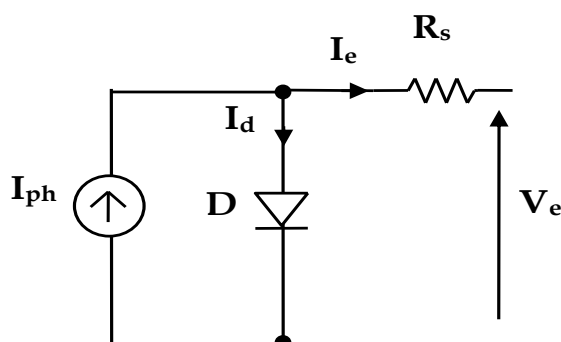


Figure II.6 : Modèle simplifié.

Par conséquent, l'expression de la caractéristique I-V donnée par (II.1) devient comme suit :

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{V_e + R_s I_e}{nV_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

### II.2.3.4 Association des cellules

Une cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). On distingue trois types d'association : série, parallèle et série/parallèle.

### II.2.3.5 Association en série

La mise en série des cellules permet d'augmenter la tension du module et maintenir le courant constant. Cette association est montrée par la figure suivante :

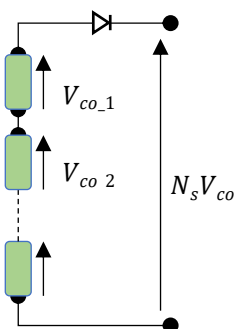


Figure II.7 : Association en série.

### II.2.3.6 Association en parallèle

L'association en parallèle des cellules augmente le courant du module. La tension du module est identique à celle de la cellule photovoltaïque comme le montre la figure suivante:

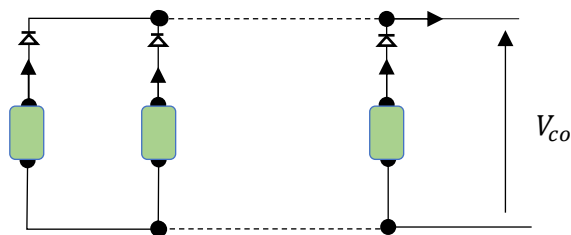


Figure II.8 : Association en parallèle.

### II.2.3.7 Association série parallèle

L'association de  $N_s$  cellule en série et  $N_p$  cellule en parallèle permet d'augmenter la tension et le courant du module photovoltaïque.

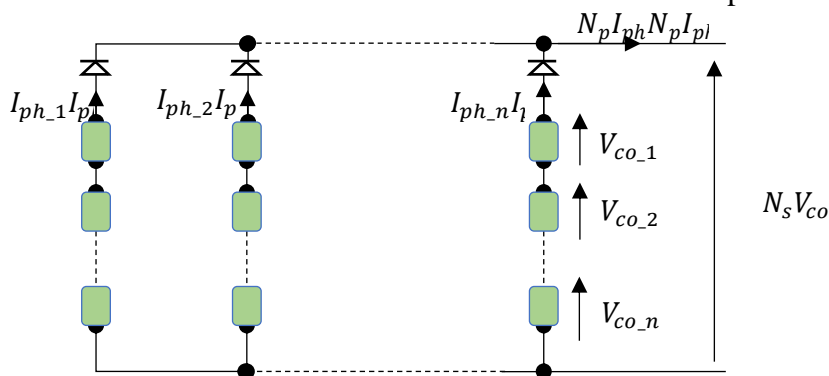


Figure II.9: Association série-parallèle.

### II.3 Générateur photovoltaïque (GPV)

Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel, comme les systèmes de pompage. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur [21].

Si on suppose que toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, alors le modèle mathématique du GPV peut être donné par l'équation non linéaire suivante [33] :

$$I_e = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left( \exp \left( \frac{V_e + \frac{N_p}{N_s} I_e R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_e + \frac{N_p}{N_s} R_s I_e}{\frac{N_p}{N_s} R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

Où  $N_s$  est le nombre de cellules en série et  $N_p$  le nombre de cellules en parallèle.

#### II.3.1 Générateur photovoltaïque simplifié

Pour un générateur photovoltaïque simplifié, son modèle mathématique est donné comme suit:

$$I_e = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left( \exp \left( \frac{V_e + \frac{N_p}{N_s} I_e R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

#### II.3.2 Simulation d'un générateur photovoltaïque

Dans cette partie, on va simuler le module photovoltaïque **SM55** sous l'environnement Matlab afin d'étudier ces caractéristiques (I-V), (P-V), et l'effet de la température et l'éclairement sur son fonctionnement.

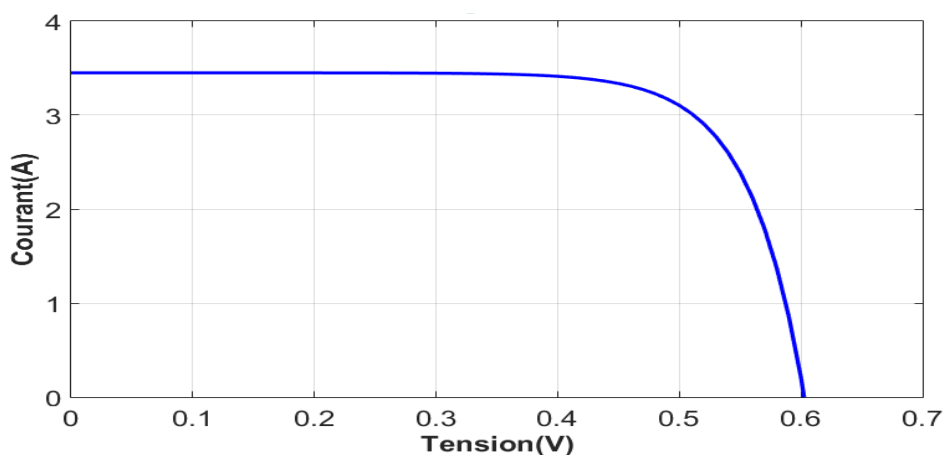
Le module photovoltaïque **SM55** est composé de 36 cellules monocristallin connectées en série et 1 en parallèle, fournit une puissance crête de 55W dans les conditions standards. Le tableau suivant résume les caractéristiques électriques et thermiques du module dans les conditions standard.

<b>Puissance crête <math>P_{\max}</math> (W)</b>	55W
<b>Tolérance de puissance</b>	10%
<b>Courant à puissance maximal <math>I_{pm}</math> (A)</b>	3.15A
<b>tension à puissance maximal <math>V_{pm}</math> (V)</b>	17.4A
<b>Tensions en circuit ouvert <math>V_{co}</math> (V)</b>	21.7V
<b>Courant de court-circuit <math>I_{cc}</math> (A)</b>	3.45A
<b>N ; Ki</b>	1.7404 ; 0.0004
<b>Eg(énergie de la Bande de gap)</b>	1.1 eV
<b>Rs</b>	0.1124
<b>Rsh</b>	6500

**Tableau II.1.** Caractéristiques électriques du module SM55.

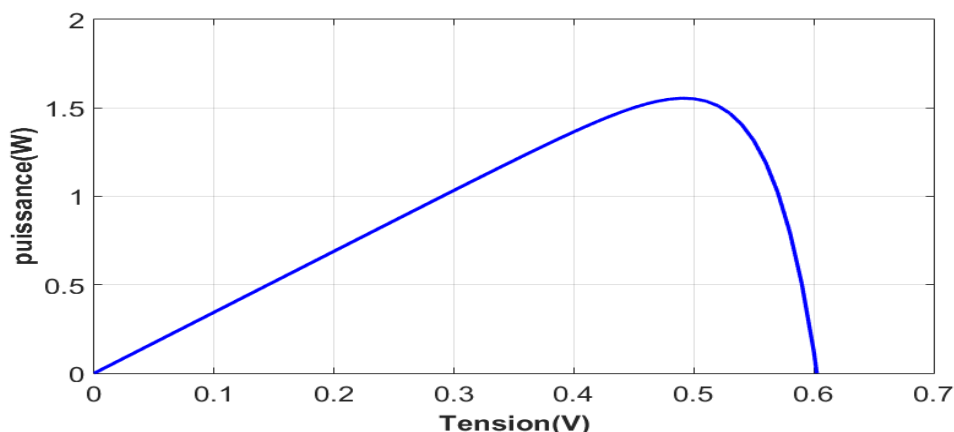
### II.3.2.1 Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule PV du SM55

On utilise l'expression II.7 pour tracer les caractéristiques (I-V) et puissance tension (P-V) de la cellule dans les conditions standards ( $G = 1000w/m^2$ ,  $= 25^{\circ}C$ ), On obtient les figures (II.10) et (II.11).



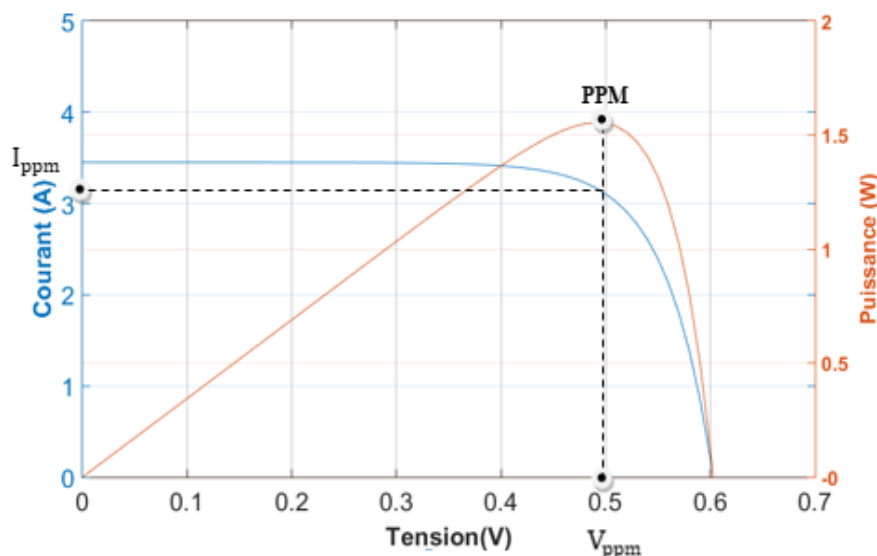
**Figure II.10 :** Caractéristique I-V d'une cellule PV.





**Figure II.11 :** Caractéristique P-V d'une cellule PV.

La figure (II.12) représente le point qui détermine le fonctionnement optimal de la cellule photovoltaïque.



**Figure I.12 :** Points critiques de fonctionnement de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards.

### Interprétation

A partir des figures (II.10), (II.11) et (II.12), il est clair que la cellule PV possède une caractéristique I-V non linéaire. La puissance de la cellule augmente progressivement avec l'augmentation de la tension jusqu'à le point de fonctionnement optimal, puis elle décroît exponentiellement avec la décroissance du courant. Trois modes de fonctionnement de la cellule photovoltaïque peuvent être distingués en regardant sa caractéristique I-V:

- **Générateur de courant :** Si sa tension est inférieure à 0.4 V, elle se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation.

- **Générateur de tension** : Si son courant ne dépasse pas 3 A, elle se comporte comme un générateur de tension  $V_{co}$  proportionnel à la température  $T$ .
- **Puissance maximale** : Dans ce point, la cellule donne la puissance maximale. Les coordonnées de ce point de puissance maximale, peuvent être estimées par les inégalités suivantes :

$$0.71V_{co} \leq V_{opt} \leq 0.78V_{co} \quad (\text{II.10})$$

$$0.78I_{cc} \leq I_{opt} \leq 0.92I_{cc} \quad (\text{II.11})$$

La puissance maximale de la cellule  $p_{max}$  peut être exprimée comme suit :

$$P_{max} = V_{opt} * I_{opt} = V_{co} \cdot I_{cc} * FF \quad (\text{II.12})$$

Avec  $FF$  représente le facteur de forme. Ce facteur mesure la qualité de la photopile et son éloignement du rectangle idéal ( $V_{co} \cdot I_{cc}$ ). Sa valeur se situe entre 0,7 et 0,8 pour une photopile cristalline et diminue avec l'augmentation de la température.

Les paramètres  $P_{max}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$  sont donnés par le fabricant pour des conditions standards STC (Standard test conditions) qui sont : un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>, une température de 25 °C et un air de masse AM 1,5

### II.3.2.2 Influence de la température sur le GPV

Afin d'étudier l'effet du changement de la température sur le fonctionnement du GPV SM55, on fixe l'éclairement à 1000 w/m<sup>2</sup> et on varie la température comme suit : 25°C, 40°C et 50°C. Les résultats de simulation sont montrés par la figure (II.13)

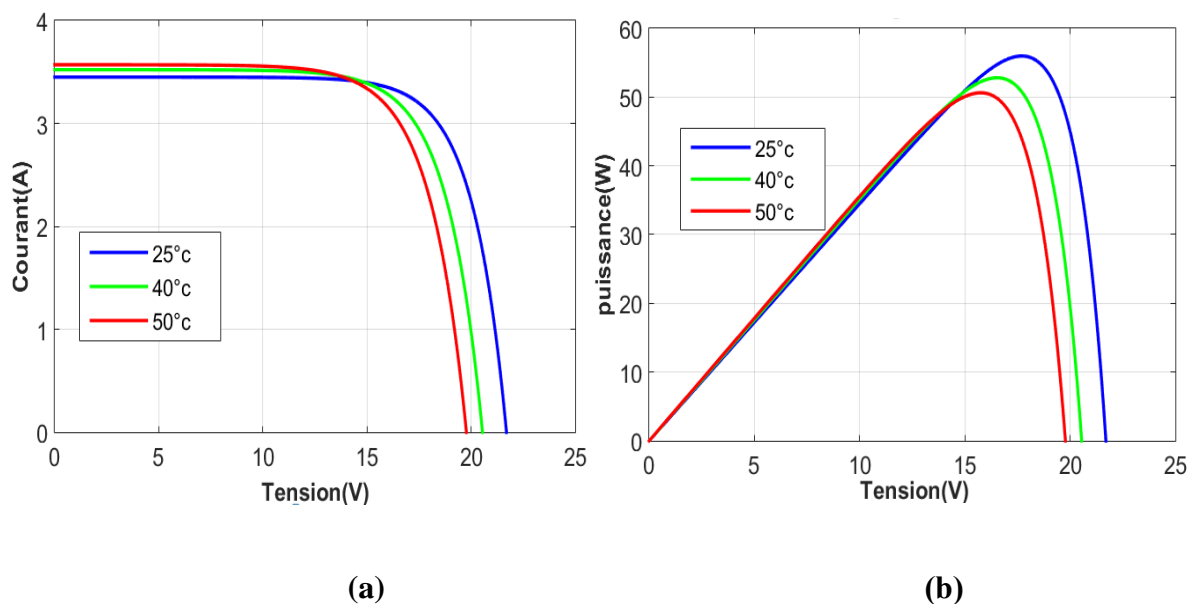


Figure II.13 : Simulation pour différentes valeurs de la température.

### Discussion

À partir de la figure (II.13-a), on constate que le photo-courant  $I_{ph}$  est insensible à la température, alors que la tension  $V$  diminue quand la température augmente. Et par conséquent la puissance maximale générée diminue avec l'augmentation de la température comme le montre (II.13-b).

#### II.3.2.3 Influence de l'éclairement sur le GPV

Afin d'étudier l'effet du changement de l'éclairement sur le fonctionnement du GPV SM55, on fixe la température à  $25^{\circ}\text{C}$  et on varie l'éclairement la température comme suit :  $600\text{w/m}^2$ ,  $800\text{w/m}^2$  et  $1000\text{w/m}^2$ . Les résultats de simulation sont illustrés par la figure (II.14)

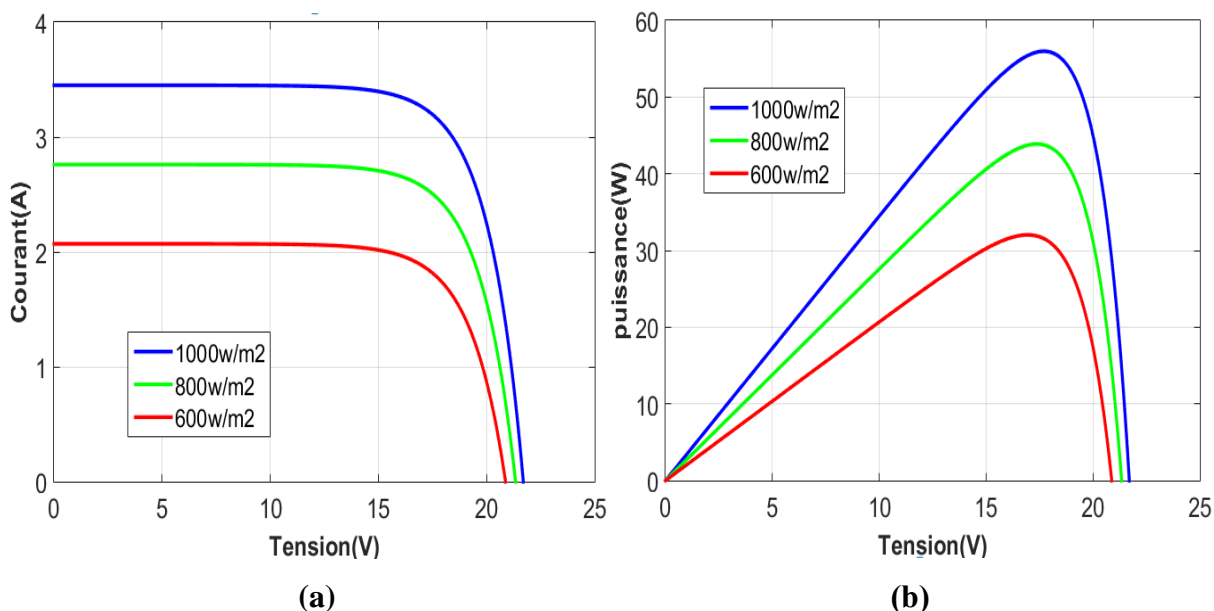


Figure II.14 : Simulation pour différentes valeurs d'éclairement.

### Discussion

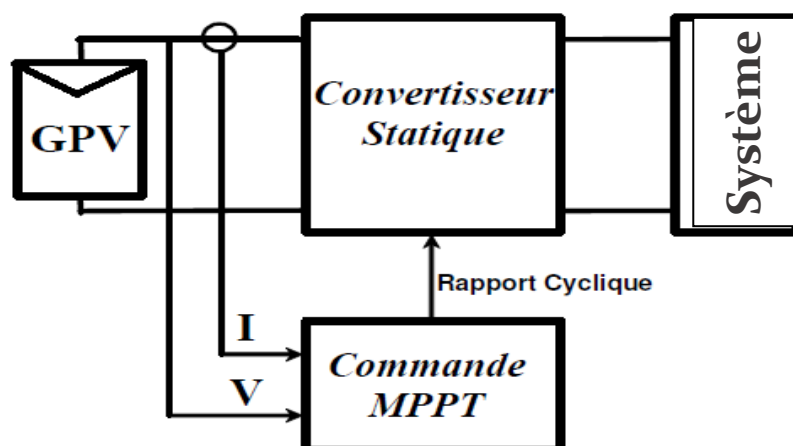
Les courbes de la figure (II.14-a) montrent que le photo-courant  $I_{ph}$  est influencé beaucoup par la variation de l'éclairement, par contre, la tension  $V$  reste presque constante. En effet, le courant est proportionnel à l'irradiation. Et par conséquent la puissance maximale générée augmente avec l'augmentation de la radiation absorbée comme le montre (II.14-b).

## II.4 Commande MPPT

### II.4.1 Principe de la commande

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure ci dessous représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et système électrique (charge, réseau ou système de pompage) de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement au système.



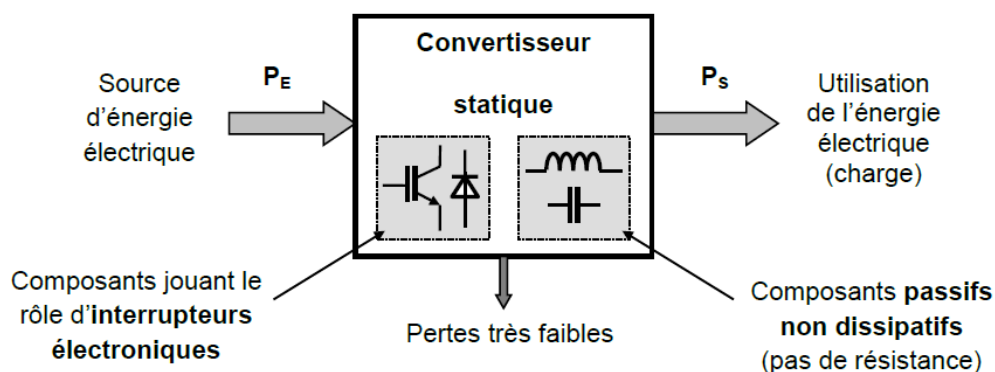
**Figure II.15:** Chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT.

La technique de contrôle consiste donc à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le point de fonctionnement du générateur à sa valeur optimale quelque soient les instabilités météorologiques ou les variations paramétriques brutales des systèmes.

### II.4.2 Convertisseur statique

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors,

thyristors etc.... les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.



**Figure II.16** : Architecture générique d'un convertisseur statique

On utilise deux types de convertisseurs dans le système photovoltaïque, le convertisseur DC/DC et le convertisseur DC/AC

#### II.4.2.1 Convertisseur DC/DC

On appelle aussi les convertisseurs DC/AC des hacheurs la tension de sortie délivrée n'est pas continue mais hachée. Son emploi devra donc être réservé à des récepteurs acceptant ces conditions et ne disposant pas de coefficients capacitifs élevés par exemple. La variation de la tension de sortie est donc réalisée uniquement sur sa valeur efficace, la valeur crête restant constante et identique à celle d'entrée. Ceci est réalisé en modifiant le rapport cyclique de la tension de sortie, la tension moyenne de sortie pouvant alors évoluer de 0 à 100% de son maximum. La variation de la tension de sortie est directement proportionnelle au rapport cyclique et pourcentage de conduction du hacheur, le croquis suivant montre la forme du signal pour des rapports de 75, 50 et 25%.

Si le principe de fonctionnement de ce type de convertisseur en limite l'emploi à quelques applications de variation de puissance (moteurs, éclairage, chauffage ....) son intérêt réside outre sa conception simpliste et son faible cout de mise en œuvre dans son rendement excellent.

#### II.4.2.2 Convertisseur DC/AC

On appelle aussi les convertisseurs DC/AC des Onduleurs, ils sont des circuits statiques qui transforment une puissance électrique sous forme continue en une puissance sous forme

alternative, à une valeur désirée de tension ou du courant et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur à une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée. [23]

Parmi les critères de sélection d'un bon Onduleur :

- ❖ La précision de la tension de sortie
- ❖ La résistance aux surcharges et au courant réactif
- ❖ Le rendement

### **II.4.3 Méthode de conception de la commande MPPT**

Plusieurs méthodes ont été développées ces dernières années pour réaliser la commande MPPT. Ces méthodes sont classées en deux variantes : directe et indirectes.

#### **II.4.3.1 Méthodes indirectes (Méthodes Offline)**

Les méthodes indirectes sont basées sur la connaissance de la caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque, qui n'est pas disponible avec précision. Ces méthodes ont besoin aussi de mesurer l'ensoleillement et la température du générateur photovoltaïque, puis consulter la courbe de puissance pour avoir le courant (ou la tension) de fonctionnement optimal(e) correspondant(e). Ensuite, le courant (ou la tension) mesuré(e) du générateur est comparé(e) aux valeurs optimales stockées dans le système de commande selon des conditions atmosphériques mesurées. Après, la commande est appliquée pour atteindre la valeur optimale de la puissance [24]. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- ❖ La méthode d'ajustement de courbe,
- ❖ La méthode « look-up table »,
- ❖ La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur,
- ❖ La méthode de court-circuit

#### **II.4.3.2 Méthodes directes (méthode Online)**

Les méthodes directes sont des algorithmes itératifs effectuant la recherche de la valeur optimale de  $V_{pv}$  pour que le GPV fournisse sa puissance maximale. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas la connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Dans la littérature, Il existe beaucoup des algorithmes MPPT tels que : la méthode de perturbation et observation (P&O), l'incrémentation de l'inductance (Inc-Cond), Hill Climbing...etc.

### a) Méthode de perturbation et observation (P&O)

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique ( $\alpha$ ). En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k - 1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, 'PMP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'PMP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [25]. Les figures (II.17) et (II.18) montrent en détail ce principe.

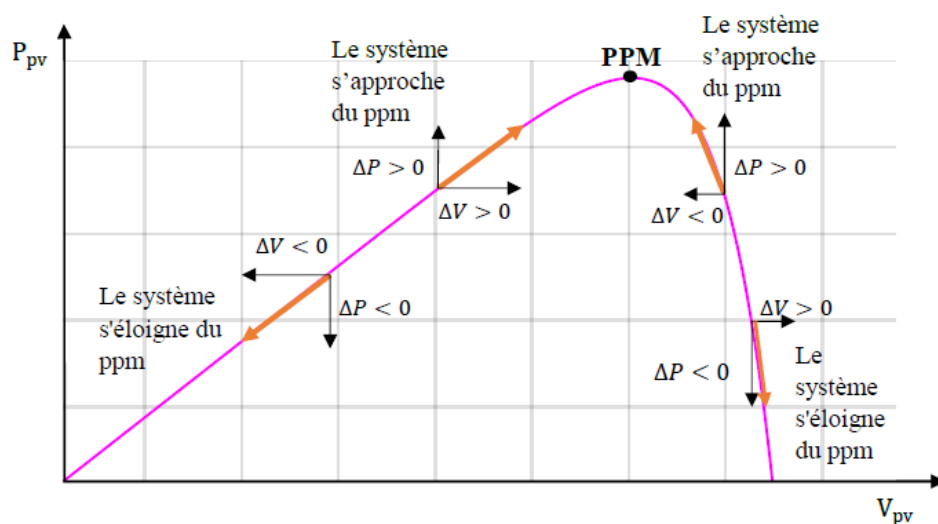
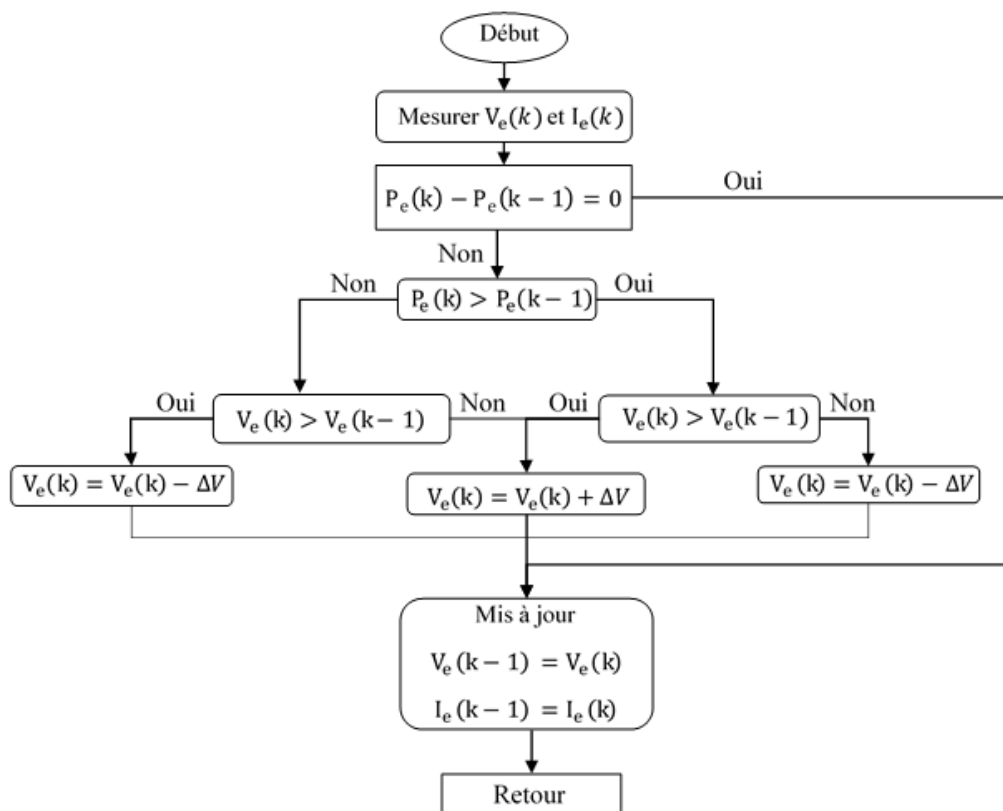


Figure II.17 : Principe de la méthode perturbation et observation.



**Figure II.18 :** Organigramme de la méthode perturbation et observation.

### b) Méthode IncCond

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G = I/V$  et sur l'incrément de la conductance ( $dG$ ) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'PMP'. Si l'incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l'opposé de la conductance ( $-G$ ), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'PMP' [26]. Son principe est montré dans les figures (II.19) et (II.20)



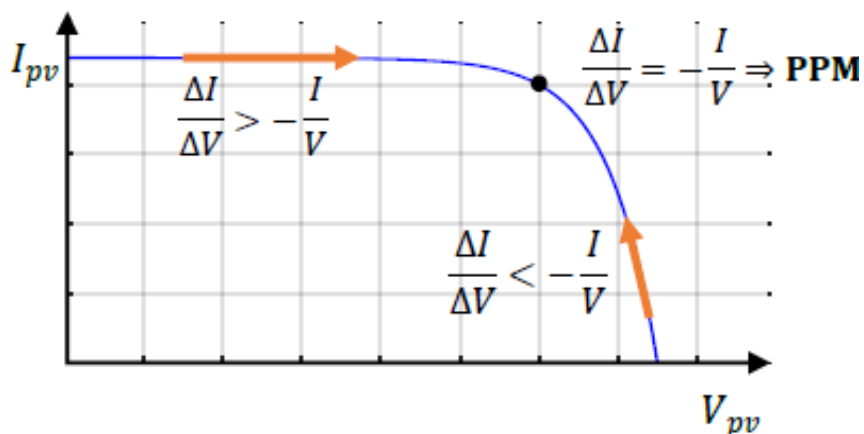


Figure II.19: Principe de la méthode Inc-Cond.

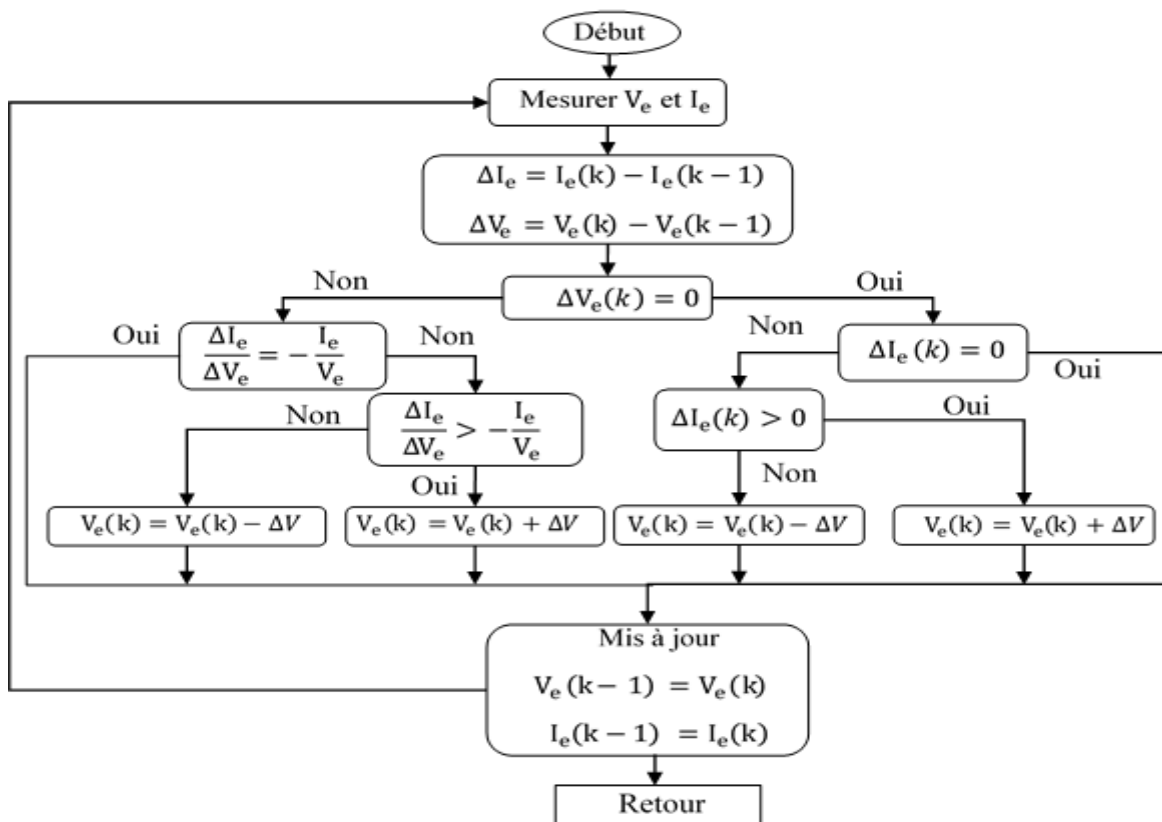


Figure II.20: Organigramme de la méthode IncCond.

## **II.5 Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre on a présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en énergie électrique à partir de l'effet photoélectrique. L'élément de base des systèmes PV est la cellule qui constitué généralement des matériaux semi-conducteurs. L'association de plusieurs cellules en série, parallèle ou série/parallèle permet d'augmenter la puissance générée du panneau photovoltaïque. Pour assurer un fonctionnement du GPV autour de son point de puissance maximale, l'introduction des convertisseurs statiques et l'utilisation des algorithmes MPPT s'avère nécessaire.

# Chapitre III : Commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage PV

---

---

## III.1. Introduction

La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne...) est l'étape la plus efficace vers une société durable et respectueuse de l'environnement. L'utilisation du photovoltaïque comme source d'énergie pour le pompage est considérée comme l'un des domaines d'application PV les plus prometteurs. L'efficacité du système de pompage PV dépend notamment de l'ensoleillement solaire et la température ambiante. Pour assurer l'efficacité du PV, le système doit fonctionner au MPP. Nombreux algorithmes MPPT sont proposés dont le principe de base est de contrôler le convertisseur de commutation afin d'obtenir la puissance maximale sous différentes conditions.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un algorithme MPPT basé sur la technique du mode glissant classique pour commander un système de pompage PV à base d'un moteur à courant continu. On commence par donner les types et les composants des systèmes de pompage photovoltaïque. Ensuite, on présente les notions de base de la commande par mode glissant et la modélisation mathématique du système de pompage PV étudié. Par la suite, on synthétise un contrôleur par mode glissant d'ordre un pour assurer un fonctionnement optimal du système de pompage PV. En fin, on simule la stratégie de contrôle présentée, sous l'environnement Matlab, sous différentes conditions climatiques.

## III.2. Types de systèmes de pompage photovoltaïque

Selon le mode de fonctionnement de l'installation, on distingue deux types de systèmes de pompage photovoltaïques : Pompage avec batterie et pompage au fil du soleil.

### III.2.1. Pompage avec batterie

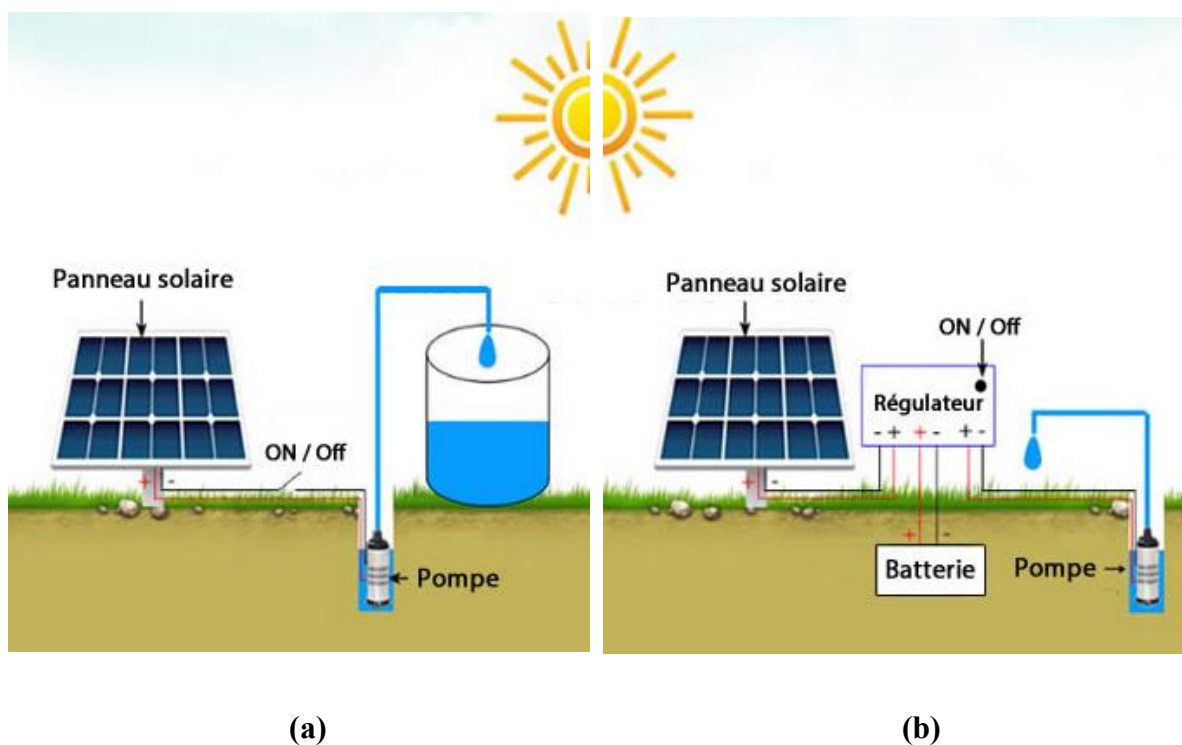
Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où

---

nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Cependant, le stockage en photovoltaïque apparaît actuellement comme le maillon faible et le plus coûteux. Lorsqu'un stockage de l'eau avec un réservoir n'est pas possible, l'installation de pompage photovoltaïque peut fonctionner sur batteries comme le montre la figure (III.1-a) [31].

### III.2.2. Pompage au fil du soleil

Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plupart des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au 'fil du soleil' où le moteur d'entraînement est directement couplé au générateur sans stockage d'énergie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol comme illustré par la figure (III.1-b). Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable, moins coûteux qu'un système avec batterie [32].



**Figure III.1:** Système de pompage photovoltaïque : (a) avec batterie, (b) : sans batterie.

### III.3. Composants d'un système de pompage photovoltaïque

En général, un système de pompage de l'eau, montré par la figure (III.2), est constitué des composants suivants :

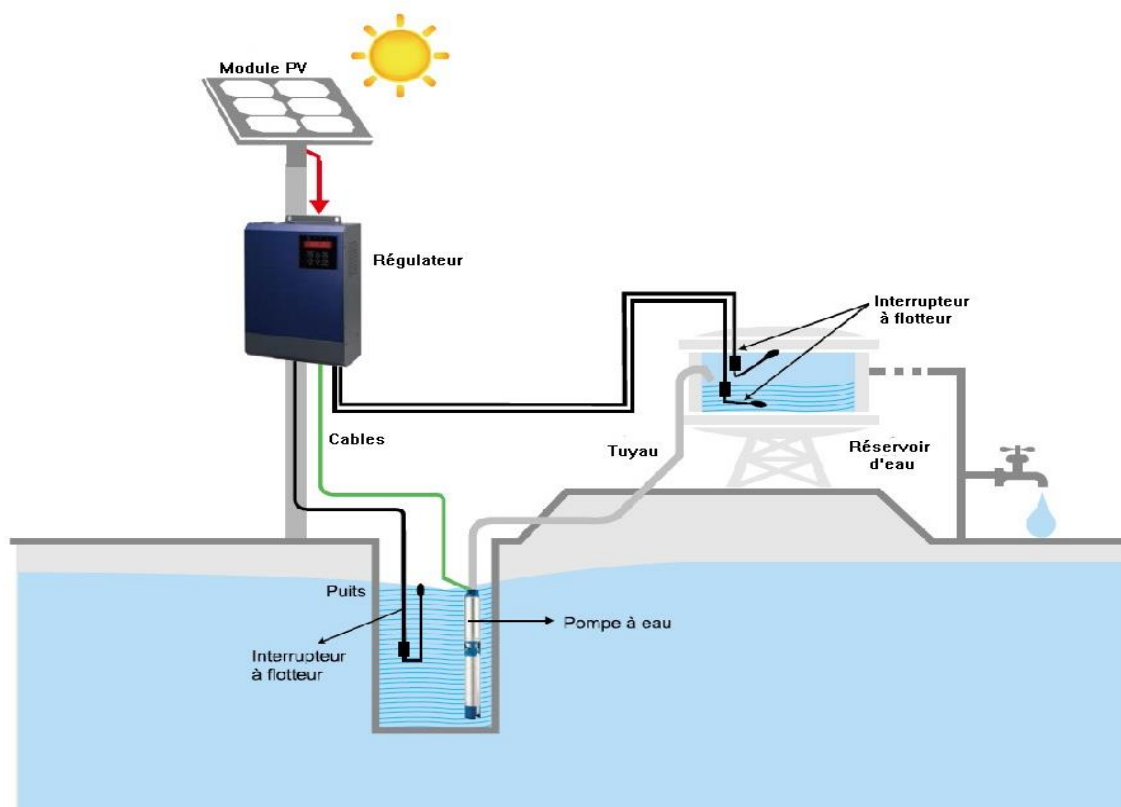
- ❖ Un générateur photovoltaïque pour produire l'énergie électrique.
- ❖ Un équipement électronique de puissance (système de commutation, onduleur, hacheur ...etc.) pour contrôler la conversion de l'énergie électrique.
- ❖ Un groupe motopompe immergé, constitué de l'association d'un moteur électrique d'induction et d'une pompe, pour relever l'eau du puits vers le réservoir.
- ❖ Un câblage électrique à travers duquel circule l'énergie depuis le générateur jusqu'au moteur, et qui incorpore des fonctions de contrôle et de sécurité
- ❖ Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau depuis la source, normalement un puits, jusqu'aux points de distribution et qui, à son tour, est constitué par quatre éléments :
  - La source d'eau
  - La conduction entre la source et l'entrée du réservoir de stockage
  - Le réservoir
  - La conduction entre le réservoir et les points de distribution.

Dans cette définition, nous entendons par conduction l'ensemble des tuyaux, des dispositifs de mesure, et de l'interface avec l'utilisateur : robinets, sources, ...etc.

- ❖ Un système de potabilisation de l'eau, là où les conditions sanitaires le rendent nécessaire.
- ❖ Autres éléments peuvent être associés à ce système, et qui dépendent de sa technique de conception, avec stockage ou sans stockage.

#### **III.4. Commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage PV**

Dans cette section, on présente une commande par mode glissant d'ordre un appliqué à un système de pompage PV dont l'objectif de forcer le générateur à générer sa puissance maximale dans des conditions météorologiques différentes.



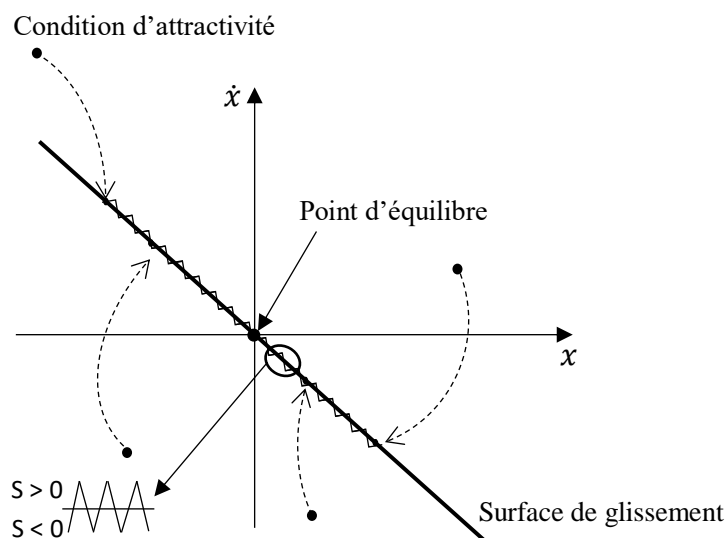
**Figure III.2:** Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.

### III.4.1. Concepts de base de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant est l'une des techniques de commandes non linéaires, largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en oeuvre et à sa robustesse vis-à-vis des incertitudes et des perturbations externes.

#### III.4.2.1. Principe de la commande par mode glissant

Le principe de la commande par mode glissant consiste à contraindre l'état du système à rejoindre une surface de glissement désirée à partir de n'importe quel point dans le plan de phase. Une fois la surface atteinte, le système glisse le long de cette surface jusqu'à le point d'équilibre comme le montre la figure (III.3).



**Figure III.3 :** Plans de phase en mode glissant.

Dans la théorie de contrôle par mode glissant, la dynamique du système a deux modes séquentiels :

- **Mode de convergence** (reaching mode) : Correspond à la période du temps pendant laquelle les trajectoires d'état du système se déplacent vers la surface de glissement. Durant cette phase, le système reste sensible aux variations des paramètres.
- **Mode de glissement** (sliding mode) : Dans ce mode, les trajectoires d'état restent sur la surface de glissement, et le comportement du système est entièrement déterminé par le choix de la surface de glissement.

#### III.4.2.2. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant

Il est reconnu que la robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle présente le point fort d'une commande par mode de glissement. Contrairement à une loi de commande classique, les performances dynamiques sont maintenues quelles que soient les variations des paramètres et quelle que soit l'amplitude des perturbations appliquées au système.

De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande donc il permet de simplifier la complexité du système.

Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

- Un phénomène de chattering où broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.
- Le système est soumis à chaque instant à une commande à fréquence élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré et ceci n'est pas souhaitable.

### III.4.2.3. Synthèse de la loi de commande par mode glissant d'ordre un

Considérons le système non linéaire suivant :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u \quad (\text{III. 1})$$

Où  $x(t)$  est l'état du système,  $u$  est l'entrée de commande,  $f(x)$  et  $g(x) \neq 0$  sont des fonctions non linéaires connues.

L'objectif de commande est de forcer la sortie du système  $y(t)$  à suivre une trajectoire désirée  $y_d(t)$ . La première étape pour atteindre ce but, consiste à choisir une surface de glissement, qui représente la dynamique désirée. La surface la plus simple est un hyperplan passant par l'origine de l'espace d'état. Une formule générale pour déterminer la surface de glissement est donnée comme suit [33] :

$$s(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (\text{III. 2})$$

Où :

- $e(x) = y - y_d$  : représente l'erreur de poursuite.
- $\lambda$  : est une constante positive représentant la pente de glissement.
- $n$  : degré relatif, égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour que le système rejoigne cette surface, une condition nécessaire, appelée condition d'attractivité, doit être vérifiée, et elle est donnée comme suit :

$$s\dot{s} < 0 \quad (\text{III. 3})$$

Cependant, l'inégalité précédente n'est pas suffisante pour assurer une convergence en temps fini vers la surface. Pour cela, cette condition est généralement remplacée par la condition,



dite condition de  $\eta$ -attractivité, suivante [34] :

$$s\dot{s} < -\eta|s|, \quad \eta > 0 \quad (\text{III.4})$$

La condition (III.4) assure une convergence en temps fini ( $t_s \leq \frac{|s(0)|}{\eta}$ ) vers la surface  $s(t, x) = 0$ .

L'étape suivante est la conception de la loi de commande. Selon la méthode équivalente, la loi de commande est composée de deux composantes (une discontinue et l'autre continue) comme suit :

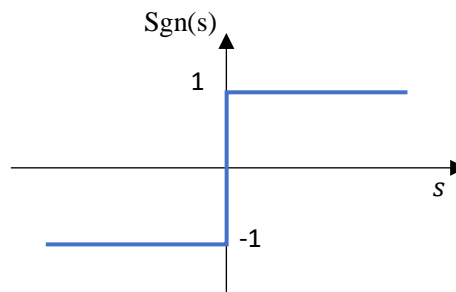
$$u = u_{sw} + u_{eq} \quad (\text{III.5})$$

La composante discontinue  $u_{sw}$  de la commande permet de ramener les trajectoires vers la surface de glissement, et d'assurer la robustesse vis à vis des incertitudes et des perturbations externes. Sa formule mathématique est donnée comme suit :

$$u_{sw} = -K \left( \frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \text{sgn}(s) \quad (\text{III.6})$$

Où :

- $K$  : une constante positive,
- $\text{sgn}$  : la fonction discontinue (signe) montrée par la figure suivante :



**Figure III.4 :** Fonction signe.

Une fois le système atteint la surface de glissement, vient maintenant le rôle de la commande

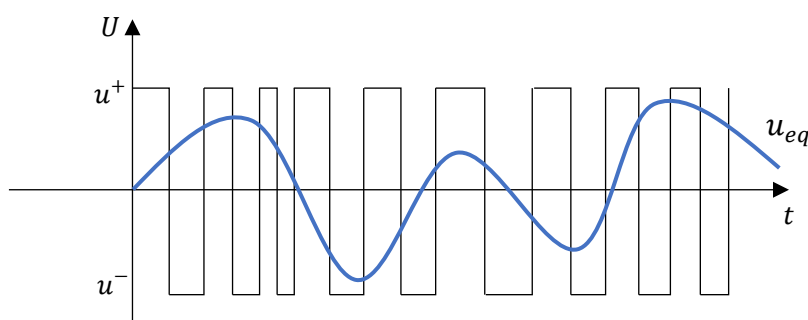
équivalente  $u_{eq}$ , qui maintient le système le long sur cette surface. Cette commande équivalente est obtenue grâce aux conditions d'invariance suivantes [33] :

$$s = \dot{s} = \left( \frac{\partial s}{\partial x} \right) (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0 \quad (\text{III.7})$$

D'après l'équation III.7, on peut définir la commande équivalente comme suit :

$$u_{eq} = - \left( \left( \frac{\partial s}{\partial x} \right)^T g(x) \right)^{-1} \left( \left( \frac{\partial s}{\partial x} \right)^T f(x) + \frac{\partial s}{\partial t} \right) \quad (\text{III.8})$$

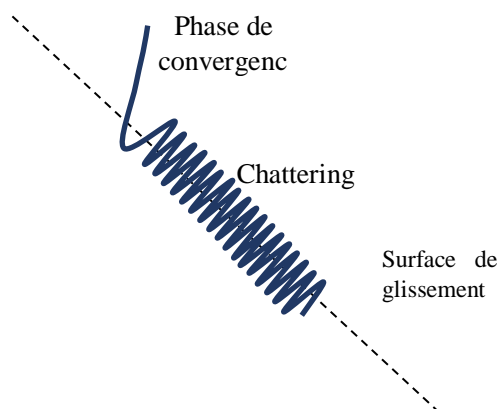
La commande équivalente peut être interpréter comme la valeur moyenne de la commande lors de la commutation rapide entre  $u^+$  et  $u^-$  comme le montre la figure (III.5).



**Figure III.5 :** Commande équivalente.

#### III.3.2.4 Phénomène du broutement

Le phénomène de broutement (ou réticence ou en anglais chattering) est entraîné par le terme discontinu  $u_{sw}$  de la commande par mode glissant qui excite de fortes oscillations autour de la surface et le signal de commande (voir la figure (III.6)). En effet, le terme discontinu ne s'applique effectivement au moment où le système quitte la surface à cause du retard de la mesure de la sortie. Ce retard peut être amplifié si le système présente naturellement des retards ou des dynamiques négligées. Une autre cause de chattering, notamment sur la commande, est le bruit de mesure.



**Figure III.6.** Phénomène de broutement.

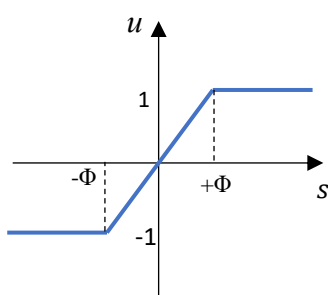
Ce phénomène est indésirable car, même s'il est filtré à la sortie du processus, il peut exciter des modes haute fréquence non modulés, ce qui dégrade les performances du système et peut même conduire à une instabilité. Le broutement de la commande entraîne également une usure importante des actionneurs ou de certaines parties du système, et des pertes de chaleur importantes dans les circuits électriques.

Nombreuses procédures ont été conçues pour réduire ou éliminer ces broutements. Parmi ces solutions, on cite :

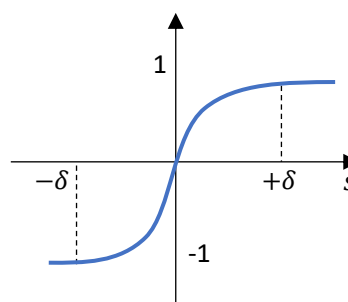
❖ La proposition de Slotine (ou la couche limite) [35] qui consiste à remplacer la fonction *signe(.)* par des approximations continues comme les fonctions : saturation  $\mathit{sat}(s/\Phi)$ , tangente hyperbolique  $\mathit{tanh}(s/\varepsilon)$  ..., etc.

$$\mathit{sat}(s/\Phi) = \begin{cases} s/\Phi & \text{si } |s| \leq \Phi \\ \mathit{sgn}(s) & \text{autre} \end{cases}$$

$$\mathit{tanh}(s/\varepsilon) = \begin{cases} \mathit{tanh}(s) & \text{si } |s| \leq \delta \\ \mathit{sgn}(s) & \text{sinon} \end{cases}$$



**Figure III.7 :** Fonction sat.



**Figure III.8 :** Fonction tanh.

- ❖ Une autre solution consiste à remplacer le mode glissant d'ordre un «  $s = 0$  » par le mode glissant d'ordre supérieur «  $s = s^{(1)} = \dots = s^{(n)} = 0$  » où  $n$  est l'ordre du mode glissant.
- ❖ Une autre méthode pour réduire le chattering, consiste à remplacer la composante discontinue ( $u_{sw}$ ) par un régulateur PI flou.

$$u_{sw} = k_p s + k_i \int s dt \quad (\text{III.9})$$

Où :  $s = \theta_p^T \delta(z)$ ,  $\theta_p = [k_p, k_i]^T$  est le vecteur des paramètres ajustables,  $\delta(z)$  est le vecteur des fonctions floues de base avec  $z = [z_1, z_2]^T$ , telle que  $z_1 = s$  et  $\dot{z}_2 = s$ .

### III.4.2. Modélisation mathématique du système de pompage photovoltaïque

Le système de pompage PV étudié dans ce mémoire, illustré à la Figure (III.9), est composé d'un générateur PV, d'un convertisseur DC / DC, d'un moteur DC et d'une pompe centrifuge. Le MPPT est assuré par l'unité de contrôle à travers le cycle de service DC / DC.

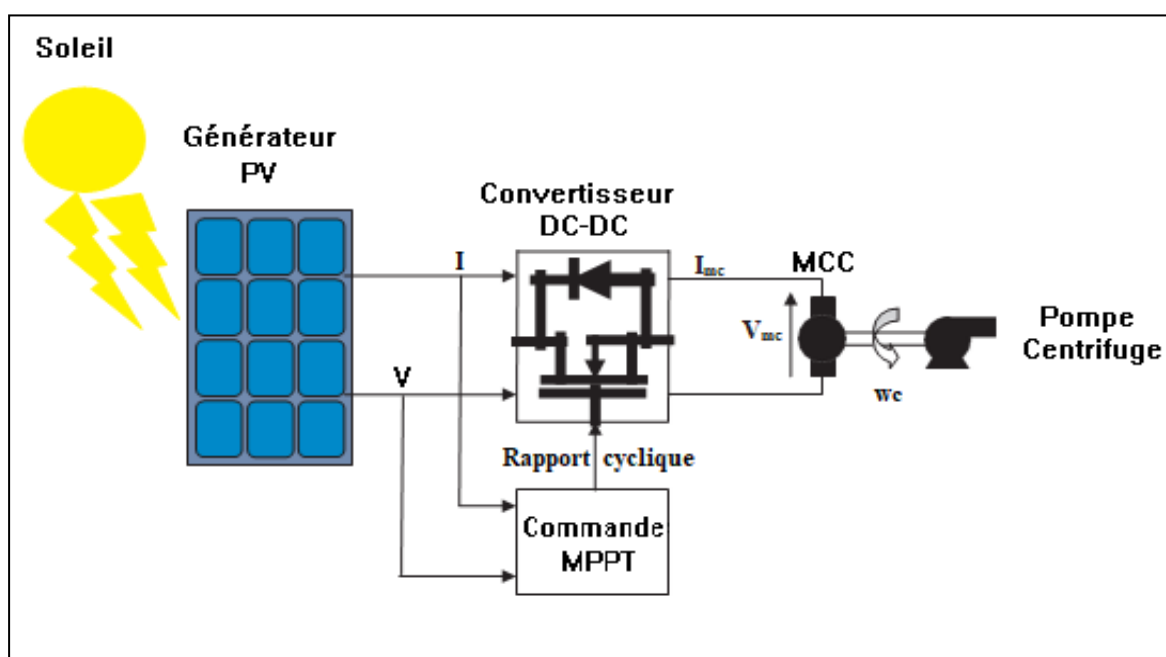


Figure III.9: Schéma fonctionnel du système de pompage PV.

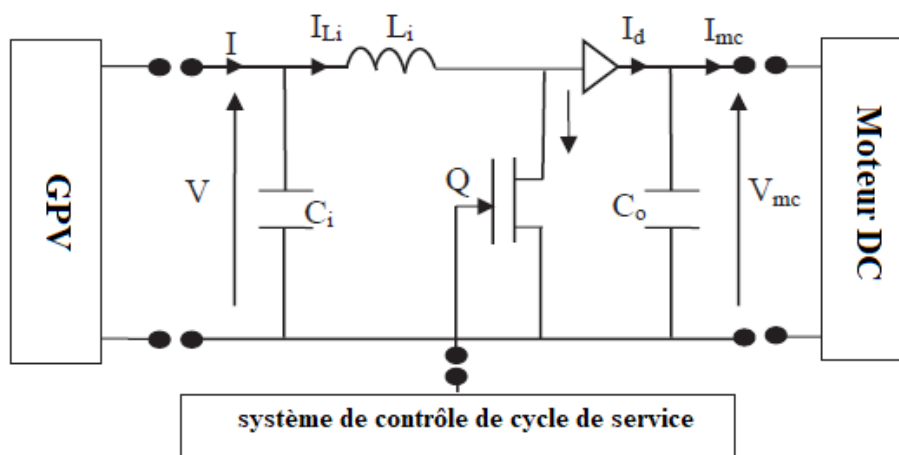
### III.4.2.1. Modèle du générateur photovoltaïque

L'énergie produite par une seule cellule est insuffisante pour faire fonctionner un tel système de pompage, alors, beaucoup de cellules sont connectées ensemble en série et en parallèle dans le GPV pour obtenir une puissance capable de faire fonctionner le groupe motopompe aux conditions nominales, Dans ce travail, on a connecté plusieurs modules PV **SM55**, vue dans le deuxième chapitre, 20 en série et 5 en parallèle. Le modèle mathématique prise du module PV est donné dans le deuxième chapitre par l'équation II.9.

### III.4.2.2. Modèle du convertisseur DC/DC

Dans ce système de pompage PV, on a utilisé un convertisseur DC-DC de type Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, qui est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. il est inséré entre le GPV et le moteur DC, afin de forcer le GPV à fonctionner au MPP.

Ce convertisseur est composé d'un filtre d'entrée  $C_i$  et  $L_i$ , d'un commutateur à transistor à effet de champ à semi-conducteur à oxyde métallique (MOSFET), d'une diode et d'un filtre de sortie  $C_o$ , comme indiqué sur la figure (III.10).



**Figure III.10 :** Schéma électrique d'un convertisseur DC-DC Boost.

La dynamique de ce fonctionnement en mode de conduction continue est donnée comme suit :

$$C_i \frac{dV}{dt} = I - I_{Li} \quad (\text{III.10})$$

$$L_i \frac{dI_{Li}}{dt} = V - (1 - \alpha)V_{mc} \quad (\text{III.11})$$

$$C_o \frac{dV_{mc}}{dt} = (1 - \alpha)I_{Li} - I_{mc} \quad (\text{III.12})$$

où  $V$ ,  $I_e, I_{Li}, \alpha$  sont respectivement, la tension aux bornes du GPV, le courant généré par le GPV, le courant qui traverse l'inductance, le rapport cyclique.  $V_{mc}$  et  $I_{mc}$  sont la tension de sortie du Boost (ou bien la tension d'entrée du moteur) et le courant de sortie du convertisseur DC-DC (ou bien le courant d'entrée du moteur), respectivement.

### III.4.2.3. Modèle du moteur DC

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans des systèmes nécessitant des vitesses variables, tels que les systèmes de pompage solaire, où le régime du moteur varie au cours de la journée en fonction de l'irradiation et de la température. Le moteur à courant continu considéré à un flux magnétique constant. La réaction magnétique et le phénomène de commutation sont négligés.

Les équations dynamiques de groupe sont exprimées en :

$$V_{mc} = R \cdot I_{mc} + L \cdot \frac{dI_{mc}}{dt} + E_c \quad (\text{III.13})$$

Où  $E_c$  est la force contre électromécanique donnée par :

$$E_c = K_e \cdot \omega_c \quad (\text{III.14})$$

Avec :

- $L(H)$  : l'inductance d'enroulement de la led.
- $R(\Omega)$  : résistance du moteur.

- $k_e$  (V s / rad) : constante du couple électromécanique.
- $\omega_c$  : vitesse de rotation (rad / s).

Le couple du moteur est:

$$C_m = k_m \cdot I_{mc} \quad (\text{III.15})$$

Où  $k_m$  (N m / A) est la constante du couple électrique.

#### III.4.2.4. Modèle de la pompe

La pompe est un élément essentiel des systèmes de pompage. Dans notre travail on a utilisé une pompe centrifuge. Son couple de résistance  $C_r$  est donné par l'équation suivante :

$$C_r = k_r \cdot \omega_c^2 \quad (\text{III.16})$$

Où  $k_r$  est le coefficient de proportionnalité (Nms<sup>2</sup> / rad<sup>2</sup>).

L'équation mécanique du système est :

$$C_m - C_r = J \cdot \frac{d\omega_c}{dt} \quad (\text{III.17})$$

Où  $J$  est le moment d'inertie du groupe moteur pompe (kg/m<sup>2</sup>).

#### III.4.2.5. Modèle global du système de pompage photovoltaïque

Par la combinaison des différentes équations décrivant le système, on peut présenter le modèle global du système de pompage PV comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_n + g_n u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Où  $x_1 = \frac{dP}{dV}$  avec  $P$  la puissance fournie par le GPV,  $u = 1 - \alpha$  avec  $\alpha$  est le rapport cyclique du Boost,  $f_n$  et  $g_n$  sont des fonctions connues.

Par l'utilisation de l'expression de la puissance  $P = I \cdot V$ , la variable  $x_1$  peut être réécrite comme suit :

$$x_1 = \frac{d(V.I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{III.21})$$

Les expressions mathématiques des fonctions  $f_n$  et  $g_n$  sont données comme suit :

$$f_n = \left( 3 \cdot \frac{d^2 I}{dV^2} + V \cdot \frac{d^3 I}{dV^3} \right) \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 + \left( 2 \cdot \frac{dI}{dV} + V \cdot \frac{d^2 I}{dV^2} \right) \left( \frac{I - I_{Li}}{C_i^2} \frac{dI}{dV} - \frac{1}{C_i L_i} V \right) \quad (\text{III.19})$$

$$g_n = \left( \frac{2 \frac{dI}{dV} + V \cdot \frac{d^2 I}{dV^2}}{C_i L_i} \right) V_{mc} \quad (\text{III.20})$$

#### III.4.2.6. Modèle MPPT de référence

L'objectif dans cette partie est de trouver l'expression mathématique de la sortie du système de référence, c, -à-d, déduire l'équation de la puissance maximale désirée.

Pour atteindre cet objectif, on annule la dérivée de la puissance par rapport au courant de sortie I, comme le montre l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI} (VI) = V + \frac{dV}{dI} I = 0 \quad (\text{III.23})$$

Pour simplifier le calcul de la dérivée, on considère le modèle simplifié du GPV donné par (II.9) puis on l'inverse pour obtenir la tension de sortie V comme suit :

$$V = n \cdot N_s \cdot V_t \cdot \log \left( \frac{N_p \cdot I_{ph} - I + N_p \cdot I_{sat}}{N_p \cdot I_{sat}} \right) \quad (\text{III.24})$$

On dérive la tension la tension V (III.24) par rapport au courant I, on a :

$$\frac{\partial V}{\partial I} = -n \cdot N_s \cdot V_t \frac{1}{N_p \cdot I_{ph} - I + N_p \cdot I_{sat}} \quad (\text{III.25})$$

On utilise (III.25), l'équation (III.23) devient comme suit :

$$I - (N_p \cdot I_{ph} - I + N_p \cdot I_{sat}) \log \left( \frac{N_p \cdot I_{ph} - I + N_p \cdot I_{sat}}{N_p \cdot I_{sat}} \right) = 0 \quad (\text{III.26})$$

On résout l'équation (III.26), on obtient :



$$I_{\max} = 0.909 * N_p * I_{ph} \quad (\text{III. 27})$$

$$V_{\max} = n. N_s. V_t. \log \left( \frac{N_p. I_{ph} - I_{pv\_max} + N_p. I_{sat}}{N_p. I_{sat}} \right) \quad (\text{III. 28})$$

Où  $V_{\max}$  et  $I_{\max}$  sont les valeurs de la tension et du courant, respectivement, lorsque le GPV atteint sa puissance maximale

Et par conséquent, l'équation de la puissance maximale est donnée comme suit :

$$P_{\max} = V_{\max} \cdot I_{\max} \quad (\text{III. 29})$$

#### III.4.2.7. Synthèse du contrôleur et analyse de la stabilité

Par l'utilisation du système (III.18), l'objectif de control devient à concevoir une loi de commande  $u$  par mode glissant d'ordre un de telle sorte que l'erreur  $e = x_1$  converge vers zéro en temps fini.

Pour atteindre cet objectif, on commence par définir la surface de glissement.

Le degré relatif du modèle système (III.18) est égal à 2, alors l'équation de la surface de glissement est donnée par :

$$s = \beta e + \dot{e} = \beta x_1 + x_2 \quad (\text{III.31})$$

Où :  $\beta$  est une constante positive,  $\beta > 0$ .

Par l'utilisation du principe de l'approche mode glissant, la loi de commande  $u$  est composée de deux termes  $u_{eq}$  et  $u_{sw}$  comme suit :

$$u = u_{eq} - u_{sw} \quad (\text{III.30})$$

Où  $u_{eq}$  est une entrée de contrôle équivalente qui détermine les comportements du système sur la surface de glissement, et  $u_{sw}$  est une entrée de commutation non linéaire, qui ramène l'état du système vers la surface de glissement et le maintien sur cette surface en présence de perturbations et de variations de paramètres.

On dérive la surface de glissement par rapport au temps, on obtient :

$$\dot{s} = \beta \dot{x}_1 + \dot{x}_2 = f_n + g_n u + \beta x_2 \quad (\text{III.32})$$

On met  $s = \dot{s} = 0$  (condition d'invariance), on obtient la commande équivalente suivante :

$$u_{eq} = -\frac{1}{g_n}(f_n + \beta x_2) \quad (\text{III.33})$$

Pour s'assurer une convergence exponentielle du mode glissant vers la surface de commutation en temps fini, la commande de commutation est choisie par :

$$u_{sw} = \frac{k \cdot \text{sgn}(s) + K_1 \cdot s}{g_n} \quad (\text{III.34})$$

Où  $k$  est une constante positive très petite et  $K_1$  est un paramètre de conception positif.

Donc la loi de commande devient :

$$u = -\frac{1}{g_n}(f_n + \beta x_2 + k \text{sgn}(s) + K_1 \cdot s) \quad (\text{III.35})$$

D'après (III.35) et (III.32), la dérivée de la variable glissante devient :

$$\dot{s} = -k \text{sgn}(s) - K_1 \cdot s \quad (\text{III.36})$$

Pour analyser la stabilité du système en boucle fermée, on choisit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_s = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{III.37})$$

On dérive la fonction (III.37) par rapport au temps et on utilise l'équation III.36, on a :

$$\dot{V}_s = s \cdot \dot{s} = -k|s| - K_1 \cdot s \quad (\text{III.38})$$

Et par condition la condition suivante est satisfaite :

$$\dot{s} = s[-k \text{sgn}(s)] \leq -k|s| \quad (\text{III.39})$$

D'après l'inégalité (III.39), on conclut que la surface  $s$  tend vers zéro en temps fini et par conséquent la puissance  $P$  converge vers sa puissance maximale (PPM) également en temps fini.

### III.5. Simulation et résultats

Dans cette partie, on réalise des simulations, sous l'environnement Matlab, de la commande MPPT par mode glissant présentée pour un système de pompage photovoltaïque.

Les paramètres du générateur PV sont donnés par le tableau II.1 du chapitre II.

Le paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant :

Paramètre	Nom	Valeur
$L_i$	Inductance du convertisseur	3,5 mH
$C_i$	Capacité d'entrée	4700 $\mu$ F
$C_o$	Capacité de sortie	470 $\mu$ F

**Tableau III.1** : Paramètres électriques du convertisseur Boost

Paramètres du groupe moteur DC-pompe centrifuge sont donnés par le tableau suivant :

Paramètre	Nom	Valeur
$V_{mc}$	Tension nominale moteur	400 V
$I_{mc}$	Courant nominal moteur d'entrée	12,2 A
$\omega_c$	Vitesse nominale moteur	1000 tr/min
$R$	Résistance moteur	9,84 $\Omega$
$L$	Inductance moteur	012H
$J$	Inertie totale moteur	0,03 Kg / m <sup>2</sup>
$k_e$	Constantes de couplage électromécanique	2,67 V s / rad
$k_m$	Constante de couple électrique	2,541 N m / A
$k_r$	Coefficient de proportionnalité du couple résistant	2,8.10 <sup>-2</sup> Nms <sup>2</sup> / K

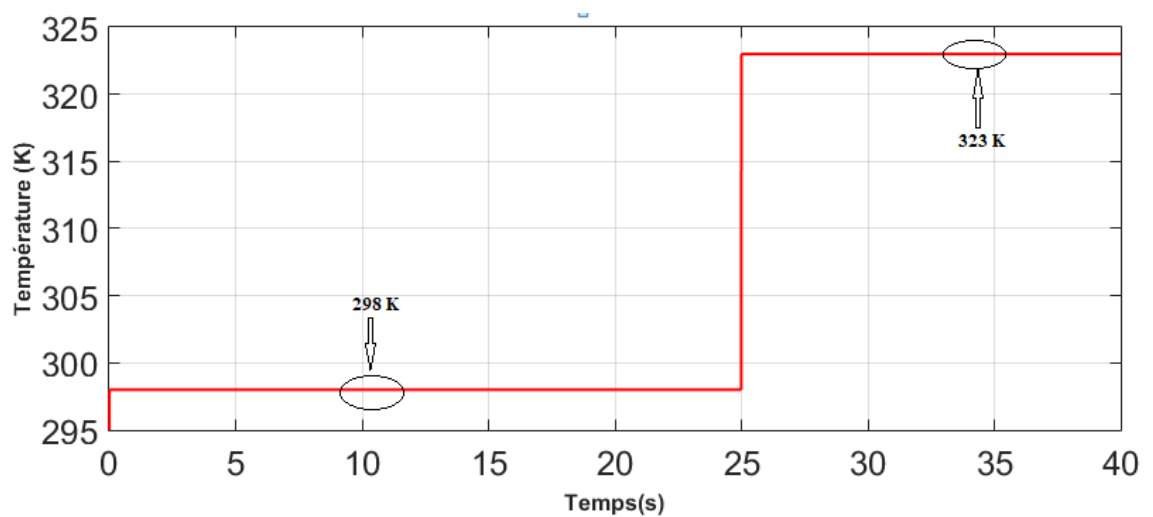
**Tableau III.2** : Paramètres électriques du moteur DC

Les paramètres du régulateur sont donnés comme suit :

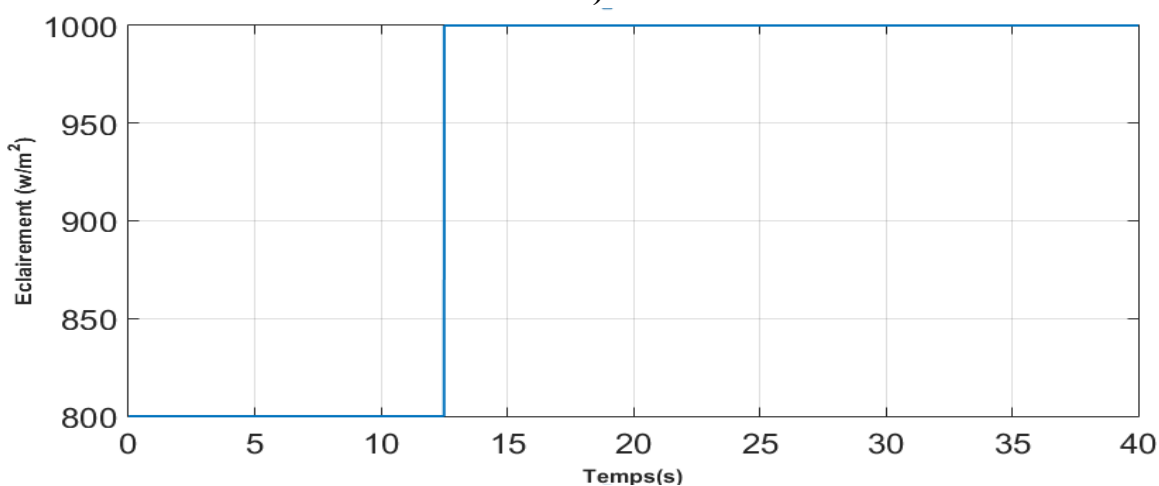
Paramètre	Valeur
$k$	0.001
$\beta$	10
$k_1$	300

**Tableau III.3** : Paramètres du régulateur.

Pour montrer l'efficacité de la stratégie de commande étudiée, on fait varier la température ambiante et l'ensoleillement solaire comme illustré par la figure (III.11).



a)



b)

**Figure III.11** : Variation de la température (a) et de l'éclairement (b).

Les résultats de simulations sont montrés par les figures suivantes :

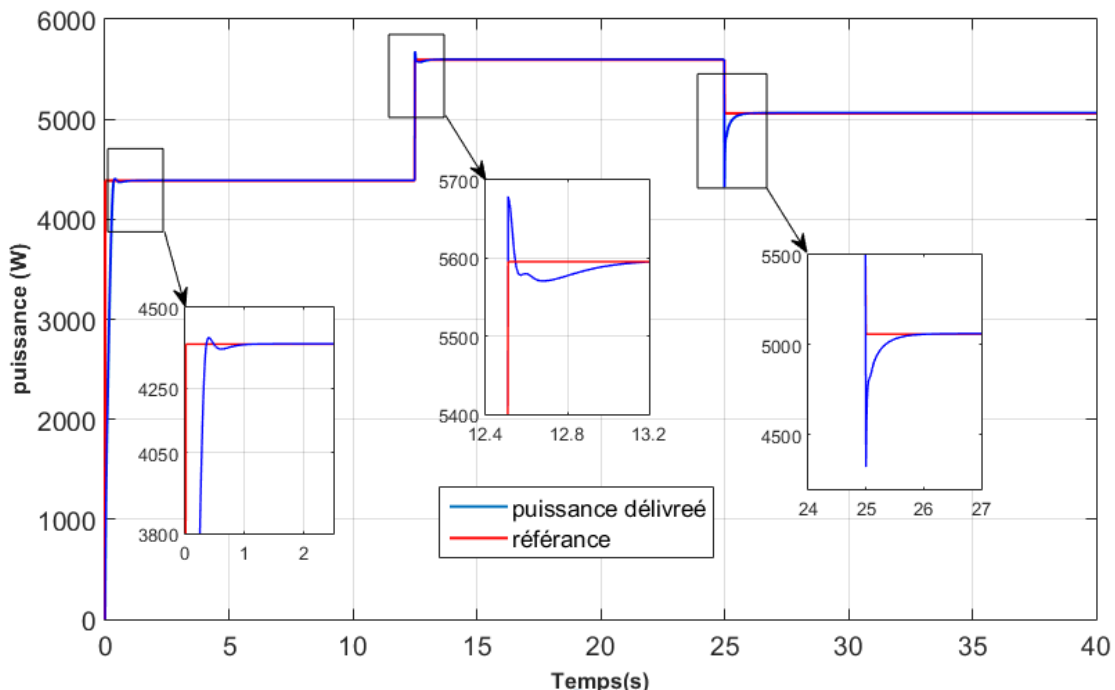


Figure III.12 : Puissance délivrée et puissance de référence.

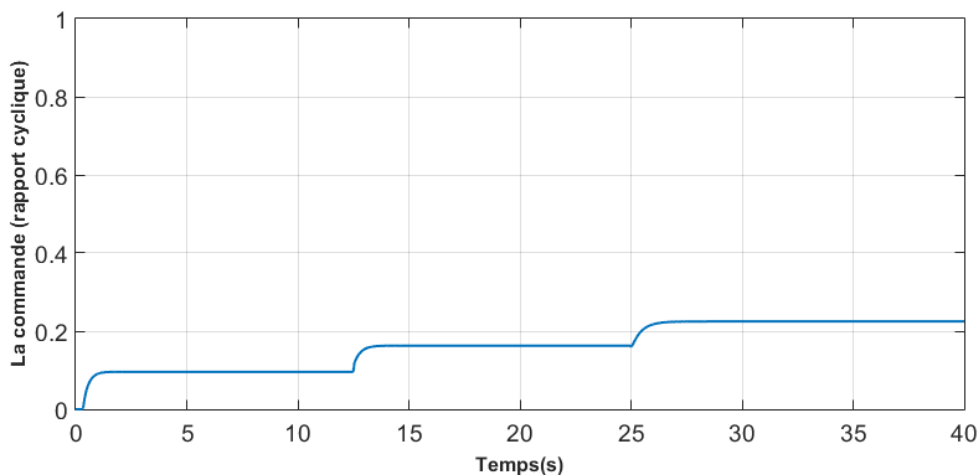


Figure III.13: Rapport cyclique ( $\alpha$ ).

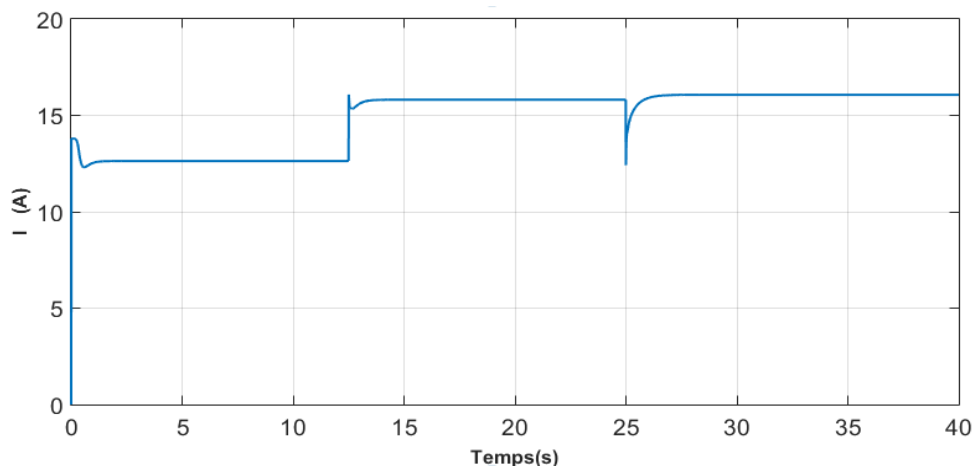


Figure III.14: Courant fourni par le générateur PV.

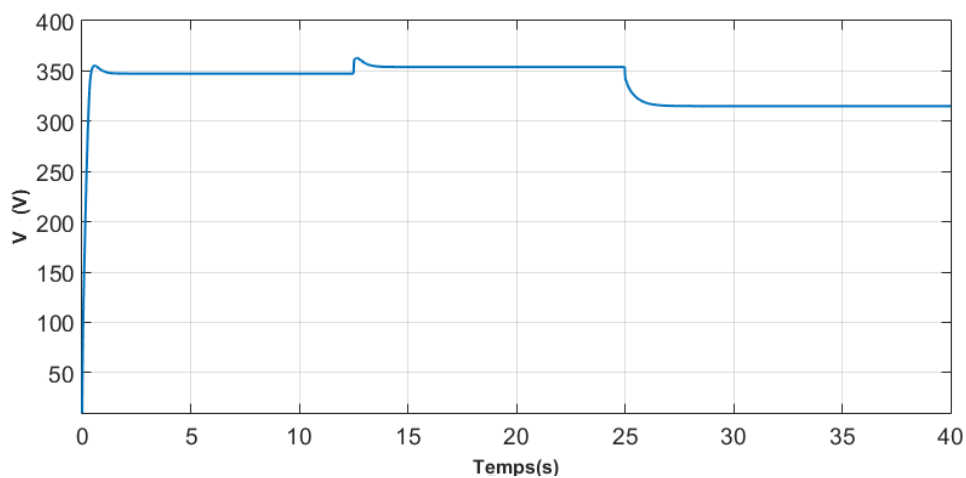


Figure III.15: Tension aux bornes du générateur PV.

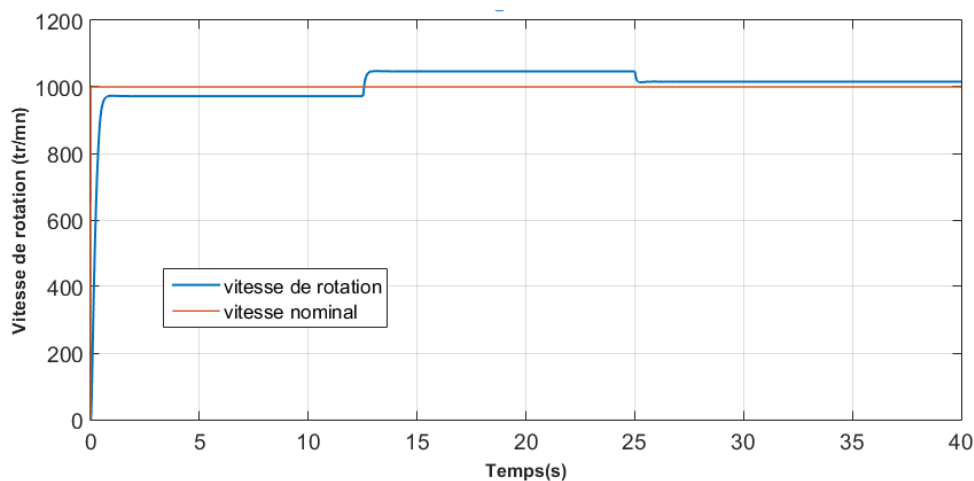
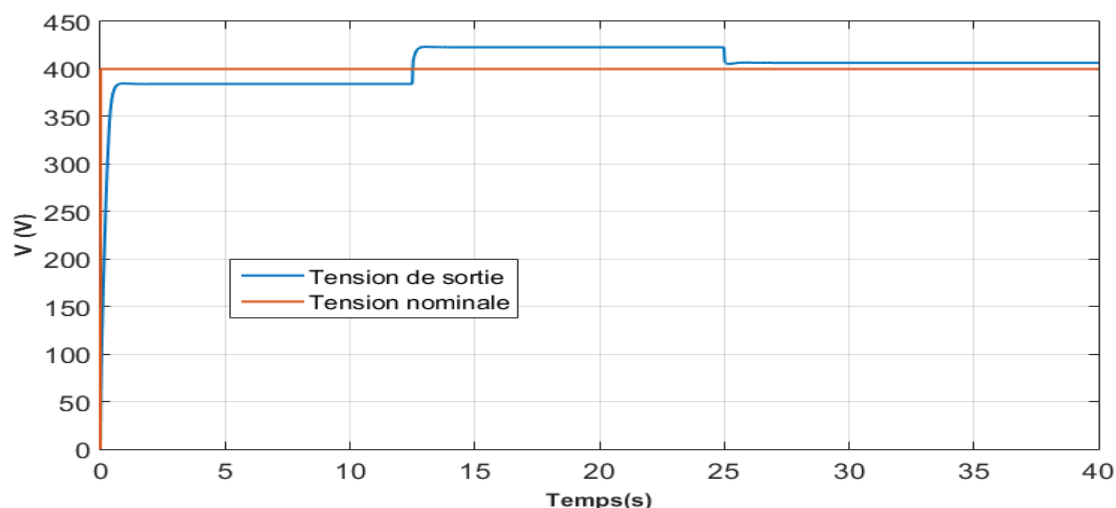


Figure III.16: Vitesse de rotation du moteur et vitesse nominale.



**Figure III.17:** Tension aux bornes du moteur et tension nominale.

### Interprétation

La figure (III.12) montre que la puissance délivrée suit rapidement la puissance de référence pour n'importe quelle valeur de température et d'éclairement. De la figure (III.13), on remarque que le rapport cyclique ( $\alpha$ ) change de valeurs mais reste toujours entre 0 et 1 :  $0 < \alpha < 1$ . Les figures (III.14) et (III.15) illustrent que le courant généré et la tension du générateur PV convergent vers ses valeurs maximales. Des figures (III.16) et (III.17), on constate que la tension et la vitesse du moteur variant autour leurs valeurs nominales, respectivement. En conséquence, on peut conclure que l'approche présentée garantit un bon fonctionnement du système de pompage PV.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la commande MPPT d'un système photovoltaïque connecté à un système de pompage, composé d'un moteur à courant continu et pompe centrifuge, via un convertisseur DC/DC de type Boost. Le principe de l'algorithme MPPT présenté consiste à proposer un contrôleur par mode glissant classique qui force le système de pompage PV à atteindre une surface de glissement linéaire d'ordre un, défini en fonction de la dérivée de la puissance délivrée par rapport à la tension de sortie du générateur, puis maintenir le système sur cette surface. Les résultats de simulation obtenus montrent les performances de l'approche présentée.

# Conclusion générale

---

---

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier le fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque à base d'un moteur à courant continu et une pompe centrifuge commandé par un algorithme MPPT par mode glissant.

Pour atteindre cet objectif, on a commencé par définir le système de pompage. Les systèmes de pompage sert à aspirer et transférer le fluide d'un point à un autre ou de relever le fluide d'un niveau inférieur vers un niveau supérieur. La plupart des systèmes de pompage se compose d'un moteur électrique (ou thermique) qui convertie l'énergie électrique (ou thermique) en une énergie mécanique de rotation et d'une pompe qui délivre une énergie fluide.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié l'énergie photovoltaïque en générale. Cette énergie est produite par des panneaux photovoltaïques grâce à l'effet PV. L'élément de base des panneaux PV est la cellule qui constitué généralement par des matériaux semi-conducteurs. Pour assurer un fonctionnement du GPV autour de son point de puissance maximale, l'introduction des convertisseurs statiques et l'utilisation des algorithmes MPPT s'avère nécessaire.

Dans le troisième chapitre, on a présenté une commande MPPT par mode glissant d'un système de pompage PV. Le principe de l'approche consiste à forcer le système de pompage à converger vers une surface de glissement linéaire d'ordre un, définit en fonction de la dérivée de la puissance délivrée par rapport à la tension de sortie du générateur, puis maintenir le système sur cette surface. Les résultats de simulation obtenus montrent les performances de l'approche présentée.

Comme perspectives envisagées, plusieurs voies sont possibles pour l'extension du présent travail :



- Commande par mode glissant des systèmes de pompage PV à base d'un moteur asynchrone.
- Commande par mode glissant des systèmes de pompage PV connectés aux réseaux

# Bibliographie

- [1] Le manuel des pompes, Principes fondamentaux de la technologie des pompes. WILO SE, Dortmund, 2016.
- [2] Dr. HENNI. MANSOUR. Z, Thermo propulsion I. chapitre III- Moteurs thermiques.
- [3] machines à courant continu: cours et problèmes, Notes de Mécanique, École Normale Supérieure de Lyon (ENS de Lyon)-Mécanique, Claude CHEVASSU, 2014.
- [4] LE MOTEUR À COURANT CONTINU, Projet de Physique P6 STPI / P6 / 2017 – 033, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN
- [5] [www.maxicours.com/se](http://www.maxicours.com/se) cours types-de-moteur-a-courant-continu
- [6] Site : [beams.ulb.ac.be/beams/teaching/elec-h.../CHAP2-ELEC-H-300.pdf](http://beams.ulb.ac.be/beams/teaching/elec-h.../CHAP2-ELEC-H-300.pdf), « Chap. 2 : Les Machines électriques – Généralités »,.
- [7] Conception et fabrication d'une pompe à engrenage, ZEMARI AICHA, mémoire de master, 2017, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
- [8] S. Belaid Lalouni « Cours énergie solaire photovoltaïque ». Destiné aux étudiants Master 2 ER, 2015.
- [21] Y. A. Ould Mohamed et al, «Étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque,»  
Revue des Energies Renouvelables, Vol 11 n°3, pp. 473-483, 2008.
- [23] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternaif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [24] T. S. Akassewa, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», thèse doctorat, Université Henri Poincaré- Nancy, 2010.
- [25] «asantys solar systems,» [En ligne]. Disponible sur: <http://www.solar-powercompany.com/>. [Accès le 23 08 20].
- [26] S. Abouda, «Contribution à la Commande des Systèmes Photovoltaïques: Application aux Systèmes Photovoltaïques», Thèse de doctorat, Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, 2015.
-

- [31] La, Merad. L. Merad. T, Boussoukaia. B, Bouyoucefa « Automatisation d'une installation solaire à base d'un microprocesseur » Article, laboratoire de matériaux et des énergies renouvelables, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2010.
- [32] : Jimmy Royer. Thomas Djiako .Eric Schiller.Bocar Sada Sy « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ».Université d'Ottawa 1998.
- [33] A. Belkaid, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome», Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, 2015.
- [34] T. S. Akassewa, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», thèse doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy, 2010.
- [35] IEA. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.iea.org/geco/electricity/>. [Accès le 29 06 2019].
- [50] A. Zenakhi, « Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2016.
- [51] D.R. Chouiter« Conception et réalisation d'une commande robuste de machine Asynchrone», Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997, 192 p.
- [52] Utkin, V.I., Feb. 1993. Sliding mode control design principles and applications to electric drives. IEEE Trans. Ind. Electron. 40, 23–36.
-

## Résumé :

---

L'objectif principale de ce travail PFE consiste à étudier le fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque à base d'un moteur à courant continu et une pompe centrifuge commandé par un algorithme MPPT par mode glissant.

Cette commande force le système de pompage à converger vers une surface de glissement linéaire d'ordre un et puis le maintenir sur cette surface pour que le système fonctionne à son PPM sous différentes conditions climatiques.

Mots clés : MPPT, PPM, PV, mode glissant

## Abstract:

---

This finale of studies project aims to study the operation of a photovoltaic pumping system based on a DC motor and a centrifugal pump controlled by an MPPT algorithm with sliding mode.

This command forces the pumping system to converge to a linear sliding surface of order one and then hold it on that surface to keep the system operating at its MPP under different weather conditions.

Keywords: MPPT, MPP, PV, sliding mode