

*République Algérienne Démocratique et populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur de la recherche scientifique*

**Université Abderrahmane MIRA de Bejaia**

**Faculté de la Technologie**

**Département de Génie Electrique**

# Mémoire de fin de cycle

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique*  
**Option : Energies Renouvelables**

## *Thème*

**Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque**

*Réalisé par :*

M<sup>r</sup> AMROUCHE Rabah

M<sup>r</sup> BEDJOU Syfax

*Encadré par :*

M<sup>me</sup> S.BELAID

M<sup>r</sup> K.IDJDARENE

Année Universities: 2015/2016

# **Remerciement**

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.*

*Nos remerciement les plus vifs et chaleureux, vont à notre promotrice M<sup>me</sup> S.BELAID, pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la patience et la compréhension qu'elle nous a toujours manifestée.*

*Nous remercions également M<sup>r</sup> K.IDJDARENE, qui nous a apporté une aide appréciable pour l'élaboration de ce travail.*

*Nous tenons aussi à remercier le président et le membre de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.*

*Toute notre l'estime à M<sup>r</sup> ABERBOUR pour son aide précieuse et son orientation.*

*A travers ce mémoire, nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour mes études, je ne les remercierai jamais assez, pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté. Que Dieu me les protège.*

*A mes sœurs, à toute ma famille.*

*A tous mes amis en particulier : Athman, Messibsa, Hacem, Khaled, Idir, Chafik.*

*A mon collègue Bedjou Syfax.*

*Et à tout ceux que je cannais.*

*Rabah*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour mes études, je ne les remercierai jamais assez, pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté. Que Dieu me les protège.*

*A mes frères et sœurs, à toute ma famille.*

*A tous mes amis en particulier : Abdellah, Karim, Lyes, Noredine, Farid, Fares, M.Ouali, Oulhadj, Idris, Idir, Chafik.*

*A mon collègue Amrouche Rabah.*

*Et à tout ceux que je cannais.*

*Syfax*

# Liste des symboles

## Liste des symboles

$C_{em}$	Couple électromagnétique (N.m)
$C_r$	Couple résistant (N.m)
$G_{stc}$	Ensoleillement de référence. ( $G_{stc} = 1000 \text{W/m}^2$ )
$G$	Ensoleillement ( $\text{W/m}^2$ )
$I_{Rsh}$	Courant passant par la résistance shunt. (A)
$I_D$	Courant de la diode. (A)
$I_{mpp}$	Courant optimum (au point de puissance maximale) (A)
$I_{ph}$	Courant produit par la photopile. (A)
$I_{pv,nouv}$	Représente la nouvelle valeur de courant. (A)
$I_{pv}$	Courant photovoltaïque. (A)
$I_{rd}, I_{rq}$	Courant rotorique direct et quadratique. (A)
$I_{sabc}, I_{rabc}$	Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique. (A)
$I_{cc}$	Le courant de court-circuit. (A)
$I_{sd}, I_{sq}$	Courant statorique direct et quadratique. (A)
$L_r, M_r$	Les inductances propres et mutuelles rotorique (H)
$\mathcal{L}_s, \mathcal{L}_r$	Inductance cyclique statorique et rotorique. (H)
$L_s, M_s$	Les inductances propres et mutuelles statorique. (H)
$\mathcal{M}$	L'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor. (H)
$P_n$	Puissance nominale du moteur asynchrone(W).
$\Omega_n$	Vitesse du moteur asynchrone (rad/s)
$R_s, R_r$	Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique. ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	Résistance shunt est due à courant de fuite ( $\Omega$ )
$T_{stc}$	Température de référence des panneaux ( $T_{stc} = 25^\circ\text{C}$ )
$T_c$	La température dans les conditions quelconques.
$V_{co}$	La tension en circuit ouvert. (V)
$V_{pv}$	Tension photovoltaïque. (V)
$V_{pv/nouv}$	Représente la nouvelle valeur de la tension après la correction. (V)
$V_{mpp}$	Tension optimale (au point de puissance maximale). (V)
$V_{sabc}, V_{rabc}$	Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique. (V)

$V_{ds}, V_{qs}$	Tension statorique direct et quadratique. (V)
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique direct et quadratique. (Wb)
$\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}$	Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique. (Wb)
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux satorique direct et quadratique. (Wb)
$\omega_s, \omega_r$	Respectivement pulsation statorique et rotorique. (rad /s)
AC	Courant alternatif
DC	Courant continu
$g$	Accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )
HMT	Hauteur manométrique totale. (m)
M	Inductance mutuelle. (H)
MPP	Point de puissance maximum
MPPT	Maximum power point tracking
P&O	Perturbation et observation
PV	Panneau photovoltaïque
$P_{pv,u}$	Puissance d'un panneau photovoltaïque (W)
$\Delta I_{pv}$	Représente la variation du courant. (A)
$\Delta T_c$	Représente la variation de la température. ( $^{\circ}C$ )
$\Delta V_{pv}$	Représente la variation de la tension. (V)
$\alpha$	Rapport cyclique
$\alpha_{cc}$	Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc}$ .
$\beta_{co}$	Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{co}$ .

# Liste des figures



## *Liste des figures*

<b>Figure I. 1 :</b> Spectre du rayonnement solaire .....	4
<b>Figure I. 2 :</b> Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale période 1992-2002 .....	5
<b>Figure I. 3 :</b> Schéma de principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	7
<b>Figure I. 4 :</b> Cellules identiques en séries .....	10
<b>Figure I. 5 :</b> Cellules identiques en parallèles.....	11
<b>Figure I. 6 :</b> La caractéristiques courant-tension et puissance-tension .....	11
<b>Figure I. 7 :</b> Système photovoltaïque autonome avec stockage .....	12
<b>Figure I. 8 :</b> Système photovoltaïque autonome sans stockage.....	13
<b>Figure I. 9 :</b> Systèmes hybrides .....	14
<b>Figure I. 10 :</b> Système photovoltaïque connectés à un réseau .....	14
<b>Figure I. 11 :</b> Principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil .....	15
<b>Figure I.12 :</b> Caractéristique du débit pour le pompage au fil du soleil .....	16
<b>Figure I. 13:</b> Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique.	16
<b>Figure I. 14 :</b> Caractéristique du débit pour le pompage avec stockage électrochimique	17
<b>Figure I. 15 :</b> Schéma des composants d'un système de pompage photovoltaïque .....	18
<b>Figure I. 16 :</b> Hacheur dévolteur (série) .....	18

<b>Figure I. 17</b> : Hacheur survolteur (parallèle) .....	19
<b>Figure I. 18</b> : Moteur à courant continu .....	20
<b>Figure I. 19</b> : Moteur synchrone .....	21
<b>Figure I. 20</b> : Moteur asynchrone .....	22
<b>Figure I. 21</b> : Pompe centrifuge .....	24
<b>Figure I. 22</b> : Caractéristique d'une pompe centrifuge.....	24
<b>Figure I. 23</b> : Pompe volumétrique .....	25
<b>Figure I. 24</b> : Caractéristique pompe volumétrique.....	26
<b>Figure II.1</b> : Modèle à une diode d'un module photovoltaïque.....	28
<b>Figure II.2</b> : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ à $T=25^{\circ}C$ .....	31
<b>Figure II.3</b> : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ à $T=25^{\circ}C$ .....	32
<b>Figure II.4</b> : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ à $G=1000W/m^2$ . .....	32
<b>Figure II.5</b> : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ à $G=1000W/m^2$ .....	33
<b>Figure II.6</b> : Schéma d'un Hacheur parallèle .....	33
<b>Figure II.7</b> : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	35
<b>Figure II.8</b> : Représentation schématique des enroulements de la MAS .....	37
<b>Figure II.9</b> : Représentation des axes de la machine .....	41

<b>Figure III.1 : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal</b>	
Du site de Bejaïa de 1998 à 2007 -----	45
<b>Figure III.2 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec la commande MPPT.</b>	48
<b>Figure III.3 : Organigramme de l’algorithme P&amp;O (<math>C_p</math> est la largeur du pas de perturbation).</b> -----	49
<b>Figure III.4: Illustration de la bande de courant à hystérésis</b> -----	51
<b>Figure III.5 : Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.</b> -----	55
<b>Figure III.6 : Schéma bloc du réglage de flux par un PI.</b> -----	56
<b>Figure III.7: différents modes de convergence pour la trajectoire d’état</b> -----	57
<b>Figure III.8 : Le phénomène de broutement</b> -----	61
<b>Figure III.9 : Fonction saturation.</b> -----	62
<b>Figure IV.1 : Schéma globale du système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande vectorielle.</b> -----	67
<b>Figure IV.2 : Schéma global du système de pompage photovoltaïque contrôlé par le mode glissant.</b> -----	68
<b>Figure IV.3 : L’évolution de la puissance (<math>G=1000w/m^2, T_c=25^\circ C</math>).</b> -----	69
<b>Figure IV.4 : L’évolution de la vitesse (<math>G=1000w/m^2, T_c=25^\circ C</math>).</b> -----	69
<b>Figure IV.5 : Zoom sur l’évolution de la vitesse (<math>G=1000w/m^2, T_c=25^\circ C</math>).</b> -----	70
<b>Figure IV.6 : L’évolution de flux (<math>G=1000w/m^2, T_c=25^\circ C</math>).</b> -----	70
<b>Figure IV.7 : L’évolution de l’irradiation.</b> -----	71

<b>Figure IV.8:</b> L'évolution de la température. ....	71
<b>Figure IV.9 :</b> L'évolution de la puissance. ....	72
<b>Figure IV.10 :</b> L'évolution de courant $I_{pv}$ (A). ....	72
<b>Figure IV.11 :</b> L'évolution de la tension $V_{pv}$ (V). ....	72
<b>Figure IV.12 :</b> L'évolution de la vitesse. ....	73
<b>Figure IV.13 :</b> L'évolution de flux. ....	73
<b>Figure IV.14 :</b> L'évolution de courant $I_{sd}$ . ....	73
<b>Figure IV.15 :</b> L'évolution de courant $I_{sq}$ . ....	74
<b>Figure IV.16 :</b> L'évolution de couple. ....	74
<b>Figure IV.17 :</b> L'évolution des courants statorique. ....	74
<b>Figure IV.18 :</b> Zoom sur les courants statorique. ....	75
<b>Figure IV.19 :</b> L'évolution de débit. ....	75

# Liste des tableaux

## *Liste des tableaux*

**Tableau 1.1** : Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques --- 9

# SOMMAIRE

### **Chapitre 1 : Description générale d'un système de conversion photovoltaïque.**

Introduction générale .....	1
Introduction .....	3
I.1 Le Solaire photovoltaïque .....	3
I.1.1 Le rayonnement du soleil .....	4
I.1.2 Le gisement solaire en Algérie .....	5
I.1.3 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	6
I.2 Les composants d'un système photovoltaïque .....	6
I.2.1 La cellule photovoltaïque .....	6
I.2.2 Principe de fonctionnement .....	7
I.2.3 Technologies des cellules photovoltaïques .....	8
I.3 Le module photovoltaïque .....	10
I.3.1 La caractéristique courant-tension et puissance tension d'un panneau photovoltaïque .....	10
I.3.2 Association en série .....	11
I.3.3 Association en parallèle .....	11
I.4 Différents types des systèmes photovoltaïques .....	12
I.4.1 Les systèmes autonomes .....	12
I.4.2 Systèmes hybrides .....	14
I.4.3 Systèmes connectés à un réseau .....	14
I.5 Les systèmes de pompages photovoltaïques .....	15
I.5.1 les composants d'un système de pompage photovoltaïque .....	17
I.6 Système de conversion .....	18
I.6.1 Convertisseur DC/DC (hacheur) .....	18
I.6.2 Convertisseur DC/AC (onduleur) .....	20
I.7 Le groupe moteur-pompe .....	20
I.7.1 Moteur .....	20
I.7.2 Les pompes .....	23
I.7.3 Comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques .....	26
Conclusion .....	27



## **Chapitre 2 : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque.**

Introduction .....	28
II.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	28
II.2 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque .....	31
II.2.1 Influence de l'éclairement .....	31
II.2.2 Influence de la température .....	32
II.3 Modélisation du hacheur survolteur .....	33
II.4 Modélisation de l'onduleur de tension .....	35
II.5 Modélisation de la machine asynchrone .....	37
II.5.1 Hypothèses simplificatrices .....	37
II.5.2 Modèle triphasé du moteur asynchrone .....	38
II.5.2.1 Equations électriques .....	38
II.5.2.2 Equations magnétiques .....	39
II.5.2.3 Equation mécanique .....	40
II.5.3 Modèle biphasé de la MAS .....	40
II.5.3.1 Transformation de Park .....	40
II.5.4 Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q) .....	42
II.5.4.1 Equations électriques .....	42
II.5.4.2 Equations magnétiques .....	42
II. 6 Modélisation de la pompe centrifuge .....	43
Conclusion .....	43

## **Chapitre 3: Optimisation et commande du système de pompage photovoltaïque.**

Introduction .....	44
III.1 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque .....	44
III.1.1 Evaluation des besoins en eau .....	44
III.1.2 Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise.....	45
III.1.3 Détermination de l'énergie solaire disponible .....	45
III.1.3.1 Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques --	46
III.1.3.2 Mois de dimensionnement .....	46
III.1.4 Choix des composants de système .....	46
III.1.4.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge .....	46

III.1.4.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	46
III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque .....	47
III.2.1 Principe de la commande MPPT .....	48
III.2.2 Algorithme perturbation et observation P&O .....	48
III.3 Commande de l'onduleur .....	50
III.3.1 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis .....	50
III.4 Commande de la machine asynchrone .....	51
III.4.1 Commande vectorielle .....	52
III.4.1.1 Principe de la commande vectorielle .....	52
III.4.1.2 Estimation de $\varphi_{dr}, \omega_s, \theta_s$ .....	54
III.4.1.3 Calculs des régulateurs .....	55
III.4.1.3.1 Réglage de la boucle de vitesse .....	55
III.4.1.3.2 Régulateur de flux .....	56
III.4.2 Commande par mode glissant .....	56
III.4.2.1 Principe de la commande par mode glissant .....	57
III.4.2.2 Différentes structures du contrôle par mode de glissement .....	57
III.4.2.2.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande .....	58
III.4.2.2.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état .....	58
III.4.2.2.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente .....	58
III.4.2.3 Synthèse de la loi de commande .....	58
III.4.2.3.1 Choix de la surface de glissement .....	59
III.4.2.3.2 Condition d'existence du mode de glissement .....	59
III.4.2.3.3 Calcul de la commande .....	60
III.4.2.4 Le broutement (chattering) .....	61
III.4.2.5 Solutions pour atténuer le phénomène de broutement .....	61
III.4.2.5.1 Solution de couche limite .....	61
III.4.2.5.2 Solution par des modes glissants d'ordre supérieur .....	62
III.4.2.6 Les avantages de la commande par mode glissant .....	63
III.4.2.7 Application .....	63
III.4.2.7.1 Calcul de la surface de régulation du flux rotorique .....	63
III.4.2.7.2 Calcul de la surface de régulation de la vitesse .....	64

Conclusion-----	65
-----------------	----

**Chapitre 4 : Simulation du système de pompage photovoltaïque.**

Introduction -----	66
--------------------	----

IV.1 Simulation du système de pompage contrôlé par la commande vectorielle -----	66
---	----

IV.2 Simulation du système de pompage contrôlé par le mode glissant-----	67
--	----

IV.3 Fonctionnement sous des conditions fixe d'ensoleillement et de température -----	68
--	----

IV.4 Fonctionnement sous des conditions variables-----	71
--	----

Conclusion-----	78
-----------------	----

Conclusion générale -----	79
---------------------------	----

Annexe

Bibliographie

# Chapitre I

*Description générale d'un système de  
conversion photovoltaïque*

# Introduction générale

## Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. **[BOU 07]**

Environ de 68% de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. **[QUA 12]** La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque. **[BEL 08]**

Actuellement on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant les énergies solaires, surtout dans les régions ayant des conditions climatiques favorables ou encore pour les applications sur des sites isolés. Parmi ces applications considérables nous citons le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture dans les sites isolés où les conditions climatiques sont favorables surtout dans les pays en voie de développement. Cependant, les inconvénients majeurs de cette énergie sont le prix du générateur qui reste encore élevé, ainsi que le rendement énergétique relativement bas. **[MEZ 14]**

Un système de pompage d'eau photovoltaïque est généralement alimenté par un système comprenant un générateur photovoltaïque, un groupe moteur-pompe et un réservoir d'eau pour assurer la continuité de l'approvisionnement lorsque l'énergie solaire ne suffit pas, deux types de systèmes peuvent être utilisés, le premier est constitué d'un générateur photovoltaïque couplé directement à un groupe motopompe, le deuxième est composé d'un générateur photovoltaïque couplé à une motopompe CC ou AC à travers un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la machine continue et on ajoute un convertisseur continu alternatif dans le cas de la machine alternative. **[CHE 07] [ARR 07]**

L'objet de notre mémoire, porte sur le contrôle par mode glissant d'un système de pompage photovoltaïque. Ce type de contrôle est choisi pour ses avantages qui réside dans : la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et d'implantation, et la robustesse vis-à-vis la variation des paramètres internes ou externes [DEG 13]. Notre travail est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on va définir le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque. On va présenter aussi les différents systèmes photovoltaïques existant. Notre application porte sur les systèmes de pompage photovoltaïque alors une description de ces différents composants sera donnée. Enfin la structure globale du système à étudier sera présentée à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément constituant le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à, l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque, le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque, les principes de la commande vectorielle du contrôle par mode glissant seront présenté en vu de tester leurs performance.

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation du système avec les deux types commandes, et une comparaison sera présentée pour montrer la robustesse du contrôle par mode glissant.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et nous proposerons quelques perspectives.

## Introduction

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. [BUY 02]

Cette technologie ne produit pas de chaleur, contrairement aux chauffe-eau et aux chauffe-piscines solaires résidentiels. Elle diffère également de la technologie utilisée dans les centrales thermo dynamiques solaires où l'énergie solaire concentrée sert à produire de la vapeur qui active une turbine raccordée à un groupe électrogène. Les systèmes photovoltaïques ne contiennent aucune pièce mobile. Ils sont fiables, requièrent peu d'entretien, sont silencieux et ne produisent aucune émission de polluants. Ce sont des systèmes modulaires, les éléments de base (modules de cellules solaires) sont vendus dans un vaste éventail de capacités d'alimentation électrique qui vont d'une fraction de watt (par exemple les montres et les calculettes à pile solaire) à plus de 300 watts. L'interconnexion des modules permet d'obtenir la puissance qu'exige votre application. Certaines centrales photovoltaïques de démonstration produisent une puissance allant jusqu'à plusieurs mégawatts, bien que la plupart des systèmes installés soient de dimension beaucoup plus modeste. [BUY 02]

### I. 1 Le solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. [ENG 07]



Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, le soleil transforme chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. [MUK 99]

L'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ  $3,85 \cdot 10^{26}$  W. Cependant seule une infime partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil, environ deux milliards de fois moins ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ  $1,9 \cdot 10^{17}$  w), tel que l'énergie solaire reçue par unité surface perpendiculaire aux rayons solaire et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne est appelée la constante solaire qui est estimée à  $1367(\text{W}/\text{m}^2)$ . [BES 00]

### I.1.1 Le rayonnement du soleil :

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à toute vie terrestre. Les réactions de fusion nucléaire qui ont lieu au cœur du soleil libèrent une énergie colossale qui nous parvient 8 minutes plus tard sous la forme du rayonnement solaire. Voir figure (I.1).

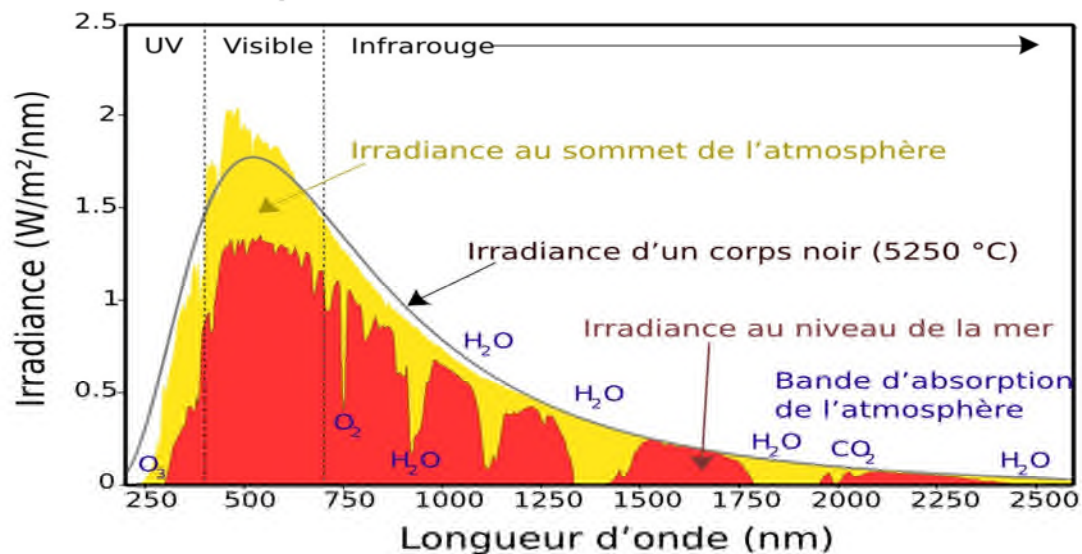
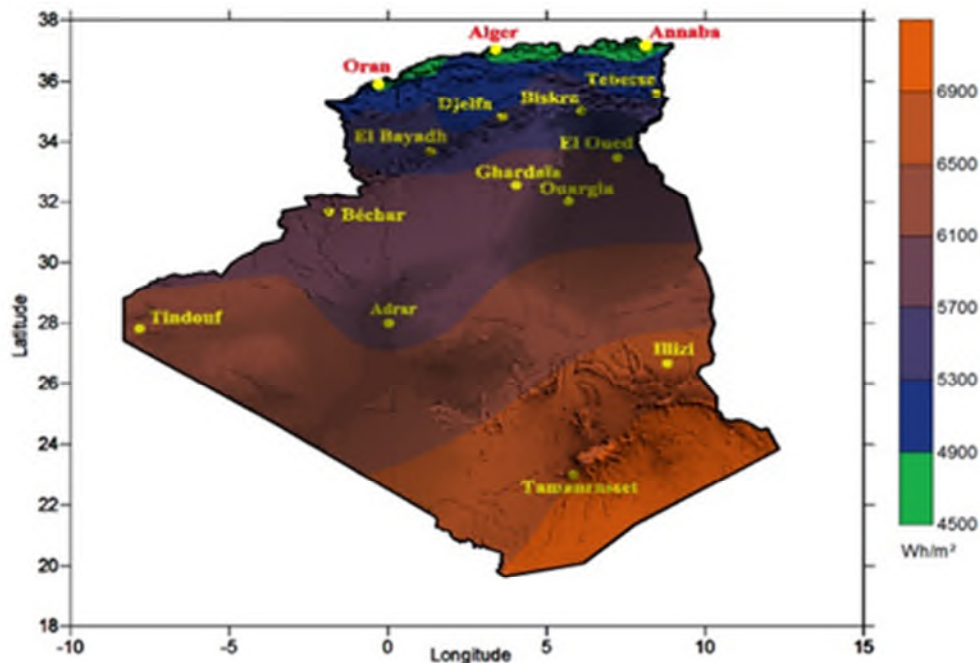


Figure I. 1 : Spectre du rayonnement solaire. [IRL 14]

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kw/m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1,2 \text{ kw/m}^2$  ( $1200 \text{ w/m}^2$ ). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus. [THO 98]

### I.1.2 Le gisement solaire en Algérie :

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. Par conséquent la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement et de  $5 \text{ Kwh/m}^2$ , soit près de  $700 \text{ kwh/m}^2$  par un an au nord et  $2263 \text{ kwh/m}^2$  au sud, ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production de l'électricité. (Figure I.2) [MEZ 10]



**Figure I. 2 :** Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale période 1992-2002. [CDE 16]

**I.1.3 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques : [BEL 15]****a) Avantages :**

- Une haute fiabilité.
- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées.
- Les entretiens sont réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

**b) Inconvénients :**

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

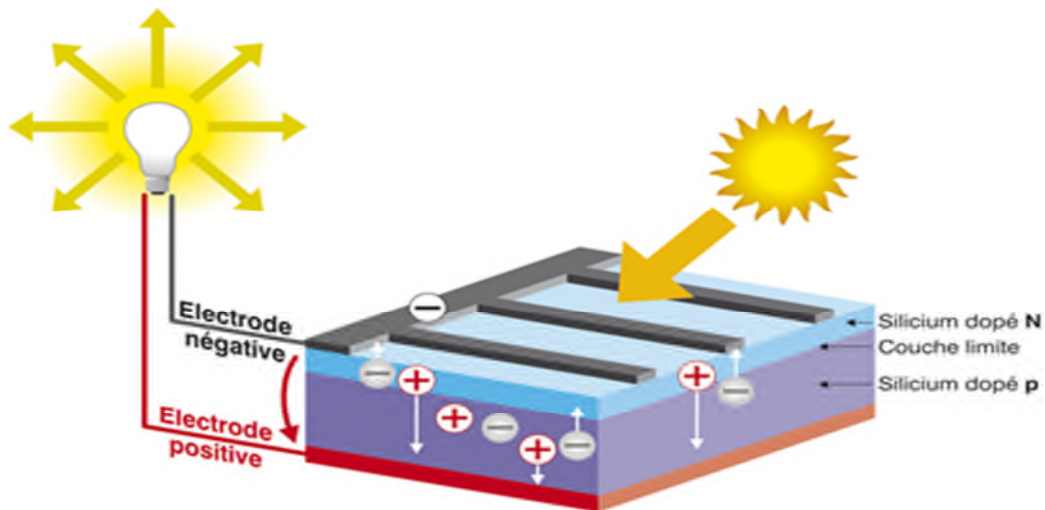
**I.2 Les composant d'un système photovoltaïque :****I.2.1 La cellule photovoltaïque :**

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé «effet photovoltaïque», a été découvert par E. Becquerel en 1839. [AOU 14]

Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

### I.2.2 Principe de fonctionnement :

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.



**Figure I.3 :** Schéma de principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.[ENG16]

Un photon (particule de lumière) dont l'énergie est suffisante et heurtant un atome peut arracher un électron. Il crée ainsi une paire électron – trou. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers la jonction N/P, où la présence du champ électrique a pour conséquence la collecte de l'électron vers la région N. Une tension électrique apparaît entre les deux côtés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant circule. Le courant produit par une cellule photovoltaïque est un courant continu. (Figure I.3) [MIC 03]

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des « impuretés ») sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage.

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore).

- Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore). [MIC 03]

### **I.2.3 Technologies des cellules photovoltaïques :**

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques. [AOU 14]

#### **a. Technologies de la 1ère génération à base de silicium cristallin :**

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin. [AOU 14]

#### **b. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince :**






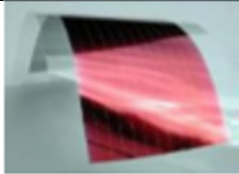
Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

#### **c. Technologies de la 3ème génération « les cellules organiques » :**

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules : les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement. [AOU 14]

Tableau 1.1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
<b>Silicium monocristalline</b>	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
<b>Silicium poly-cristallin</b>	11-15%	Bon rendement pour une cellule	fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
<b>Silicium amorphe</b>	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
<b>CdTe</b>	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
<b>CmIGS</b>	20%	Énergie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
<b>Cellules organiques</b>	≤ 5%	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

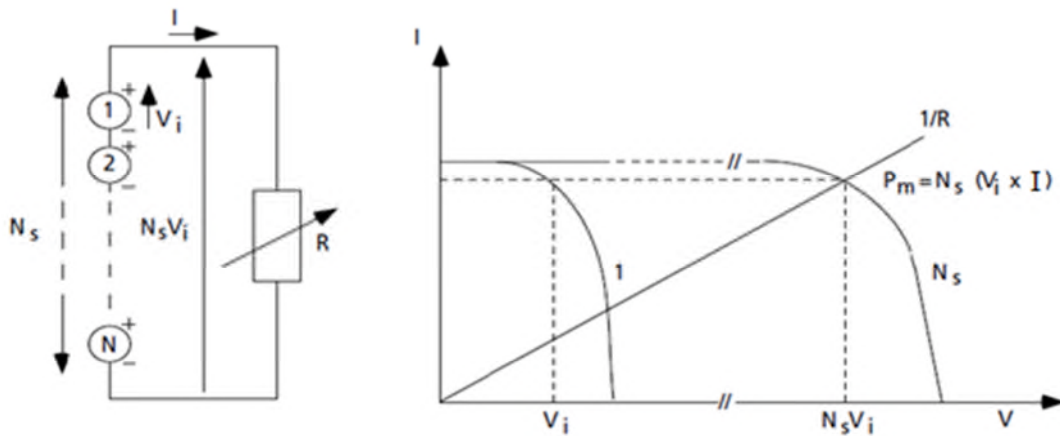
Dans le tableau (1.1), ci-dessus résume les différentes performances des technologies citées précédemment. [MCE 12]

**I.3 Le module photovoltaïque :**

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules photovoltaïques sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. Elles sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. [THO 98]

**I.3.1 Association en série :**

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série comme le montre la figure ci-dessous (figure I.5)



**Figure I.4 :** Cellules identiques en série.

**I.3.2 Association en parallèle :**

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche comme le montre la figure ci-dessous (figure I.6).



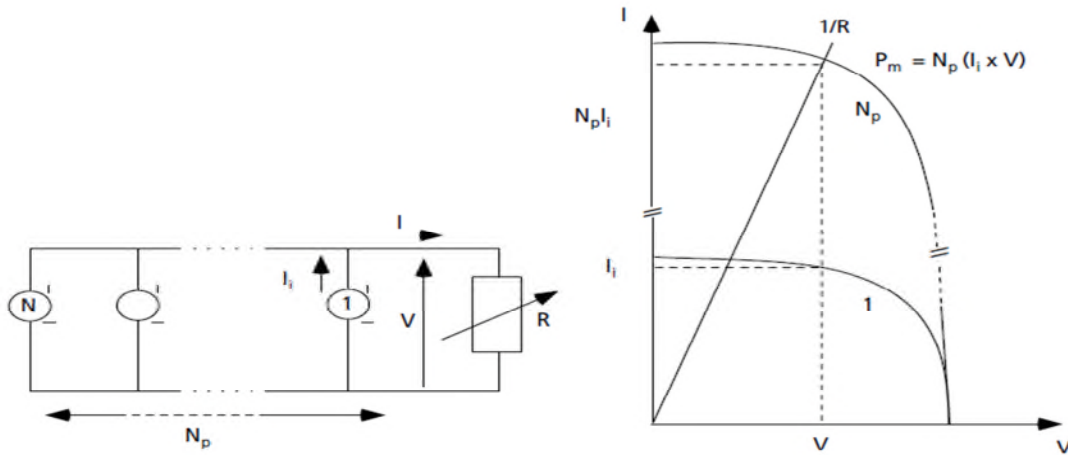


Figure I.5 : Cellules identiques en parallèles.

**I.3.3 La caractéristique courant-tension et puissance tension d'un panneau photovoltaïque :**

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse du générateur photovoltaïque est une intensité rayonnante de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C. (Figure I. 4)

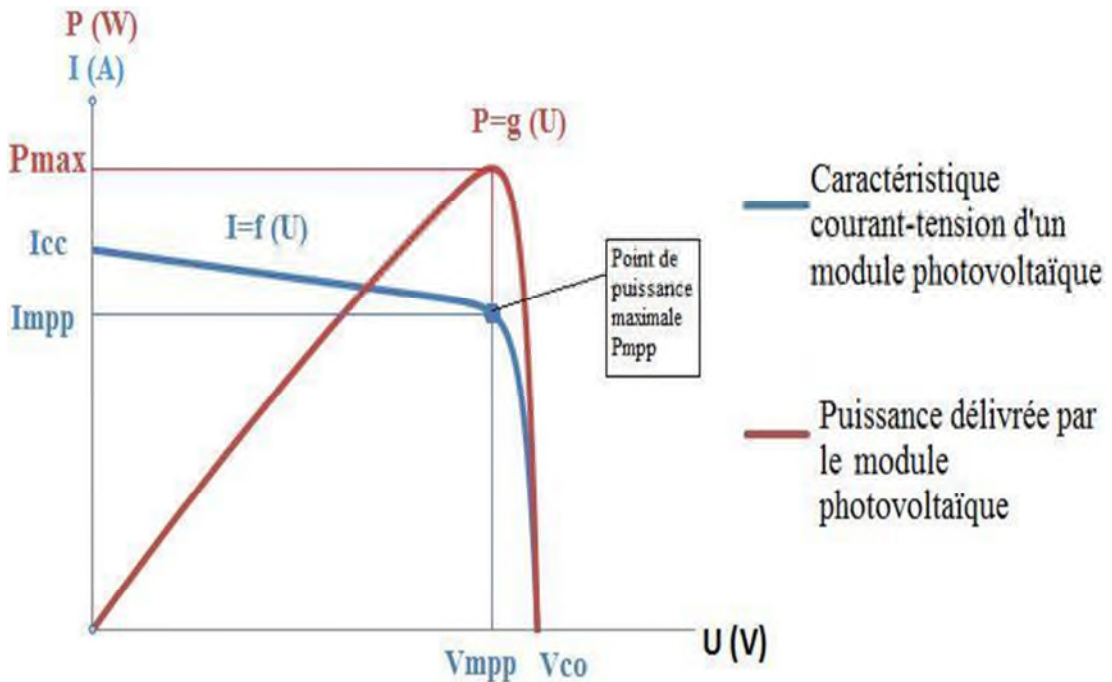


Figure I. 6 : La caractéristiques courant-tension et puissance-tension.



#### I.4 Différents types de systèmes photovoltaïques :

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, on les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

##### I.4.1 Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. [BEL15]

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont :

- **Système autonome avec stockage :**

Système autonome avec stockage c'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasinier de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques. (Figure I.7) [AKA 10]

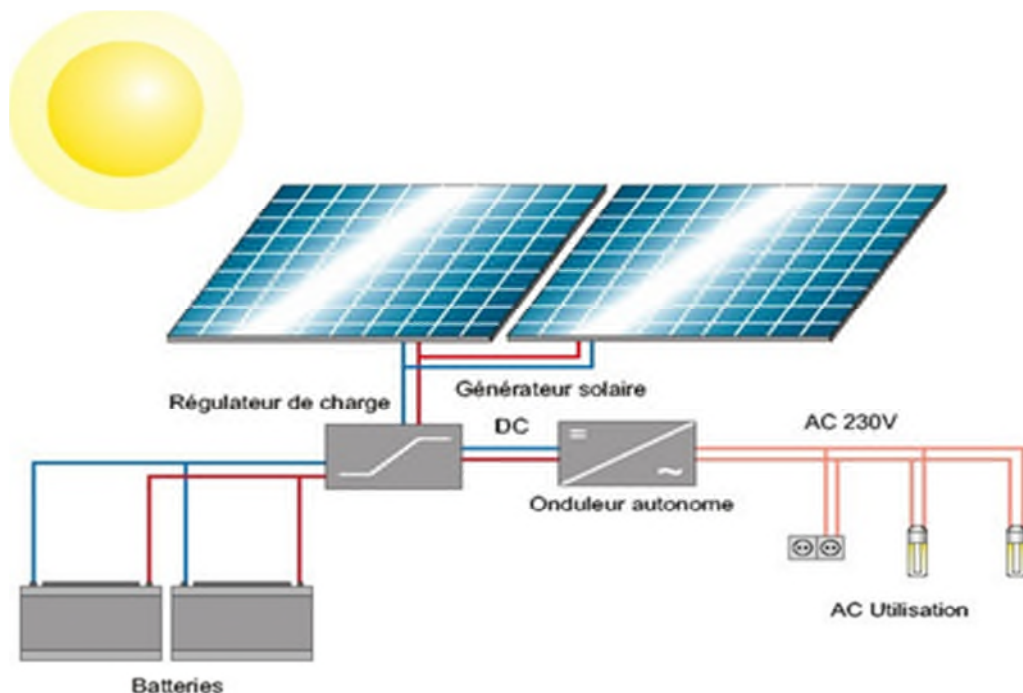
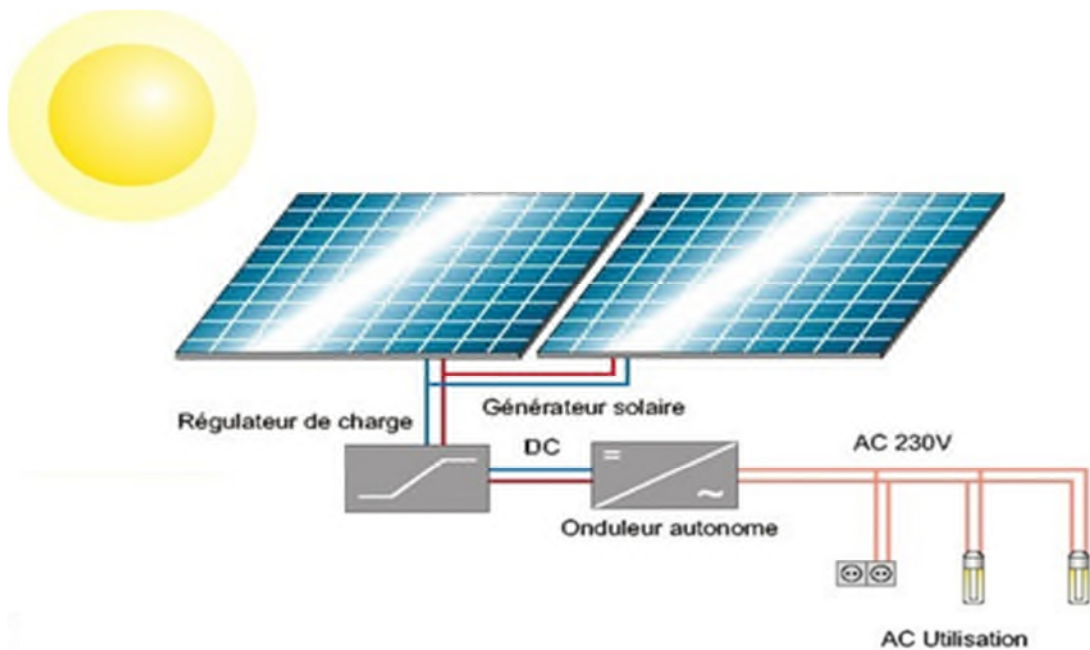


Figure I. 7 : Système photovoltaïque autonome avec stockage. [TRA 16]

- **Système autonome sans stockage :**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour les quelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil au plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome ou le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et fonction du rayonnement solaire. (Figure I.8) [MEZ 14]



**Figure I. 8 :** Système photovoltaïque autonome sans stockage. [TRA 16]

### I.4.2 Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, Ou si vous désirez diminuer votre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs. (Figure I.9)

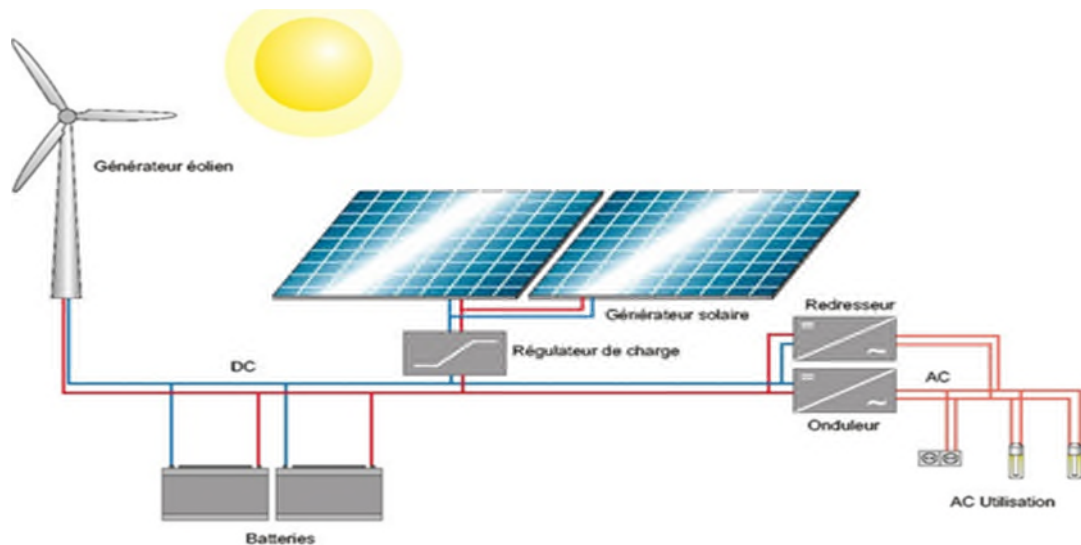


Figure I. 9 : Systèmes hybrides. [TRA 16]

### I.4.3 Systèmes connectés à un réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique.

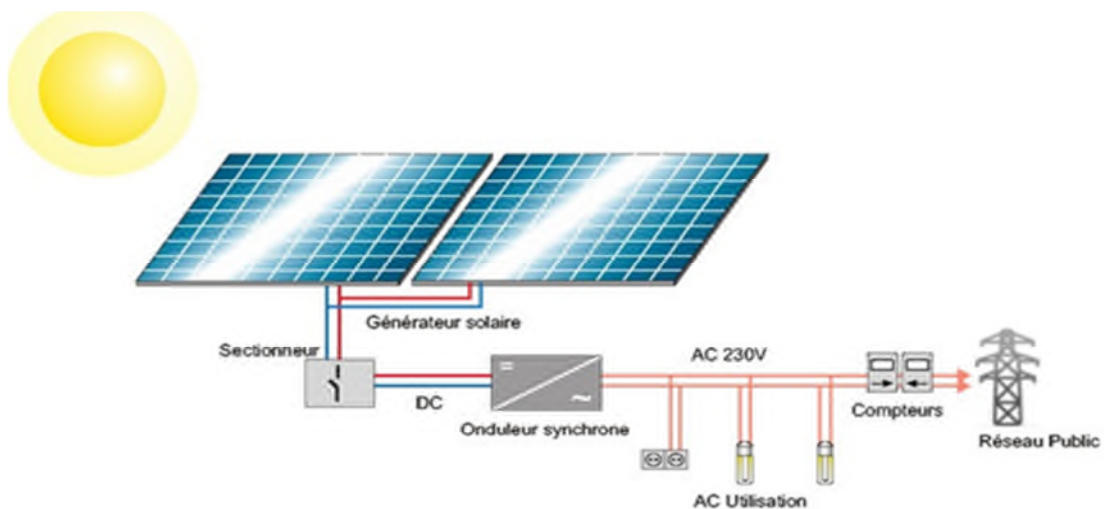


Figure I. 10 : Système photovoltaïque connectés à un réseau. [TRA 16]

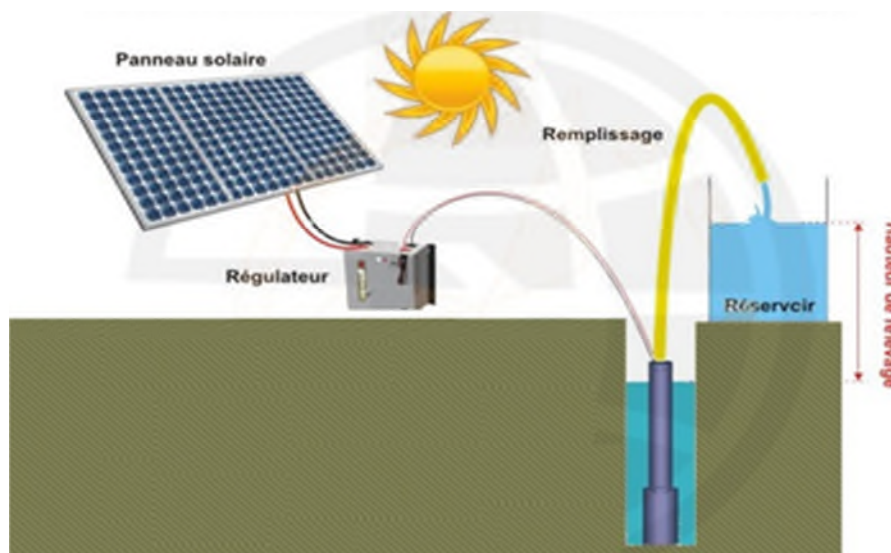
L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par des grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il approvisionne au besoin ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. (Figure I.10) [BUY 02]

### I.5 Les systèmes de pompes photovoltaïques :

« L'eau solaire » consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe électrique permettant d'assurer l'exhaure de l'eau. Le plus souvent utilisée dans les zones rurales non desservies par le réseau électrique.

- **Pompage au fil du soleil :**

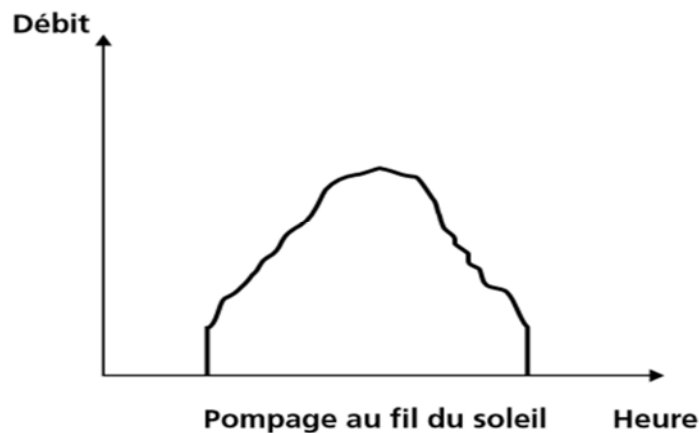
Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker de l'eau jusqu'au moment de son utilisation comme le montre la figure ci-dessous (Figure I.11).



**Figure I. 11 :** Principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil. [CAP 16]

Constituer d'un panneau photovoltaïque alimentant une pompe assistée par un régulateur contrôleur, c'est ce qui rend le principe de fonctionnement relativement simple.

- **Caractéristique du débit pour le pompage au fil du soleil :**

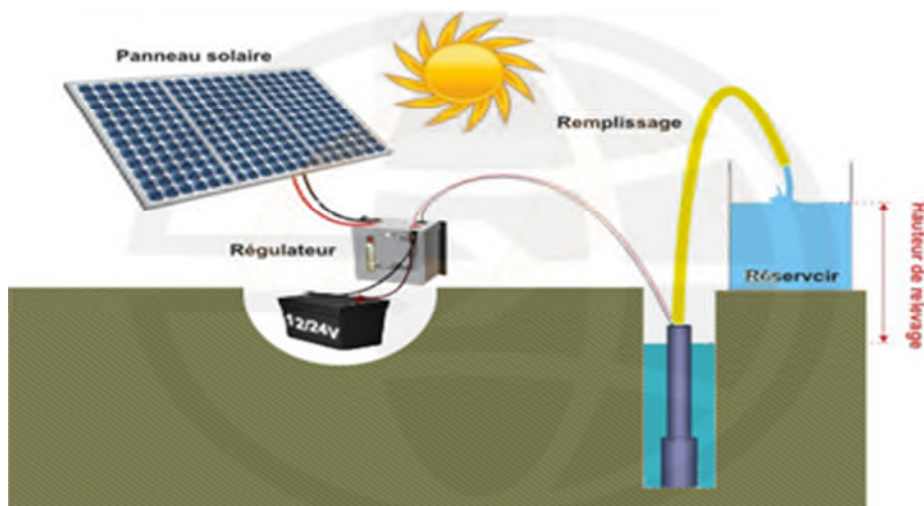


**Figure I.12 :** Caractéristique du débit pour le pompage au fil du soleil.

Cette solution est moins coûteuse, mais il est impossible de pomper au-dessus d'un certain niveau d'éclairement, la pompe ne pouvant être amorcée sous une certaine puissance fournie. Il y a donc perte d'énergie au début et à la fin de la journée.

- **Pompage avec stockage électrochimique :**

Ce système utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée. Voir figure I.13.

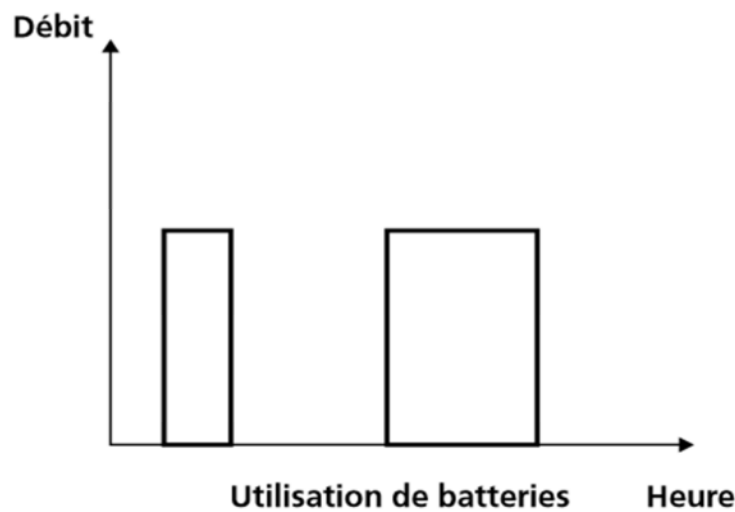


**Figure I.13 :** Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique.

#### [CAP 16]

La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et moto pompe.

- **Caractéristique du débit pour le pompage avec stockage électrochimique :**



**Figure I.14 :** Caractéristique du débit pour le pompage avec stockage électrochimique.

[THO 98]

Pour notre application on a choisi d'utiliser un système autonome sans stockage électrochimique, car les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Le pompage au fil de soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie.

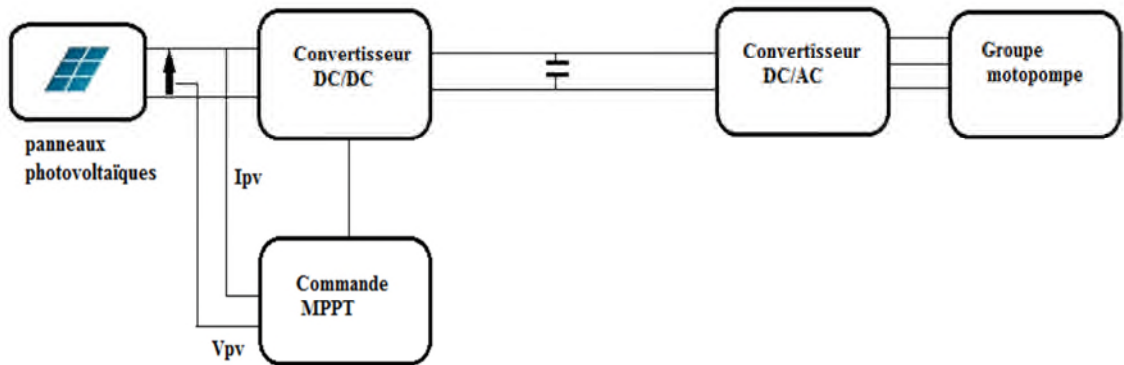
- **I.5.1 Les composants d'un système de pompage photovoltaïque : [THO 98]**

Le figure (I.15) montre le schéma des différents composants d'un système de pompage photovoltaïque, il est constitué de :

- Un générateur lui-même composé de modules photovoltaïques, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu. Il comporte aussi une structure métallique pour supporter l'ensemble.
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur (onduleur), capable de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire, elle-même fonction de l'irradiation solaire qu'il reçoit.
- Un groupe motopompe, constitué d'un moteur électrique à induction et d'une pompe centrifuge ou volumétrique.
- Un câblage électrique, par lequel transite l'énergie du générateur au moteur.



- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau de sa source (souvent un puits ou un forage), jusqu'à un réservoir de stockage.



**Figure I.15 :** Schéma des composants d'un système de pompage photovoltaïque.

## I.6 Les systèmes de conversions :

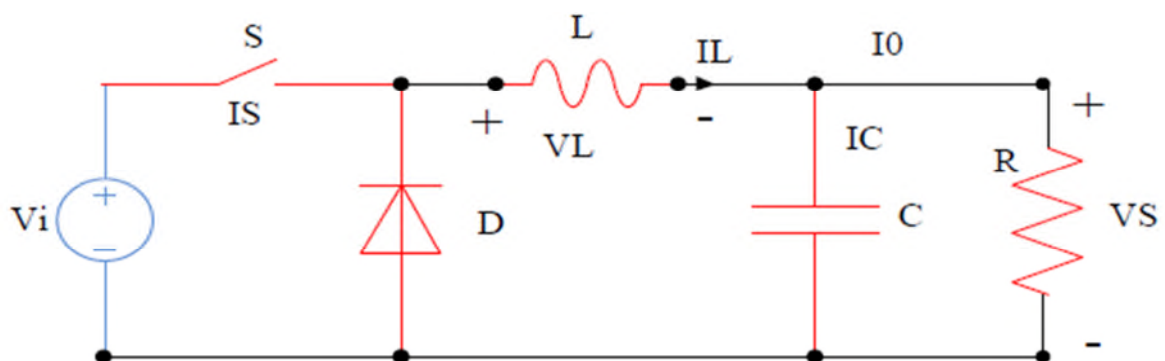
Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

### I.6.1 Convertisseur DC/DC (hacheur) :

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

- **Hacheur dévolteur (Buck) :**

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (I.16).



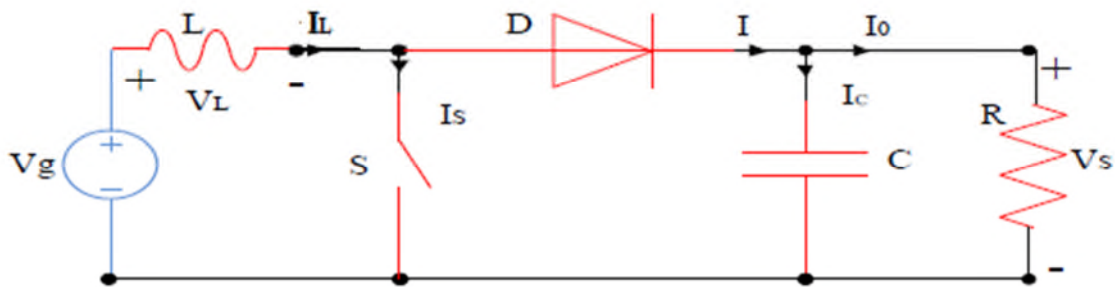
**Figure I.16:** Circuit électrique de base du hacheur dévolteur(Série).

Les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge.

- **Hacheur survolteur (Boost) :**

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D). Le schéma de la figure (I.17) représente le circuit électrique du hacheur survolteur. [SLA 11]



**Figure I.17.** Circuit électrique de base du hacheur survolteur (parallèle). [SLA 11]

Il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC, employés comme interface entre le générateur photovoltaïque et la charge, afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).



### I.6.2 Convertisseur DC/AC (onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

### I.7 Le groupe moteur-pompe :

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

#### I.7.1 Moteur :

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution de convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout moins coûteux. [BEL 12]

- **Moteur à courant continu :**

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie. Voir figure I.18 [BEL 14]

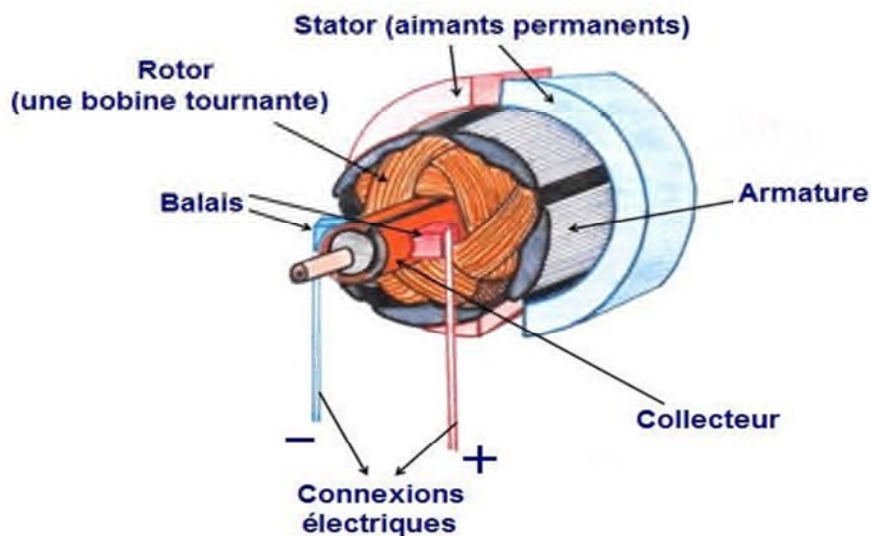


Figure I.18 : Moteur à courant continu. [AOU 14]

- **Moteur à courant alternatif :**

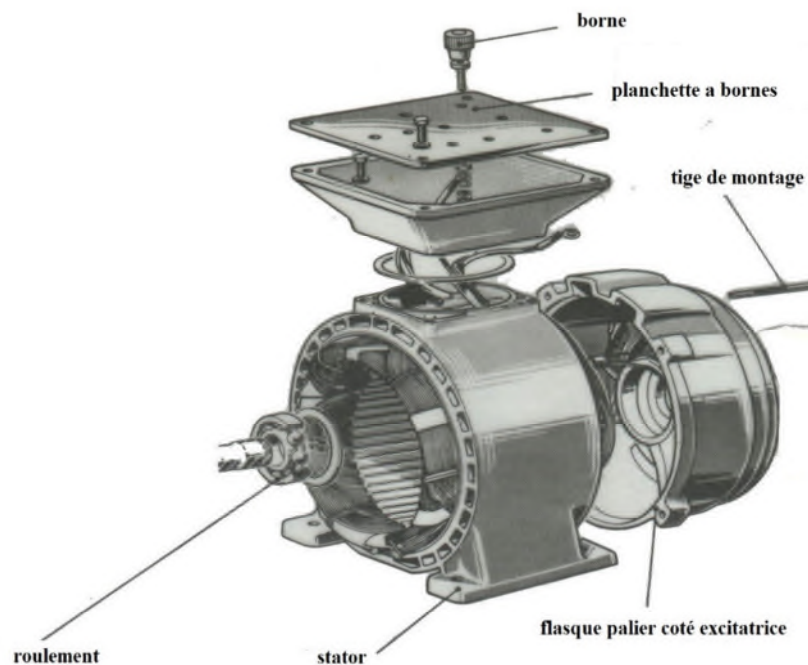
Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilowatts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé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

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Moteur synchrone.
- Moteur asynchrone. [BEL 14]

**a. Moteur synchrone :**

La machine synchrone est une machine à champ magnétique tournant qui présente deux paires ( $P$ ) de pôles magnétiques au rotor ainsi qu'au stator.  $P$  représente le nombre de paires de pôles ( $p$  pôles nord et  $p$  pôles sud). La vitesse de rotation  $n$  du rotor dépend directement de la fréquence  $f$  de la tension d'alimentation, on parle de vitesse de synchronisme. Voir figure I.19 [MOR 16]



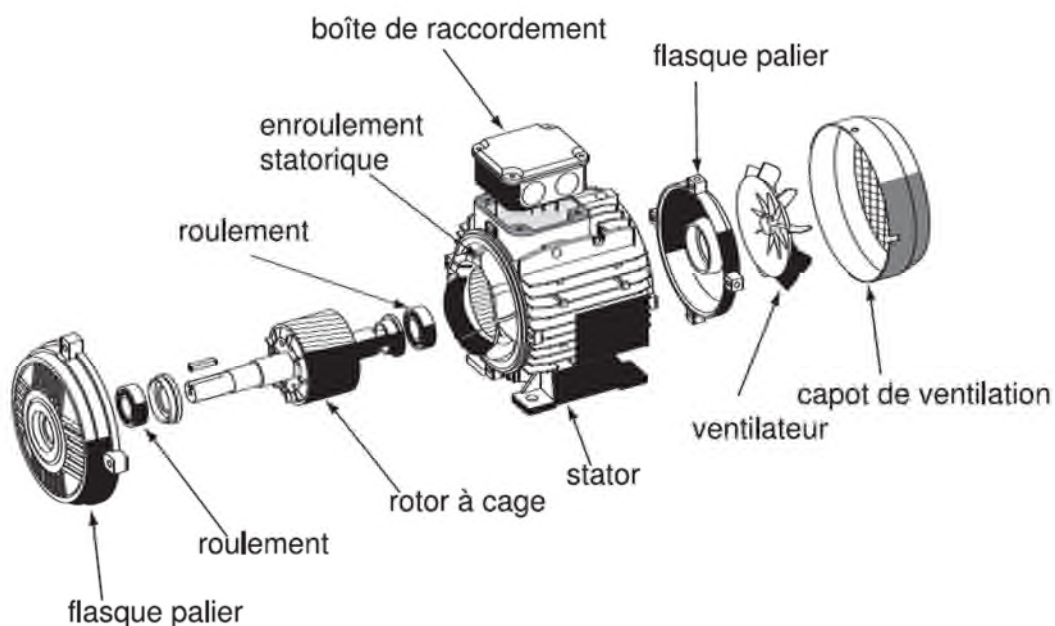
**Figure I.19 :** Moteur synchrone. [AFL 16]

Autrefois utilisés quasi exclusivement en alternateur, le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que moteurs dans une large gamme de puissance. La machine synchrone dans la très grande majorité des cas est utilisée en triphasé. [MAC 16]

### b. Moteur asynchrone :

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments (Figure I.20) suivants :

- Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles. [BOU 10]



**Figure I.20 :** Moteur asynchrone. [DOS 10]

Dans ce travail, on utilise un moteur asynchrone parce qu'il est plus robuste moins cher et sans entretien devient une solution plus économique. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. [BOU 10]

**I.7.2 Les 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, on distingue 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 est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. [THO 98]

Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-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. [THO 98]

**a. Pompe centrifuge :**

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée. Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration. [THO 98]

La pompe centrifuge est conçue pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur.

Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à  $Q \cdot HMT$ , variera donc dans le rapport du cube de la vitesse.

On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit. (Figure I.21) [THO 98]

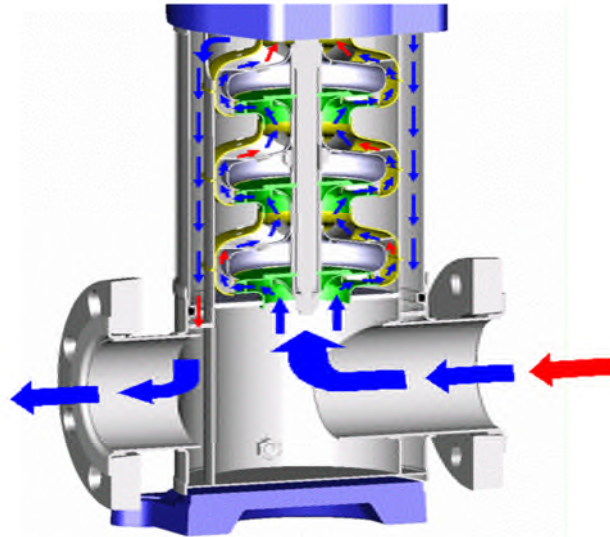


Figure I.21 : Pompe centrifuge.

- Caractéristique d'une pompe centrifuge :

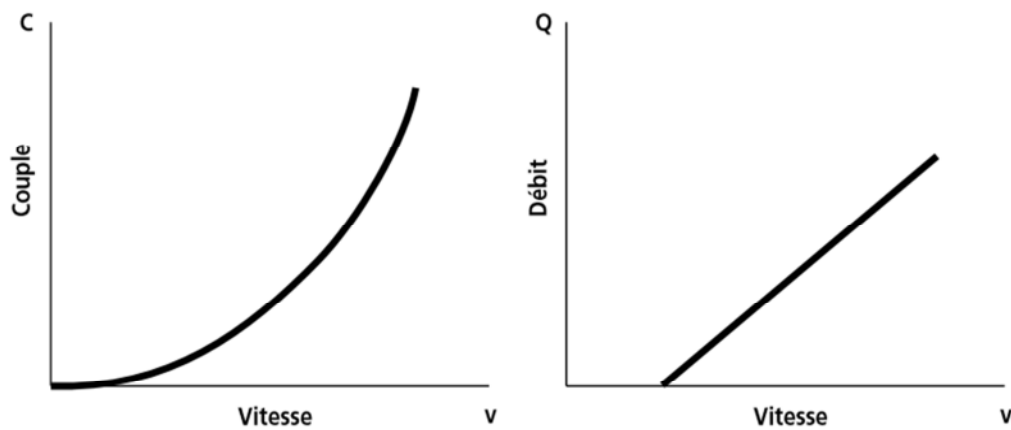
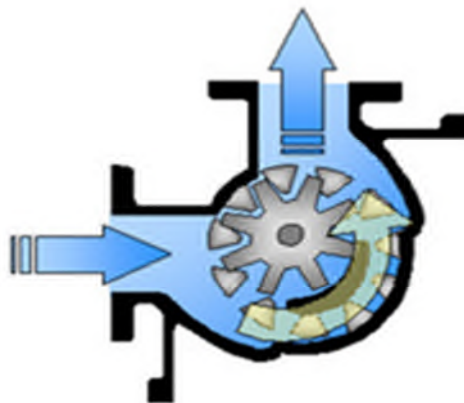


Figure I.22 : Caractéristique d'une pompe centrifuge. [THO 98]

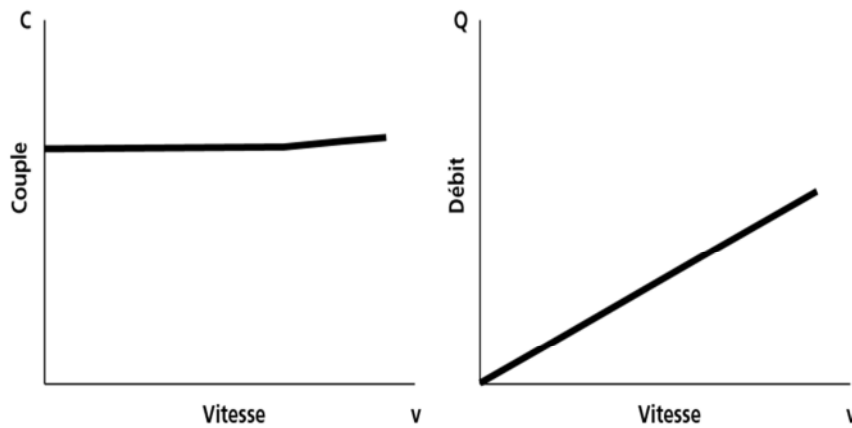
**b. Pompe volumétrique :**

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variation successive d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface. Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible. [THO 98]



**Figure I.23 :** Pompe volumétrique. [POM 16]

- **Caractéristique pompe volumétrique :**



**Figure I.24 :** Caractéristique pompe volumétrique. [THO 98]

### I.7.3 Comparaison entre les pompes centrifuges et la pompe volumétrique :

Pour de petites HMT et de faibles débits journaliers ( $HMT \_ Q < 25 \text{ m}^3$ ), les pompes à main peuvent s'avérer plus intéressantes. On utilisera alors un seau pour pomper l'eau. L'utilisation de pompes mécaniques sur cette plage d'utilisation se limitera principalement aux pompes volumétriques de faible puissance. Pour les hauteurs de moins de 7 mètres, l'emploi de pompes à aspiration sera préféré. Cette pompe est généralement de type centrifuge à ailettes. Pour de faibles débits et une puissance disponible variable (par exemple, couplage éolien), l'emploi d'une pompe à cavité (volumétrique) permet un débit plus constant. Pour une HMT moyenne, comprise entre 10 et 50 mètres, la pompe immergée centrifuge est généralement la plus efficace. Mais son rendement est très étroitement lié à la HMT et son dimensionnement est critique. Pour les HMT supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers ( $< 20 \text{ m}^3$ ), la pompe volumétrique sera la plus utilisée, surtout si une forte variation du rabattement de la nappe (donc de la HMT) est constatée. Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible. [THO 98]

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux autres types de pompe, car elle a une construction simple, peu de composants mobiles, longue durée de service, vitesse de rotation élevée, un service relativement silencieux et elle répond aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à choisir comme pompe pour notre système de pompage, la pompe centrifuge.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par le biais des cellules photovoltaïques, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques. Notre étude se porte sur le pompage photovoltaïque, une description des différents constituants sera présentée. Elle se compose d'un ensemble de panneaux photovoltaïques, d'un continu DC /DC commandé de sorte à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, d'un onduleur de tension qui alimente un groupe moteur pompe constituée d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Dans les prochains chapitres la modélisation des différentes parties du système de pompage photovoltaïque sera présentée ainsi que son contrôle et sa simulation.



# Chapitre II

*Modélisation des éléments du système de  
pompage photovoltaïque*

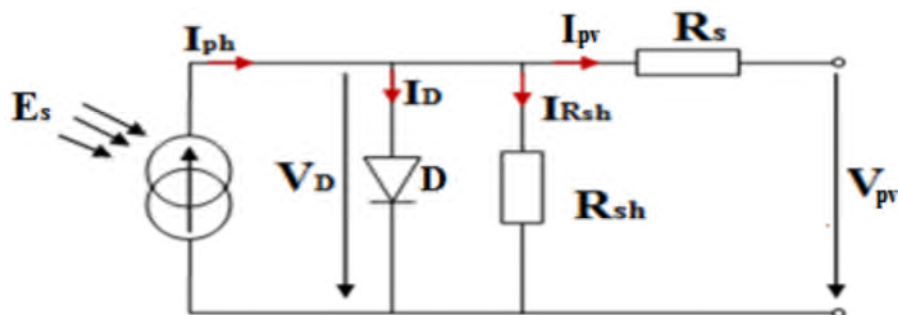
**Introduction :**

Après avoir étudié et citer les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procéderons à la modélisation de chaque partie. La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié afin de les simuler sous le logiciel (Matlab/simulink).

**II.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque:**

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de panneau photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie. Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des panneaux photovoltaïques rencontrés dans la littérature. [BOU 07]

- **Modèle idéalisé :** C'est le modèle le plus simplifié la valeur de la résistance  $R_{sh}$  étant généralement grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance  $R_s$  étant généralement petite, elle supposée être nulle ( $R_s=0$ ). [BEN 09]
- **Modèle à une diode :** C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile:
  - La résistance série est la résistance interne du panneau; elle représente principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
  - La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [BOU 07]



**Figure II.1 :** Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode.

D'autre part, des modèles plus complexes voient aussi le jour :

- **Le modèle à deux diodes** : une diode supplémentaire mise en parallèle avec l'autre diode dans le schéma de la figure (II.1) permettant de reproduire les effets chimiques de recombinaison des électrons. [BER 09]
- **Le modèle à trois diodes** : la troisième diode incluant dans le modèle à deux diode fait reprendre les effets non pris en compte dans les autres modèles (ex : courant de fuite liés aux diodes). [BEN 09]

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité [BEL 08]. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). [BEL 08] Il apparaît très adapté pour notre étude. Le modèle que nous avons choisi, c'est un modèle à cinq paramètres ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $R_s$ ).

D'après la figure (II.1), le courant ( $I_{pv}$ ) de générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement, et en négligeant le courant  $I_{Rsh}$  est donné par l'équation (II .1) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (II.1)$$

$I_{ph}$  : représente le photo-courant créé par le panneau (proportionnel au rayonnement incident).

$I_D$  : Courant de polarisation de la jonction PN.

L'expression (II.1) peut s'écrire de cette manière :

$$I_{pv} = I_{cc} [1 - K_1 (\exp(K_2 \cdot V_{pv}^m) - 1)] \quad (II.2)$$

Où  $K_1$ ,  $K_2$  et  $m$  sont des coefficients donnés par [NIK 03] :

$$K_1 = 0,01175 \quad (II.3)$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (II.4)$$

$$m = \frac{[\ln \frac{K_3}{K_4}]}{\ln[\frac{V_{mpp}}{V_{co}}]} \quad (\text{II.5})$$

De même pour  $K_3$  et  $K_4$  :

$$K_3 = \ln\left[\frac{I_{cc} (1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}}\right] \quad (\text{II.6})$$

$$K_4 = \ln \frac{1+K_1}{K_1} \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

$I_{mpp}$  : courant ou point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.

$V_{mpp}$  : Tension ou point de puissance maximale appelée aussi tension optimale.

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

$V_{co}$  : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.1) n'est pas valable que pour les conditions STC (Standard test condition :  $G_{stc} = 1000 \text{ w/m}^2$   $T_{stc} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque de tableau dans l'annexe changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \left(\frac{G}{G_{stc}}\right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}}\right) \cdot I_{cc, stc} \quad (\text{II.9})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{co} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (\text{II.10})$$

$G_{stc}$  : L'ensoleillement de référence ( $1000 \text{ w/m}^2$ ).

$G$  : L'ensoleillement dans les conditions quelconques.

$T_{stc}$  : La température de référence ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$T_c$  : La température dans les conditions quelconques.

$\Delta T_c$  : La variation de la température ( $^\circ\text{C}$ ).

$\Delta I_{pv}$  : La variation de courant par rapport à la variation de l'ensoleillement et de la température.

$\Delta V_{pv}$  : La variation de la tension par rapport à la variation de l'ensoleillement et de la température.

$\alpha_{cc}$  : Coefficient d'incrémentation du courant  $I_{cc}$ .

$\beta_{co}$  : Coefficient d'incrémentation de la tension  $V_{co}$ .

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{pv/nouv} = V_{pv,stc} + \Delta V_{pv} \tag{II.11}$$

$$I_{pv/nouv} = I_{pv,stc} + \Delta I_{pv} \tag{II.12}$$

Les constructeurs des panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ) du module sous les conditions standards de fonctionnement, le tableau représenté dans l'annexe montre les données d'un panneau solaire de type Siemens 110W. [BOU 12]

## II.2 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque :

### II.2.1 Influence de l'éclairement :

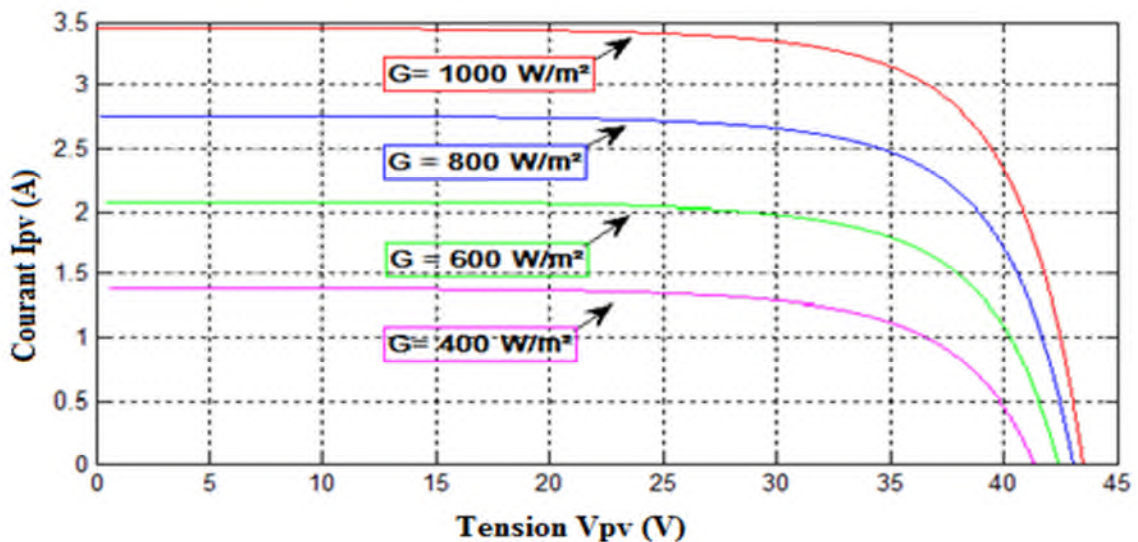


Figure II.2 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  à  $T=25^\circ\text{C}$

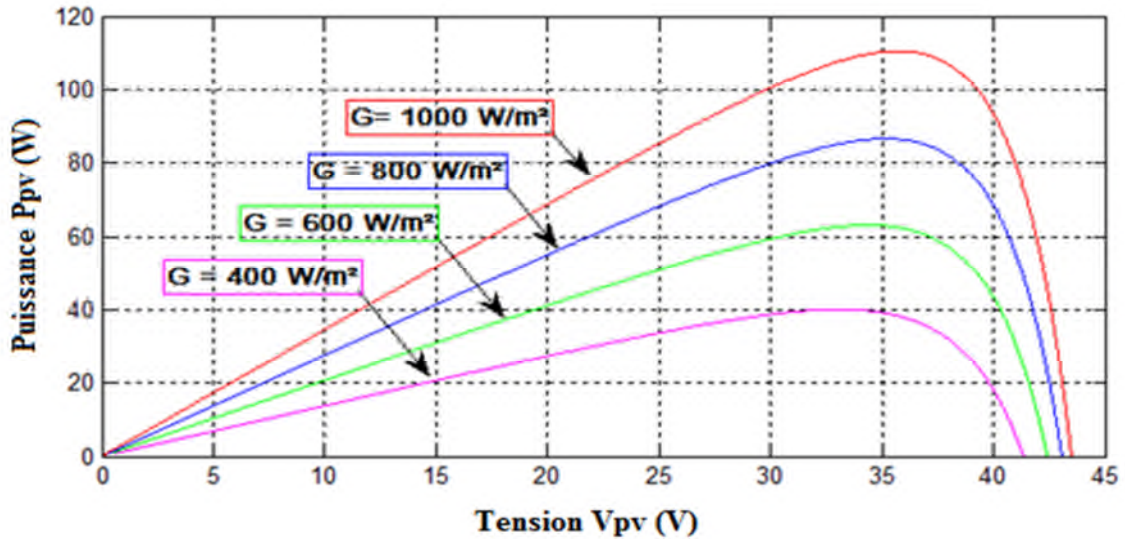


Figure II.3 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  à  $T=25^{\circ}\text{C}$

Les figures (II.2 et II.3) représentent les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque vis-à-vis des variations de l'éclairement à une température constante. On remarque que la tension ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant et la puissance qui augmente fortement avec l'éclairement.

II.2.2 Influence de la température :

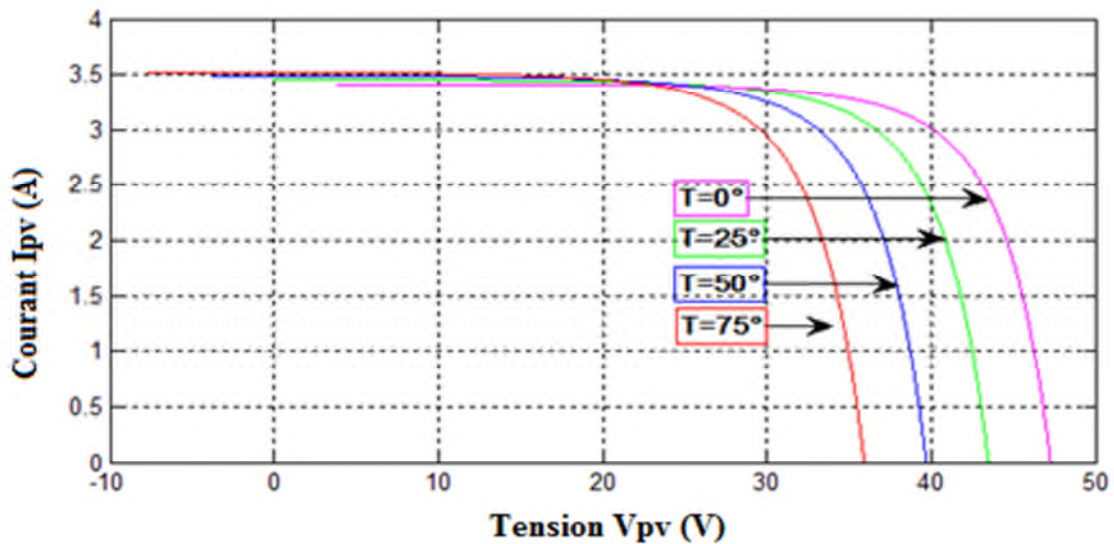
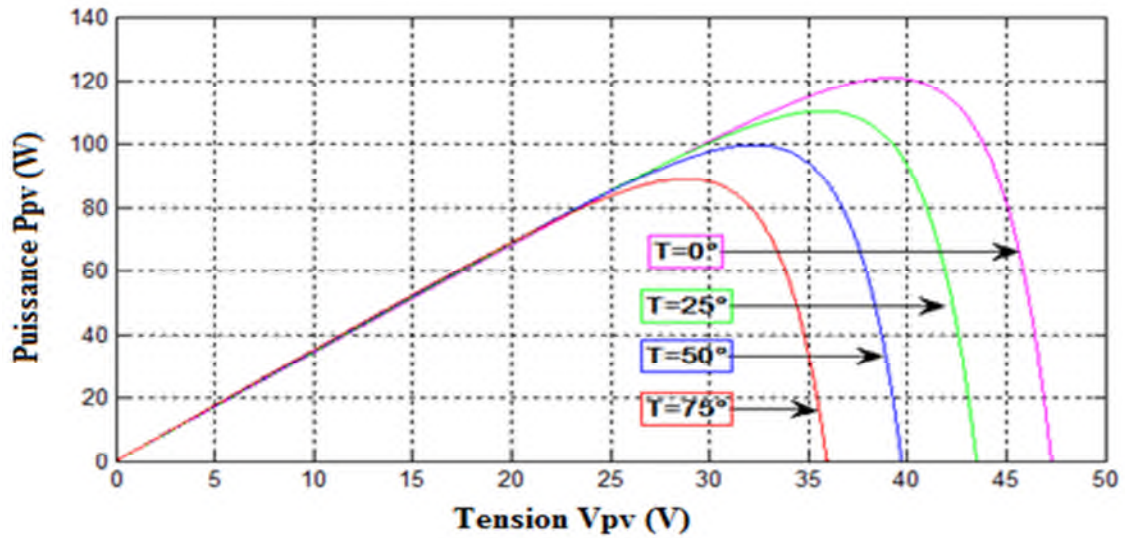


Figure II.4 : Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  à  $G=1000\text{W/m}^2$

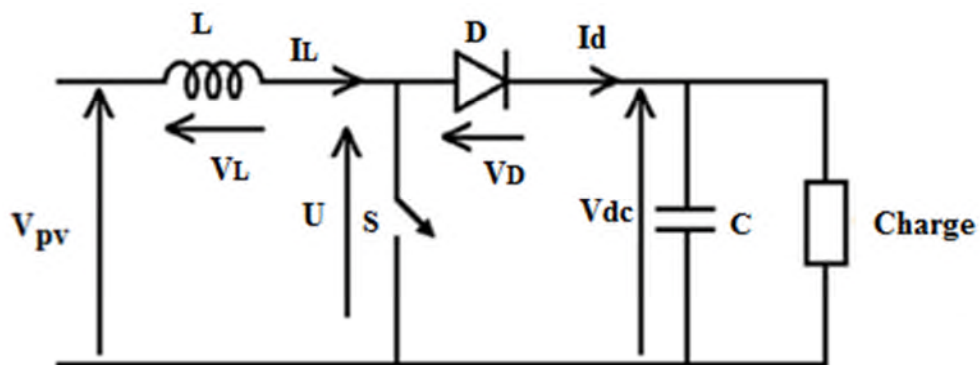


**Figure II.5 :** Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  à  $G=1000W/m^2$

Les figures (II.4 et II.5) représentent les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque vis-à-vis des variations de la température à un éclairement constant. On remarque que le courant est pratiquement inchangé et la tension est inversement proportionnelle par rapport à la température.

### II.3 Modélisation du hacheur survolteur :

C'est un convertisseur DC-DC éleveur de tension. Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée.



**Figure II.6 :** Schéma d'un Hacheur parallèle (BOOST).

- Lorsque S est fermé.

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.13})$$

$$0 = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.14})$$

- Lorsque S est ouvert :

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.15})$$

$$I_{PV} = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.16})$$

En posant [ $x = 1$ ] lorsque l'interrupteur S est fermé et [ $x = 0$ ] pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - x)V_{dc} \quad (\text{II.17})$$

$$(1 - x)I_{pv} = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.18})$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type Matlab simulink.

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produit entre la commande [ $x$ ] et les variables d'état  $V_{dc}$  et  $I_{pv}$ . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable [ $x$ ] par sa valeur moyenne sur une période de découpage  $T_d = 1/f$ , c'est-à-dire le rapport cyclique  $\alpha$  ( $\alpha = T_{co}/T_d$ ) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes.

Soit :

$$\frac{dI_{PV}}{dt} = -(1 - \alpha) \frac{V_{dc}}{L} + \frac{V_{PV}}{L} \quad (\text{II.19})$$

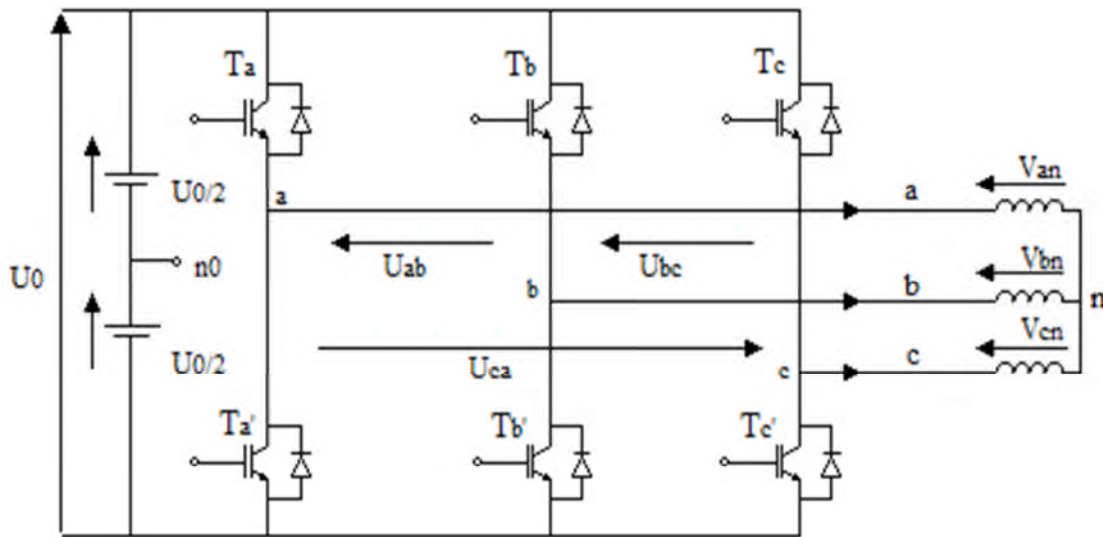
$$\frac{dV_{dc}}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_{PV}}{C} - \frac{V_{dc}}{RC} \quad (\text{II.20})$$



**II.4 Modélisation de l'onduleur de tension :**

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire en courant alternatif monophasé ou triphasé.

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable. [LOU09]



**Figure II.7 :** Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur et les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (II.21)$$

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (II.22)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Donc on peut déduire que :

$$V_{nn} = \left(\frac{1}{3}\right) [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.24})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $S_i$  ( $i=a, b, c$ ) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0,5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0,5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0,5)U_0 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant (II.23) dans (II.25) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{2}{3}\right) V_{an0} - \left(\frac{1}{3}\right) V_{bn0} - \left(\frac{1}{3}\right) V_{cn0} \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right) V_{an0} + \left(\frac{2}{3}\right) V_{bn0} - \left(\frac{1}{3}\right) V_{cn0} \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right) V_{an0} - \left(\frac{1}{3}\right) V_{bn0} + \left(\frac{2}{3}\right) V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

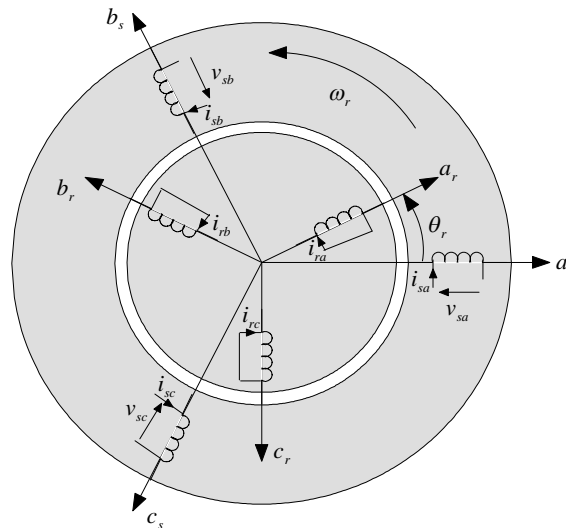
En remplaçant (II.24) dans (II.25), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_0}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

## II.5 Modélisation de la machine asynchrone :

Comme tout système, l'étude des machines électriques s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande des machines électriques, néanmoins la répartition des enroulements et la géométrie propre du moteur asynchrone (MAS) rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté.



**Figure II.8 :** Représentation schématique des enroulements de la MAS

### II.5.1 Hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier la modélisation de la machine, on va admettre les hypothèses simplificatrices suivantes [Car 98] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale.
- La machine de construction symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

## II.5.2 Modèle triphasé du moteur asynchrone :

### II.5.2.1 Equations électriques :

Les équations électriques des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent :

➤ **Au stator**

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \varphi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \varphi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

➤ **Au rotor**

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \varphi_{ra} = 0 \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \varphi_{rb} = 0 \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rc} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Soit on écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}.$$

$R_s, R_r$ : Résistance par phase statorique et rotorique ;

$[v_s], [v_r]$ : Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques ;

$[\varphi_s], [\varphi_r]$ : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques ;

$[i_s], [i_r]$ : Vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques.

### II.5.2.2 Equations magnétiques :

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. L'écriture matricielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques :

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} ; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & M_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix}.$$

De façon similaire, on aura les équations des flux rotoriques :

$$[\varphi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{II.32})$$

Où :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} ; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ba} & M_{ca} \\ M_{ab} & M_{bb} & M_{cb} \\ M_{ac} & M_{bc} & M_{cc} \end{bmatrix}$$

Et

$L_s$  : Inductance propre d'une phase statoriques.

$L_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

$M_{sr} = M_{rs}$ : Inductance mutuelle entre phase  $a$  du stator et  $a$  du rotor.

Pour l'ensemble stator et rotor, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est donnée par :

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

M : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

### II.5.2.3 Equation mécanique :

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega_m}{p} \quad (\text{II.36})$$

D'autre part :

$$\omega_m = (d\theta_m)/dt \quad (\text{II.37})$$

## II.5.3 Modèle biphasé de la MAS :

### II.5.3.1 Transformation de Park :

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q (direct, en quadrature) à l'aide de la matrice de Park  $[P(\theta)]$ . On applique la transformation de Park pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statorique et celle des grandeurs rotorique doivent coïncider. On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant. [ACH 07]

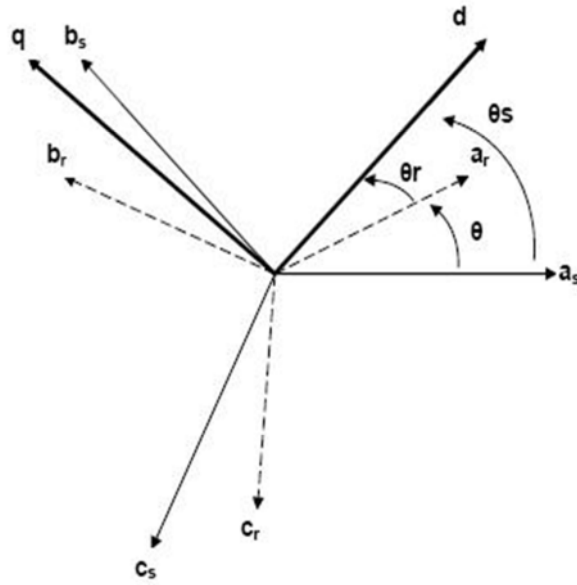


Figure : II.9 Représentation des axes de la machine

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$\theta = \theta_s$  : Grandeurs statoriques.

$\theta = \theta_r$  : Grandeurs rotoriques.

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est donné par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}.$$

X : tension, courant ou flux.

o : indice de l'axe homopolaire.

### II.5.4 Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q) :

En appliquant la transformation de Park aux équations satoriques et rotoriques on aboutit aux équations suivantes dans le repère (d, q), on obtient :

#### II.5.4.1 Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_m) \varphi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_m) \varphi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

#### II.5.4.2 Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \mathcal{L}_s i_{ds} + \mathcal{M} i_{dr} \\ \varphi_{qs} = \mathcal{L}_s i_{qs} + \mathcal{M} i_{qr} \\ \varphi_{dr} = \mathcal{L}_r i_{dr} + \mathcal{M} i_{ds} \\ \varphi_{qr} = \mathcal{L}_r i_{qr} + \mathcal{M} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

En introduisant le système d'équations (II.41) dans (II.40), et en posant

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r \text{ et } p = \frac{d}{dt}, \text{ on trouve :}$$

$\omega_s$  : La pulsation statorique.

$\omega_r$  : La pulsation rotorique.

$\omega_m$  : La pulsation mécanique.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \mathcal{L}_s p i_{ds} + \mathcal{M} p i_{dr} - \omega_s (\mathcal{L}_s i_{qs} + \mathcal{M} i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \mathcal{L}_s p i_{qs} + \mathcal{M} p i_{qr} + \omega_s (\mathcal{L}_s i_{ds} + \mathcal{M} i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \mathcal{L}_r p i_{dr} + \mathcal{M} p i_{ds} - \omega_r (\mathcal{L}_r i_{qr} + \mathcal{M} i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \mathcal{L}_r p i_{qr} + \mathcal{M} p i_{qs} + \omega_r (\mathcal{L}_r i_{dr} + \mathcal{M} i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$$\mathcal{L}_s = L_s - M_s$$

$$\mathcal{L}_r = L_r - M_r$$

$$\mathcal{M} = \frac{3}{2} M$$



L'écriture sous forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \mathcal{L}_s & 0 & -\omega_s \mathcal{M} \\ \omega_s \mathcal{L}_s & R_s & \omega_s \mathcal{M} & 0 \\ 0 & -\omega_m \mathcal{M} & R_r & -\omega_m \mathcal{L}_r \\ \omega_m \mathcal{M} & 0 & \omega_m \mathcal{L}_s & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & 0 & \mathcal{M} & 0 \\ 0 & \mathcal{L}_s & 0 & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & 0 & \mathcal{L}_r & 0 \\ 0 & \mathcal{M} & 0 & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

La transformation de Park, appliquée à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.44})$$

## II.6 Modélisation de la pompe centrifuge : [BEN12]

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.45})$$

Où :

$\Omega$  : Vitesse du moteur asynchrone (rad /s)

Avec  $k_r$  un coefficient de proportionnalité  $[(\text{Nm}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^2]$  qui est donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.46})$$

Où :

$P_n$ : Puissance nominale du moteur asynchrone(W)

$\Omega_n$  : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad /s)

### Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système de pompage photovoltaïque a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs (DC/DC, DC/AC), moteur asynchrone, pompe centrifuge). Cette modélisation est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la commande de ce système dans les chapitres qui suivent.

# Chapitre III

*Optimisation et commande du  
système de pompage photovoltaïque*

**Introduction :**

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur PV. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système. Ce problème peut être résolu par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but. La méthode appliquée à notre système s'appelle perturbation et observation (P&O).

Pour le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque, il est nécessaire de passer par l'étude dimensionnelle puis l'application d'une commande pour l'amélioration des performances statique et dynamique.

Dans ce chapitre nous allons en premier lieu présenter brièvement les différentes étapes du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque. Nous allons ensuite présenter les deux commandes à appliquer : la commande vectorielle et le mode glissant de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS). La commande par mode glissant a connu un essor considérable durant les dernières décennies. [ZEB 16]

Ceci est dû principalement à la propriété de convergence rapide, ainsi que la grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures. [ZEB 16]

**III.1 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque:****[HAD 05]**

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

**III.1.1 Evaluation des besoins en eau :**

L'estimation des besoins en eau c'est la première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque. Dans le cas de l'irrigation, les besoins d'eau dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). [LOU 13]

### III.1.2 Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise :

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_{\text{ele}} = \frac{C_H \cdot Q \cdot \text{HMT}}{R_p} \quad (\text{III.1})$$

Où

$E_{\text{ele}}$  : Habituellement exprimé en KWh.

$Q$  : Débit journalier ( $\text{m}^3/\text{jour}$ ).

HMT : Hauteur manométrique.

$R_p$  : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% à 45%, selon le type de pompe et de moteur. [BOU 12]

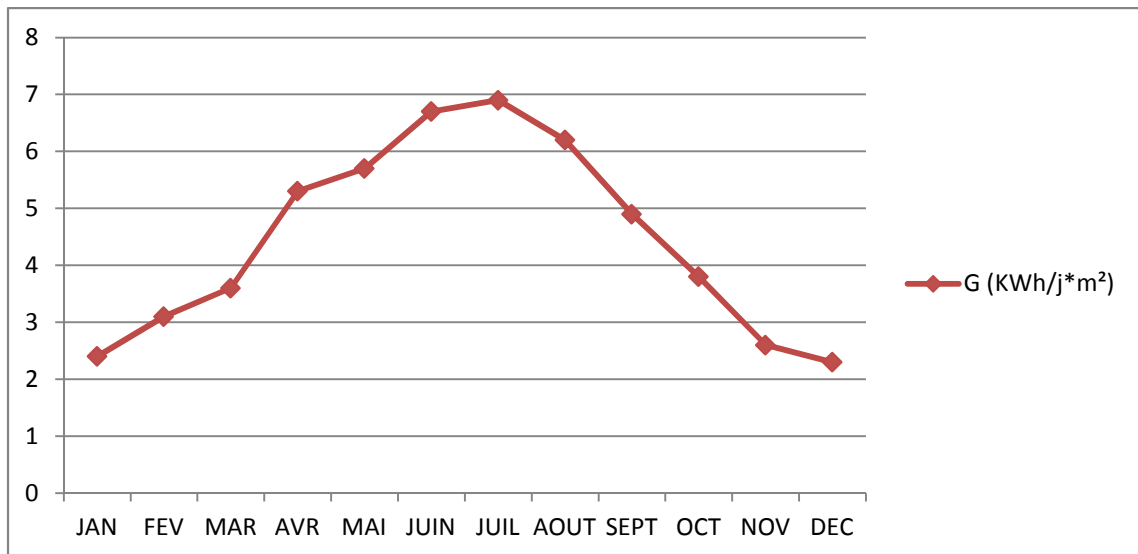
$$C_H = \frac{g \cdot \vartheta}{3600} = 2,725. \quad (\text{III.2})$$

$g$  : Constante de gravité ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

$\vartheta$  : La densité de l'eau ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

### III.1.3 Détermination de l'énergie solaire disponible :

Il est nécessaire de connaître avec une assez bonne précision l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée. [ANT 06]



**Figure III.1** : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007. [BOU 12]

### III.1.3.1 Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques :

L'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire. [HAD 05]

L'inclinaison optimale est la latitude de lieux plus  $10^\circ$ . Les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons soleil, si non orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et plein Nord dans l'hémisphère Sud. [TRA 11] [HAD 05]

### III.1.3.2 Mois de dimensionnement :

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système. C'est-à-dire, si le système fonctionne durant ce mois, il fonctionnera dans les autres mois, donc il nous garantit un fonctionnement annuel. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondantes à ce mois, serviront pour le choix des composantes du système. [BOU 12]

## III.1.4 Choix des composants de système :

### III.1.4.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge :

Dans notre cas le débit journalier sera de  $25 \text{ m}^3/\text{jour}$  et la HMT est estimée à 10m. La pompe choisie a un rendement de 55 %, et l'efficacité du moteur, d'environ 80 % au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe ( $R_p$ ) sera donc de 44 %. D'après l'équation (III.1) de l'énergie électrique requise par la pompe on aura :

$$E_{\text{ele}} = \frac{2,725.25.10}{0,44} \quad (\text{III.3})$$

$$E_{\text{ele}} = 1548,29 \text{ Wh/jour}$$

### III.1.4.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque :

D'après la figure (III.1), le mois de décembre est le mois où l'ensoleillement ( $G$ ) est défavorable pour une inclinaison de  $36,43^\circ$ , c'est-à-dire un maximum de 2,2 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20 % attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [THO 98], dans ce cas la puissance crête ( $P_c$ ) de champ photovoltaïque se calculera comme suite :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{E_{ns}(1-pertes)} \quad (III.4)$$

$$P_c = \frac{1548.29}{2,2(1-0,2)} = 897,7 \text{ W}$$

Pour des panneaux de types Siemens 110W,  $V_{opt}=35 \text{ V}$ ,  $I_{opt}=3,15 \text{ A}$

Le nombre de panneaux à utiliser peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{P_c}{P_{pv,u}} \right] \quad (III.5)$$

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{879,7}{110} \right] = 8$$

Pour 8 panneaux photovoltaïque la puissance totale sera égale :

$$P_{pv,tot}=8*110=880\text{W} \quad (III.6)$$

On branche les panneaux en série. Parce que (Les caractéristiques du moteur asynchrone utiliser :  $P_n=746 \text{ W}$ ,  $I_n=3,4 \text{ A}$ ).

La tension à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera :

$$V_{pvtot} = N_{pv} \cdot V_{opt} \quad (III.7)$$

$$V_{pvtot} = 8 * 35 = 280 \text{ V}$$

Le courant à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera :

$$I_{pv} = \frac{P_c}{V_{max}} = \frac{880}{280} = 3,14 \text{ A} \quad (III.8)$$

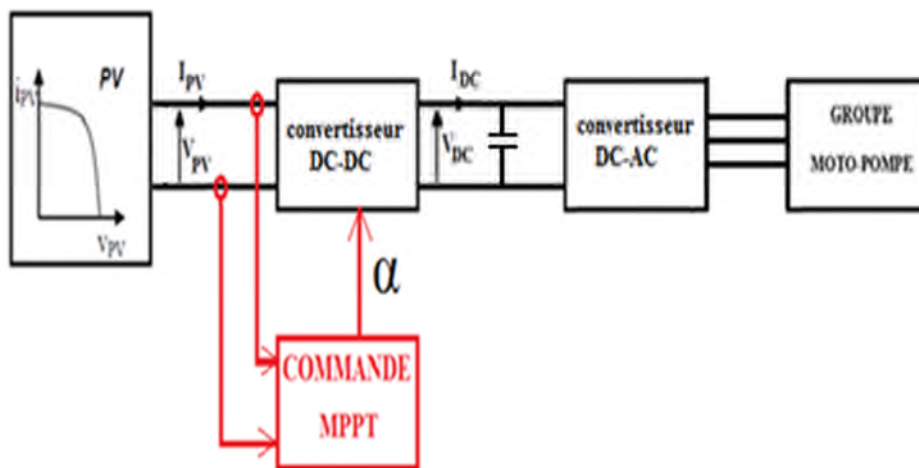
### III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV [GAI 07]. Ces techniques se différencient entre eux par leur

complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [GAI 07]

### III.2.1 Principe de la commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ). [DEN 07] L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.2).



**Figure III.2 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec la commande MPPT.

### III.2.2 Algorithme perturbation et observation P&O [ZAR10] :

L'algorithme Perturbation et observation "P&O" est souvent le plus utilisé dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du panneau  $V_{PV}$  et son courant de sortie  $I_{PV}$  et elle peut donc tout de suite dépister le point de puissance maximum en générant à sa sortie une tension  $V_{PV.ref}$ . Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de  $V_{PV}$  et l'observation de son impact sur le changement de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

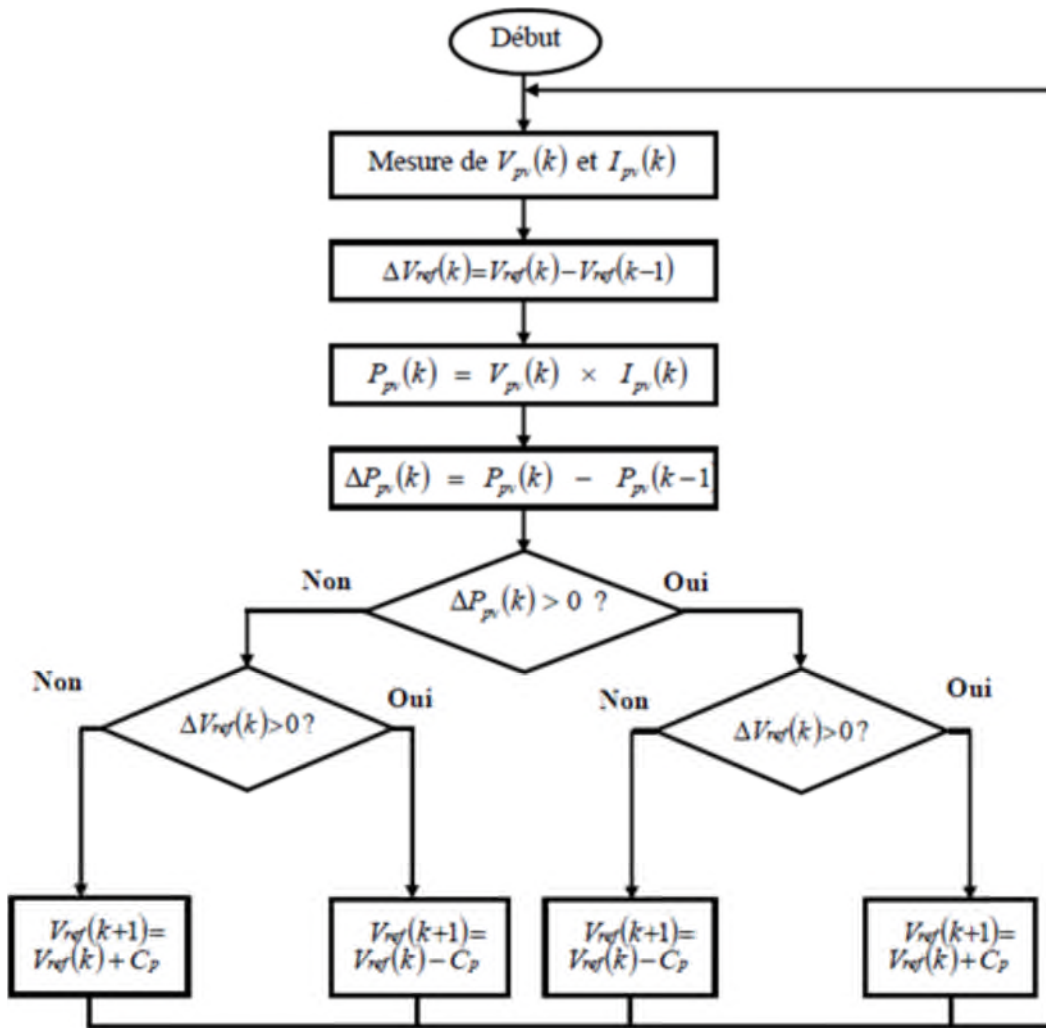


Figure III.3 : Organigramme de l’algorithme P&O ( $C_p$  est la largeur du pas de perturbation).

La figure (III.3) est un organigramme de l’algorithme P&O. Cet algorithme est conçu de sorte qu’il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l’algorithme,  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$  sont mesurés pour calculer  $P_{PV}(k)$ . Cette valeur de  $P_{PV}(k)$  est comparée avec celle de  $P_{PV}(k-1)$  déjà calculée à l’itération précédente. Si maintenant la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle.

Si la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure,  $V_{PV}$  est perturbée dans la direction opposée de celle de l’itération précédente.  $V_{PV}$  est ainsi perturbée à chaque cycle MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint  $V_{PV}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{OPT}$ . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec la taille du pas de la perturbation. Si cette largeur de pas est grande, l’algorithme MPPT répondra



rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes en puissance seront importantes lorsque les conditions de fonctionnement sont stables ou lentement changeantes. En d'autres termes, si la taille du pas est petite, les pertes de puissance sous des conditions de fonctionnement stables ou lentement changeantes seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'ensoleillement.

### III.3 Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Pour cela on utilise la commande par hystérésis car c'est une commande robuste et simple à établir. [BOU 09]

#### III.3.1 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis : [KHA 13]

Pour chaque bras de l'onduleur, les interrupteurs  $T_i$  et  $T'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur ; Où le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que  $\Delta I$  soit égal à  $h$  ( $h$  est la largeur de la bande d'hystérésis). Le comparateur bascule ou l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que  $\Delta I < h$ . Le contrôle des courants par régulateurs à hystérésis force le courant de phase à suivre le courant de référence. L'imposition des courants sinusoïdaux à la machine garantit un couple électromagnétique non fluctuant. L'approche la plus simple qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence est illustrée par la figure III.4. Les conditions de commutation des trois commutateurs statiques  $S_i$  ( $i=1, 2,3$ ) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques  $S_i$  correspondants de la façon suivante :

$$S_i = -1 \text{ si } i_i \geq I_{ref} + \Delta i$$

$$S_i = -1 \text{ si } i_i \geq I_{ref} - \Delta i$$

$$S_i = S_{i-1} \text{ si } i_i = I_{ref}$$

Tel que :

$i_i = (i = 1, 2, 3)$  : représentent les courants des phases statoriques ( $i_a, i_b, i_c$ ).

$I_{ref} = (i = 1, 2, 3)$  : représentent les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur.

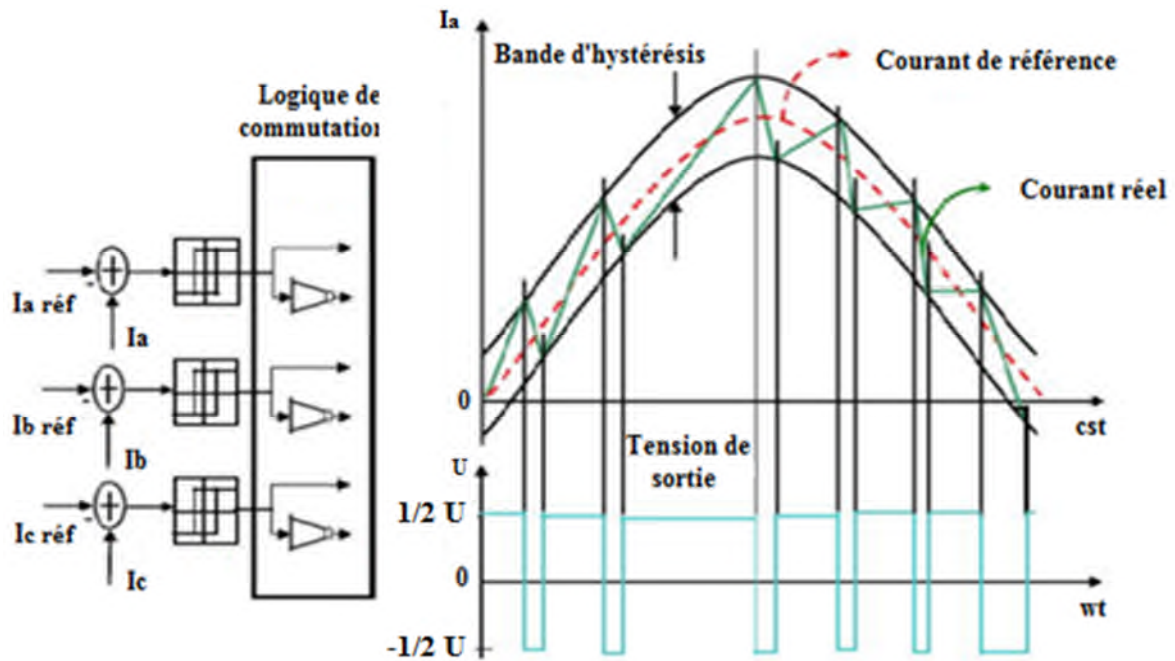


Figure III.4: Illustration de la bande de courant à hystérésis.

#### III.4 Commande de la machine asynchrone :

L'absence totale du découplage entre le flux et le couple dans la machine asynchrone et dont la seule entrée électrique liée au stator, posent des problèmes difficile pour sa commande. [BEN 05] Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. [DEG 13]

### III.4.1 Commande vectorielle :

Le découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle. Elle est aussi commandée par orientation de flux et notée *FOC* (Field Oriented Control). Cette dernière a été proposée en 1971 par *Blashke*. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'état, le second, le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée. [AZA 08]

La commande vectorielle basée sur une régulation classique Proportionnel-Intégral (*PI*), associe dans sa structure des termes de compensation qui permettent de découpler l'axe *d* (qui sera utilisé pour le réglage du flux), de l'axe *q* (qui sera utilisé pour le réglage du couple). Cette configuration permet de réaliser des systèmes d'actionnement électriques ayant les performances exigées par les domaines d'application. [NAI 07]

#### III.4.1.1 Principe de la commande vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes (axe *d* et axe *q*).

Habituellement, la composante d'axe '*d*' du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe '*q*' joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple. [LAH 09]

Dans notre travail, nous nous limitons à la technique de commande par orientation du flux rotorique qui fournit des performances dynamiques plus élevées notamment sur la maîtrise de la dynamique du couple électromagnétique via la maîtrise de la dynamique du flux rotorique. [IDJ 10]. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que :  $\varphi_{rq} = 0$  et par conséquent  $\varphi_{rd} = \varphi_r$ . Cela signifie que le flux  $\varphi_r$  est aligné en permanence avec l'axe  $\ll d \gg$ . Sa composante quadratique est donc nulle et la commande est telle que le flux soit maintenu constant. Cette dernière supposition amène à une simplification importante dans le système d'équations pour l'élaboration de la commande.

L'expression de couple électromagnétique (II.44) devient :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} \varphi_r i_{qs} \quad (III.9)$$

En supposant que la commande maintienne :  $\varphi_{rd} = \varphi_r$  à une constante et  $\varphi_{rq} = 0$ , alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = 0$$

A partir de l'équation (II.42) :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + \mathcal{M} i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + \mathcal{M} i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + \mathcal{M} i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + \mathcal{M} i_{qs} \end{cases} \quad (III.10)$$

D'après l'équation matricielle (II.43) :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{dr} \quad (III.11)$$

Par ailleurs, l'équation,  $v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} = 0$  permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -\frac{R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \quad (III.12)$$

A partir de l'équation :

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds}$$

On peut exprimer le courant  $i_{dr}$  comme suit :

$$i_{dr} = \frac{\varphi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (III.13)$$

Comme  $i_{dr} = 0$

On a alors :  $\varphi_{dr} = \varphi_{md} = \varphi_r = Lm \cdot i_{sd} = M \cdot i_{sd}$

Par ailleurs, la relation (III.10) peut s'écrire de la manière suivante :

$$i_{qr} = -\frac{M \cdot i_{qs}}{L_r} \quad (\text{III.14})$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  les tensions statoriques peuvent s'écrire comme suite :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (\text{III.15})$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r \quad (\text{III.16})$$

Puisque nous avons choisi d'utiliser des correcteurs par hystérésis, il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de moteur n'est pas nécessaire et il n'y a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande. [IDJ 10]

#### III.4.1.2 Estimation de $\varphi_{dr}$ , $\omega_s$ , $\theta_s$ :

On estime les grandeurs rotoriques à partir des grandeurs statoriques car les seules qui sont accessibles, les grandeurs rotoriques, elles ne le sont pas. [ZAR 10]

Donc à partir des équations (II.40) (II.41) et on utilisant la notation de Laplace on obtient :

$$\varphi_r = \frac{M \cdot i_{ds}}{1 + T_r s} \quad (\text{III.17})$$

Tel que :

$$T_r = \frac{L_s}{R_r} \quad (\text{III.18})$$

On obtient aussi la formule de la pulsation rotorique :

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{qs}}{T_r \cdot \varphi_r} \quad (\text{III.19})$$

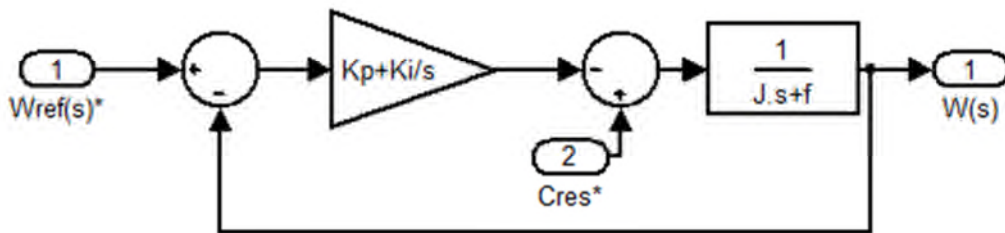
En remplaçant la dernière relation dans l'équation  $\omega_s - \omega_r = p. \Omega = \omega$  on aura :

$$\omega_s = \frac{M.i_{qs}}{T_r.\phi_r} + p. \Omega \tag{III.20}$$

**III.4.1.3 Calculs des régulateurs : [ZAR 10]**

- **Réglage de la boucle de vitesse :**

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (III.5)



**Figure III.5 :** Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul s'écrit :

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_p.s+K_i}{j.s^2+(K_p+f)S+K_i} \tag{III.21}$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2<sup>ème</sup> ordre, dont la forme canonique est la suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2}.s^2+\frac{2.\xi}{\omega_n}.s+1} \tag{III.22}$$

Par comparaison et avec un coefficient d'amortissement  $\xi = 0.7$  et une pulsation  $\omega_n$  donnée, on obtient :

$$K_i = J. \omega_n^2 \tag{III.23}$$

$$K_p = 2. \xi \omega_n - f \tag{III.24}$$

• **Régulateur de flux :**

Pour régler le flux en agissant sur la composante du courant statorique  $i_{sq}$ .

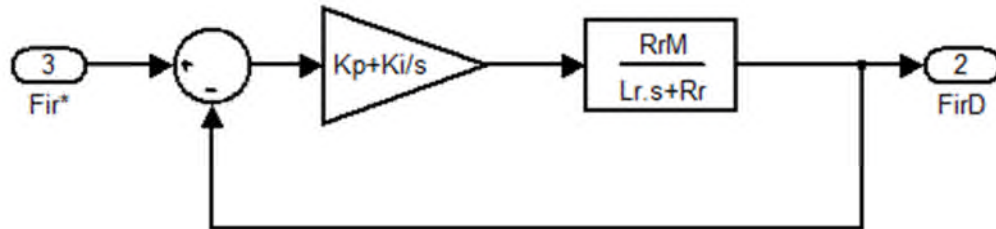


Figure III.6 : Schéma bloc du réglage de flux par un PI.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$\frac{\varphi_{dr}}{\varphi_{ref}} = \frac{(K_p \cdot s + K_i) \cdot L_r \cdot M}{L_r \cdot s^2 + (R_r \cdot M \cdot K_p + R_r) s + R_r \cdot M \cdot K_i} \tag{III.25}$$

Avec la même procédure vue précédemment, on trouve les éléments du régulateur flux :

$$K_i = \frac{L_r \omega_n^2}{R_r \cdot M} \tag{III.26}$$

$$K_p = \frac{2 \xi L_r \omega_n^2}{R_r \cdot M} - \frac{1}{M} \tag{III.27}$$

**III.4.2 Commande par mode glissant :**

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable, c.à.d. des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes. L'importance des contrôleurs par mode glissant réside dans : la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et l'implantation, et la robustesse vis-à-vis la variation des paramètres internes ou externes.

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre les trajectoires du système à atteindre une surface donnée, surface de glissement, pour ensuite y rester. Toutefois, la commande par mode de glissement induit en pratique des commutations haute fréquence connue sous le nom de chattering. Ces commutations peuvent exciter des

dynamiques non désirées qui risquent de déstabiliser, détériorer voire même de détruire le système étudié. Il existe différentes méthodes pour diminuer ce phénomène dont l'une consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue au voisinage de la surface de glissement (fonction saturation ou fonction sigmoïde). [DEG 13]

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

La commande par mode glissement consiste à ramener la trajectoire d'état vers la surface de glissement et de la faire évoluer dessus avec une certaine dynamique jusqu'au point d'équilibre. [DEH 07] Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci (figure III.7) [DEG 13]

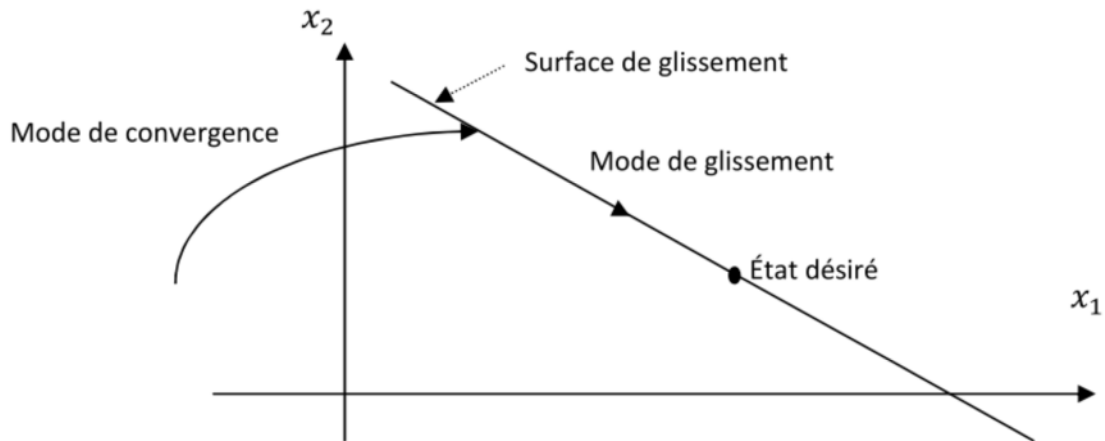


Figure III.7: Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.

#### III.4.2.2 Différentes structures du contrôle par mode de glissement : [ABD 06]

Dans la littérature, on trouve trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation est au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état, la dernière est une structure de régulation avec ajout de la commande équivalente.



**III.4.2.2.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande :**

Cette structure de commande est la plus classique et la plus utilisée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse.

**III.4.2.2.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état :**

C'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique ou le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

**III.4.2.2.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente :**

Présente un réel avantage. Elle permet de pré positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.

**III.4.2.3 Synthèse de la loi de commande : [DEG 13]**

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes :

- Choix de la surface de glissement
- Etablir la condition de convergence
- Déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

**III.4.2.3.1 Choix de la surface de glissement :**

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante (III.28):

$$\dot{X}^n = f(x, t) + g(x, t)u \quad (\text{III.28})$$

Où  $f$  et  $g$  sont des fonctions non linéaires,  $g$  est supposée inversible.

$u$  : L'entrée du système.

$x$  : état du système.

Soit  $x_d$  la consigne désirée et  $e$  l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x - x_d \quad (\text{III.29})$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit :

$$s(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (\text{III.30})$$

Où

$n$  : Degré relatif, représentant le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

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

$e(x)$  ; L'écart de la variable à réguler  $e(x) = x_{ref} - x$

**III.4.2.3.2 Condition d'existence du mode de glissement :**

Le choix de la fonction de glissement étant fait, la deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer ( $S=0$ ). Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que  $S$  soit attractif. Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante :

$$v(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{III.31})$$

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement  $s(x, t)$  tende vers 0 est que la dérivée temporelle de  $v$  soit définie négative :

$$\dot{s} \cdot s < 0 \quad (\text{III.32})$$

Si la condition (III.32) est vérifiée, alors la variable de glissement et sa dérivée sont de signe contraire quel que soit le temps et que 0 est un centre attracteur pour S. Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time »  $t_r$  dépend directement du choix de S. Pour une convergence en temps fini, la condition (III.32) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de  $\eta$ -attractivité et donnée par :

$$\dot{s} \cdot s \leq -\eta |s|, \eta > 0 \quad (\text{III.33})$$

#### III.4.2.3.3 Calcul de la commande :

Une fois la surface de glissement choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la condition nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. [KEN 12]

La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $\{S=0\}$ . Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface :

$$\begin{aligned} S &= 0 \\ \dot{S} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

Où  $u_{\acute{e}q}$  est déduite de la relation  $\dot{S} = 0$  : Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande u. Cependant, cette commande ne force pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement. Ainsi, la commande u est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue assurant une convergence et un régime glissant.

$$u = u_{\acute{e}q} + u_d \quad (\text{III.35})$$

Avec

$$u_d = -\alpha \text{sign}(s)$$

$\alpha$  est une constante positive,  $\text{sign}$  est la fonction signe et  $u_d$  est la commande discontinue

#### III.4.2.4 Le broutement (chattering) : [BEK 10]

Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu par le broutement soit en anglais "*chattering*" (figure III.8). En régime permanent, ce dernier apparaît comme une oscillation de haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction *signe* (*sgn*). Ce phénomène de *chattering* est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode glissant, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou au moins réduire ses effets.

L'une des solutions envisagées consiste à introduire une bande d'arrêt autour de la surface de commutation.

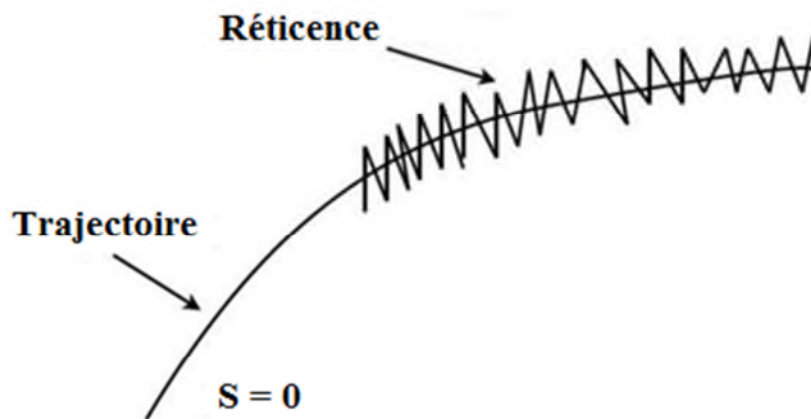


Figure III.8 : Le phénomène de broutement.

#### III.4.2.5 Solutions pour atténuer le phénomène de broutement : [DEG 13]

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, mode glissant d'ordre supérieur.

##### III.4.2.5.1 Solution de couche limite :

Cette solution, consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface, Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation :

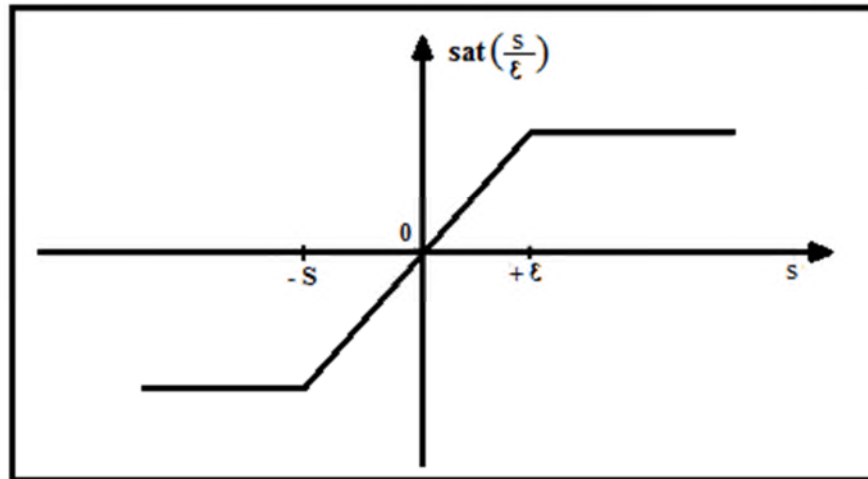


Figure III.9 : Fonction saturation.

$$\begin{cases} \text{sat}(s) = \frac{s}{\epsilon} & \left\{ \begin{array}{l} \text{si } \left| \frac{s}{\epsilon} \right| < 1 \\ \text{si } \left| \frac{s}{\epsilon} \right| > 1 \end{array} \right. \\ \text{sign}(s) \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

$\epsilon$  : Largeur du seuil de la fonction de saturation.

D'autres fonctions existent telles que les fonctions,  $\tanh(S/\epsilon)$ ,  $2\pi\arctan(S/\epsilon)$ ,  $\epsilon$  représente une constante de petite valeur, le système ne converge plus vers la valeur désirée, mais vers un voisinage de cette dernière dans ce cas, le système est dit en régime pseudo-glissant. Bien que cela permette d'atténuer le phénomène de réticence, la précision par rapport à l'objectif fixé, la robustesse de la commande et le temps de réponse s'en trouvent dépréciés.

Cette méthode est paramétrée par une constante positive  $\epsilon$  réglée pour avoir un bon compromis entre réduction du chattering et conservation de la robustesse. Dans les méthodes présentées ici, plus  $\epsilon$  est petit, plus l'approximation tend vers la fonction signe, et donc meilleure est la robustesse, au détriment de la réduction du chattering.

#### III.4.2.5.2 Solution par des modes glissants d'ordre supérieur : [BAT 00]

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le Chattering.

**III.4.2.6 Les avantages de la commande par mode glissant : [ZOU 10]**

Cette commande présente les caractéristiques suivantes :

- La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge et perturbations.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.
- La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de  $v$ .

**III.4.2.7 Application :****III.4.2.7.1 Calcul de la surface de régulation du flux rotorique :**

A partir de la loi de  $\eta$ -attractivité donnée par l'équation (III.33):

On aura :

$$\dot{S} \text{Sign}(S) \leq -\eta \quad (\text{III.37})$$

L'erreur du flux rotorique est définie par :

$$e = \varphi_r^* - \varphi_r \quad (\text{III.38})$$

Pour  $n = 1$ , la surface du flux rotorique peut être définie à partir de l'équation (III.38) comme suit :

$$S(\varphi_r) = \varphi_r^* - \varphi_r \quad (\text{III.39})$$

Sa dérivée :

$$\dot{S}(\varphi_r) = \dot{\varphi}_r^* - \dot{\varphi}_r \quad (\text{III.40})$$

Donc :

$$\dot{S}(\varphi_r) = \dot{\varphi}_r^* - \frac{M}{\tau_r} i_{ds} + \frac{1}{\tau_r} \varphi_r \quad (\text{III.41})$$

$$\text{Avec } \tau_r = \frac{L_s}{R_r}$$

On remplace (III.41) dans (III.37) :

On obtient :

$$i_{ds}^* = \frac{\varphi_r}{M} + K_{\varphi_r} \cdot \text{Sign}(S(\varphi_r)) \quad (\text{III.42})$$

Avec :

$$K_{\varphi_r} = \frac{\tau_r}{M} \eta$$

#### III.4.2.7.2 Calcul de la surface de régulation de la vitesse :

L'erreur de la vitesse est définie par :

$$e = \Omega^* - \Omega \quad (\text{III.43})$$

Pour  $n = 1$ , la surface du flux rotorique peut être définie à partir de l'équation (III.43) comme suit :

$$S(\Omega) = \Omega^* - \Omega \quad (\text{III.44})$$

Sa dérivée

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \quad (\text{III.45})$$

Donc :

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \left[ \frac{1}{J} \left( P \frac{M}{L_r} \varphi_r i_{qs} - C_r \right) \right] \quad (\text{III.46})$$

On remplace (III.46) dans (III.37) :

On obtient :

$$i_{qs}^* = \frac{L_r J}{PM\varphi_r} \dot{\Omega}^* + K_{\Omega} \text{sign}(S(\Omega)) + \frac{L_r C_r}{PM\varphi_r} \quad (\text{III.47})$$

Avec

$$K_{\Omega} = \frac{L_r J}{PM\varphi_r} \eta$$

Le gain  $K$  est choisi positif .Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et s'il est choisi très grand, nous aurons de fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande.

Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de chattering), ou même détériorer l'organe de commande. [TAM 00]

Pour réduire l'effet de la réticence (chattering) on a remplacé le bloc sign par la fonction tangente hyperbolique.

### **Conclusion :**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit la commande MPPT, qui permet la recherche de point précis de puissance maximale sous des variations des conditions environnementales. Dans notre travail on a choisi l'algorithme Perturbation et observation "P&O" car cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple et peu de paramètres de mesure.

La deuxième partie de ce chapitre, est consacrée à la présentation du principe de la commande vectorielle et de la théorie du contrôle par mode glissant.

La commande vectorielle permet d'avoir une dynamique proche de celle de la machine à courant continu, autrement dit, une dynamique asymptotiquement linéaire et découplée. Cependant, cette structure de commande nécessite que les paramètres de la machine soient précis. Ceci exige une bonne identification des paramètres. En conséquence, le recours à des algorithmes de commande robuste, pour maintenir un niveau de découplage et de performance acceptable, est nécessaire. La commande à structure variable (CSV) qui, par sa nature est une commande non linéaire, possède cette robustesse. Le réglage par mode de glissement est fondamentalement une méthode qui force la réponse à glisser le long d'une trajectoire prédéfinie. Cependant, cette technique de commande a un inconvénient de commutation aux hautes fréquences (*chattering*).



# Chapitre IV

*Simulation du système de pompage  
photovoltaïque*

**Introduction :**

Après avoir défini et modélisé les différents composants du système de pompage photovoltaïque, puis expliqué le principe des deux commandes vectorielle et mode glissant dans les chapitres précédents, dans ce chapitre, on va présenter la simulation du système global avec les deux commandes dont l'objectif est la comparaison entre ces deux dernières. Des résultats de simulations seront présentés et commentés dans des conditions de fonctionnement fixe et variable.

Des différentes simulations seront effectuées sur le système étudié qui est composé de huit panneaux photovoltaïque en série de 110W, d'un hacheur survolteur, d'un onduleur de tension et d'un groupe motopompe (MAS à cage d'écureuil, pompe centrifuge). La simulation de ces systèmes se fait sous Matlab/Simulink.

**IV.1 Simulation du système de pompage contrôlé par la commande vectorielle :**

Le schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté est représenté sur la figure (IV.1) ci-dessous. La vitesse de référence ( $\Omega_{ref}$ ) est calculée en fonction de la puissance photovoltaïque optimisée par l'algorithme MPPT "P&O", elle est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{ref} = \sqrt[3]{(P_{pv\_tot} * \Omega_n * \eta) / P_n} \quad (IV.1)$$

Avec :

$P_{pv\_tot}$  : Puissance photovoltaïque totale (W)

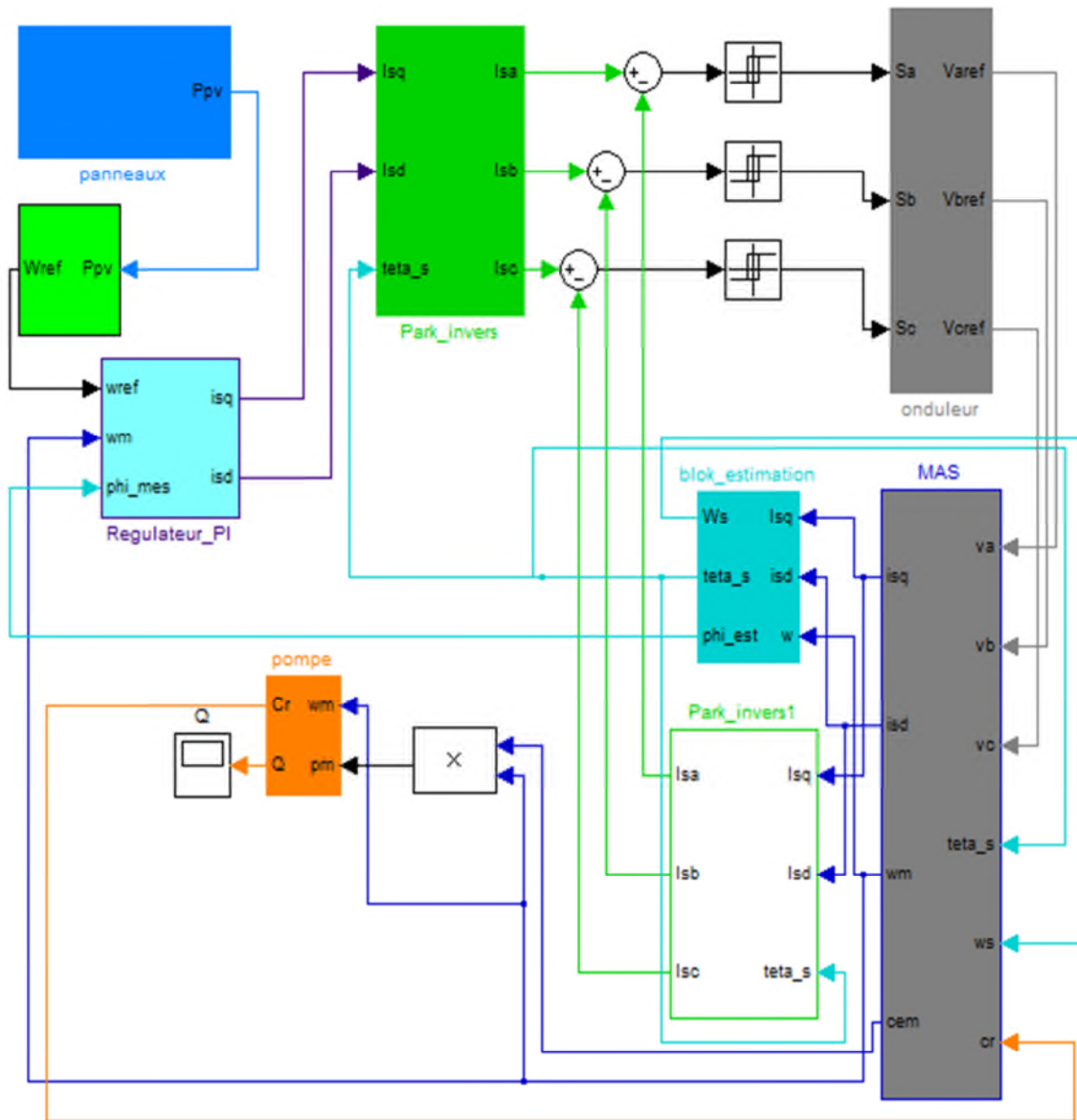
$\Omega_n$  : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s)

$\eta$  : Rendement du groupe motopompe

$P_n$  : Puissance nominale (W)

Après régulation de vitesse, le couple électromagnétique est obtenu. Le courant  $I_{sq}$  de référence est déterminé à partir du couple de référence. Le courant  $I_{sd}$  de référence est obtenu après régulation du flux à sa valeur de référence  $\varphi_{ref} = 0.7 \text{ Wb}$ . La sortie des régulateurs de vitesse et de flux déterminent les courants  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  de référence, après transformation inverse de Park on obtiendra les courants  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ,  $I_{sc}$  de références qui seront comparés aux courants  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ,  $I_{sc}$  mesurés. Le contrôle des courants statoriques se fait par hystérésis pour déterminer les signaux de commande de l'onduleur MLI.

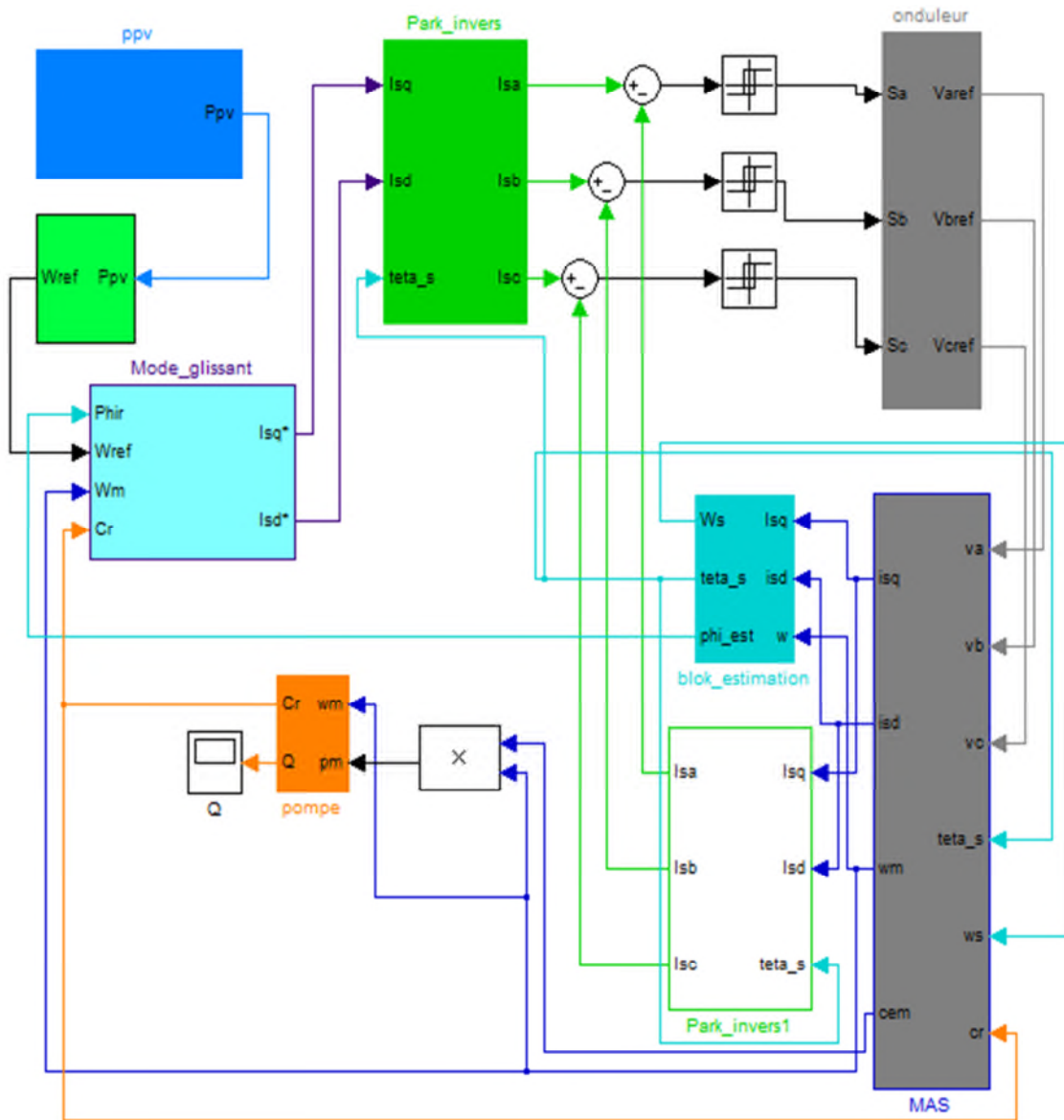
Les courants  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$  de la MAS seront utilisés dans le bloc d'estimation pour avoir le flux estimé et la pulsation des grandeurs statoriques.



**Figure (IV.1) :** Schéma globale du système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande vectorielle.

#### IV.2 Simulation du système de pompage contrôlé par le mode glissant :

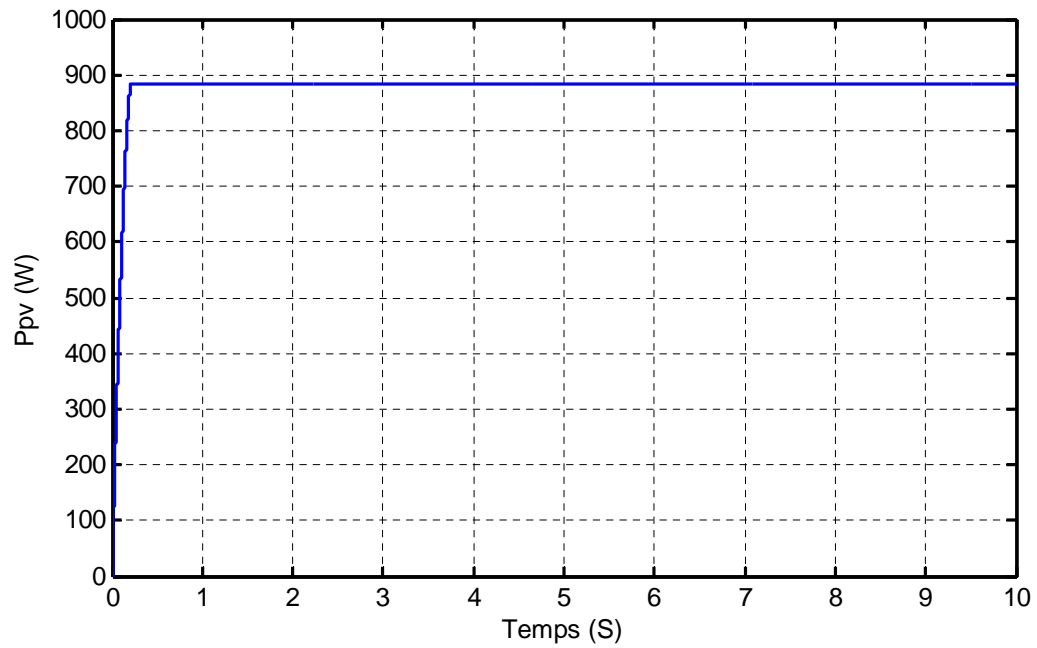
Le schéma global du réglage par mode glissant est le même mais nous avons remplacé les régulateurs PI par le block de réglage par mode glissant comme le montre la figure (IV.2)



**Figure (IV.2) :** Schéma global du système de pompage photovoltaïque contrôlé par le mode glissant.

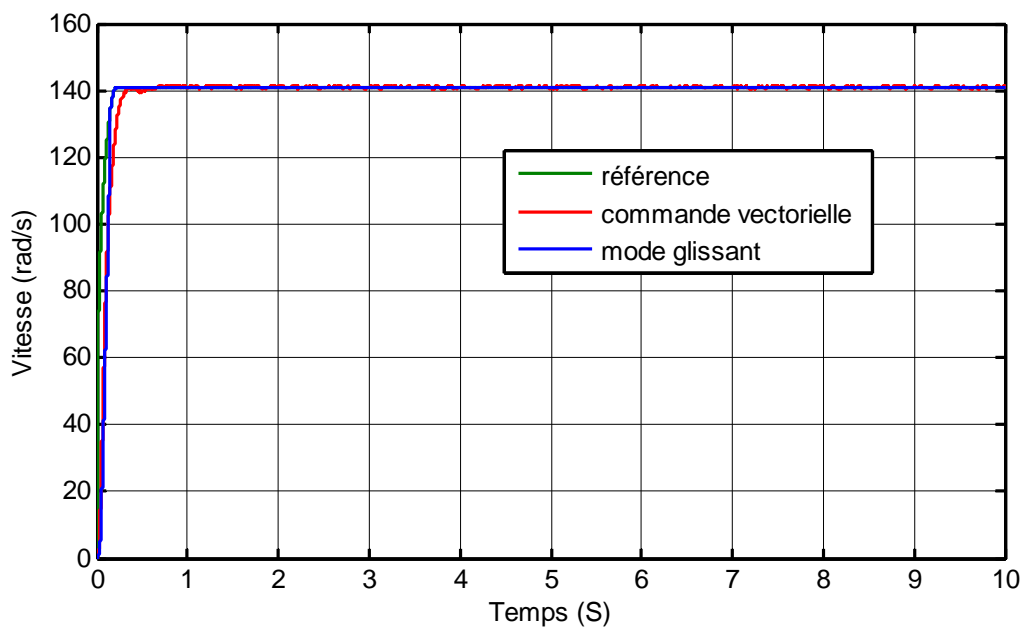
**IV.3 Fonctionnement sous des conditions fixe d'ensoleillement et de température :**

Pour un échelon d'irradiation  $G=1000W/m^2$  et  $T_c=25^{\circ}C$ , on obtient une puissance  $P_{pv}$  de 882 W représenté par la figure ci-dessous :

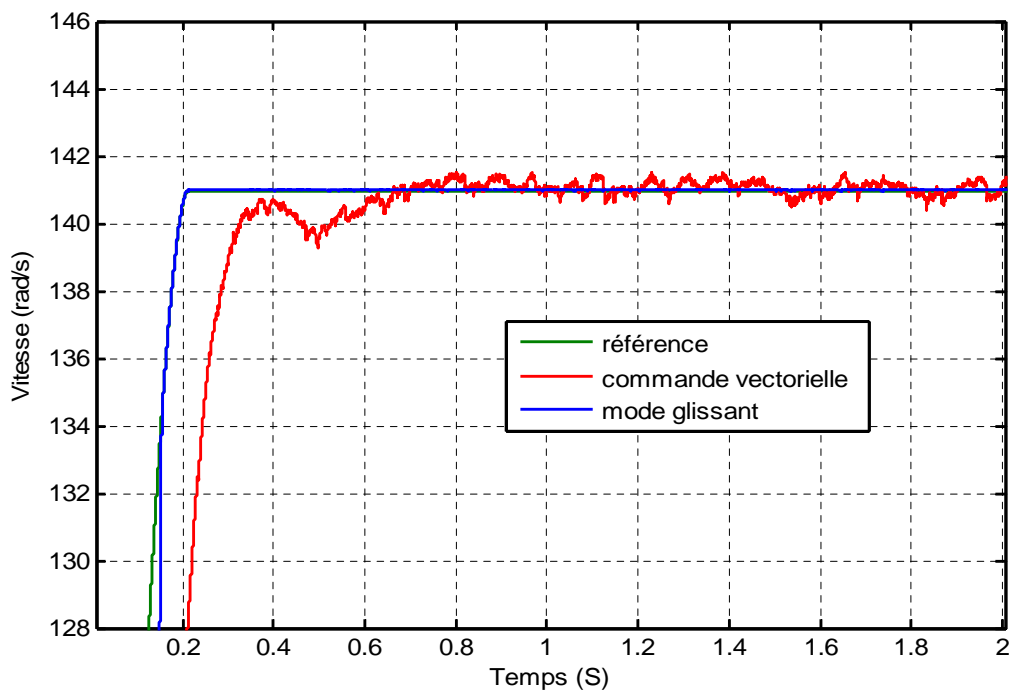


**Figure IV.3 :** L'évolution de la puissance ( $G=1000\text{W/m}^2$ ,  $T_c=25^\circ\text{C}$ ).

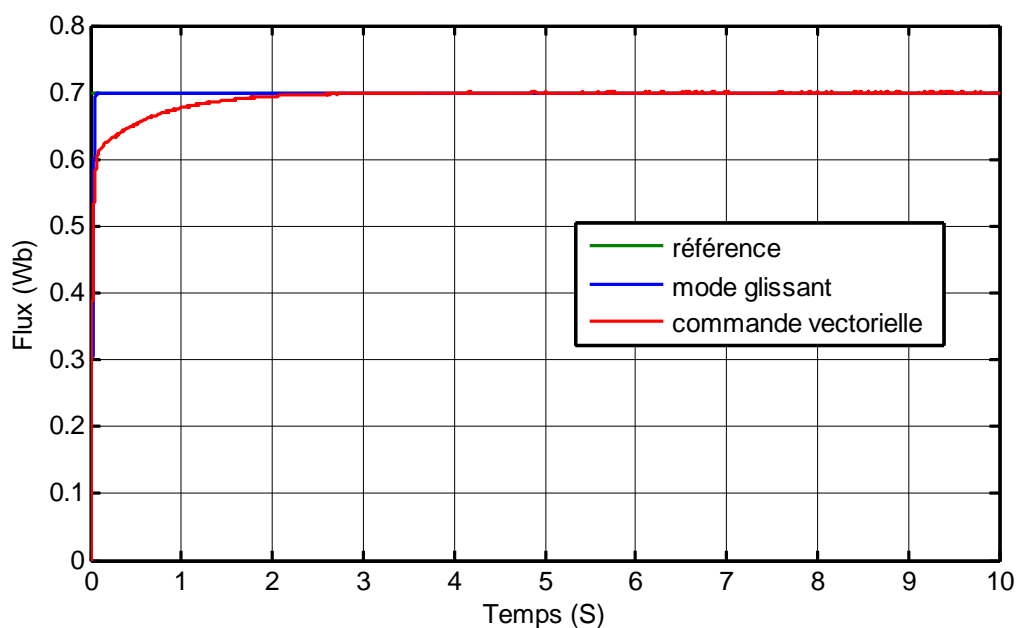
Le but de cette simulation est de comparer entre la vitesse et le flux obtenu par les deux commandes (commande vectorielle et contrôle par mode glissant). Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous.



**Figure IV.4 :** L'évolution de la vitesse ( $G=1000\text{W/m}^2$ ,  $T_c=25^\circ\text{C}$ ).



**Figure IV.5 :** Zoom sur l'évolution de la vitesse ( $G=1000\text{W/m}^2$ ,  $T_c=25^\circ\text{C}$ ).



**Figure IV.6 :** L'évolution de flux ( $G=1000\text{W/m}^2$ ,  $T_c=25^\circ\text{C}$ ).

D'après les figures (IV.4) et (IV.6), on voit bien que la vitesse et le flux suit les valeurs de référence surtout dans le cas de contrôle par mode glissant pas d'oscillation au niveau de la vitesse, et le flux atteint rapidement sa valeur de référence par rapport à la commande vectorielle.

Vu les performances du contrôle par mode glissant par rapport à la commande vectorielle, alors on va présenter les résultats de simulation du système globale de pompage photovoltaïque avec cette méthode de réglage.

#### IV.4 Fonctionnement sous des conditions variables :

Pour comprendre le comportement du système face aux changements climatiques, on va appliquer différent profile (ensoleillement et température) et on relèvera les résultats de simulation du système photovoltaïque et du système globale.

Les figures (IV.7 et IV.8) représentent respectivement les profils d'ensoleillement et de température appliqués au système photovoltaïque.

On voit bien que le courant et la puissance photovoltaïque suivent l'allure du profil d'ensoleillement, et la tension photovoltaïque présente de petite variation dû au changement de température comme la montre les figures (IV.9-11).

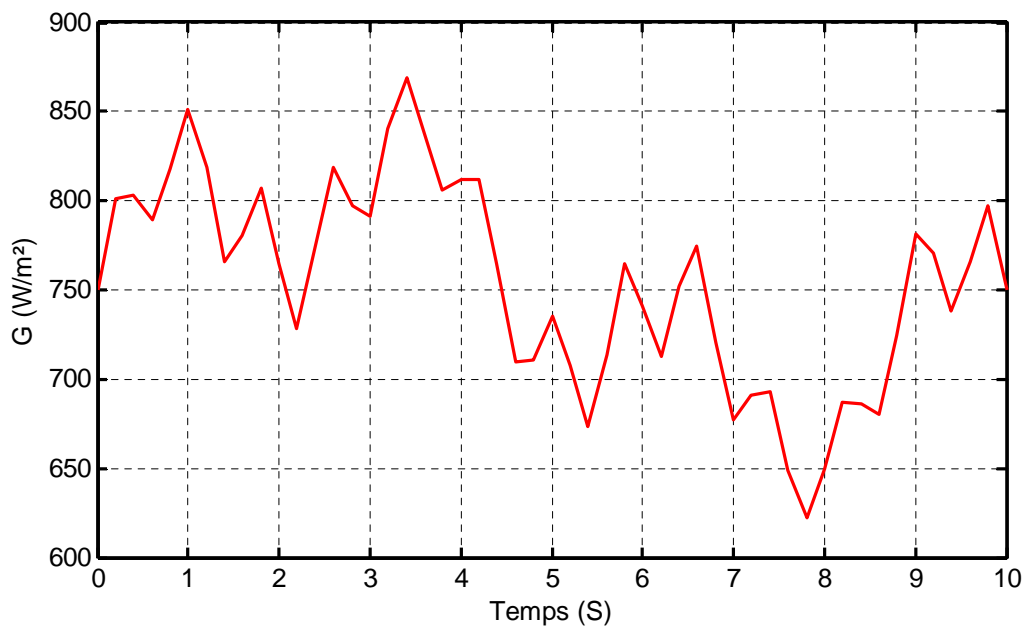


Figure IV.7 : L'évolution de l'irradiation.

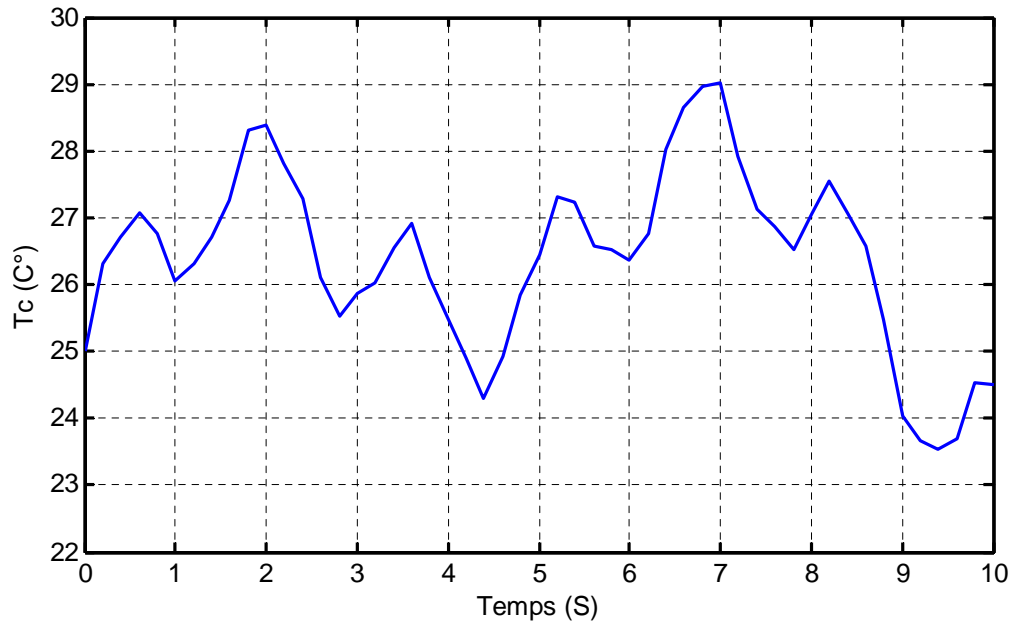


Figure IV.8: L'évolution de la température.

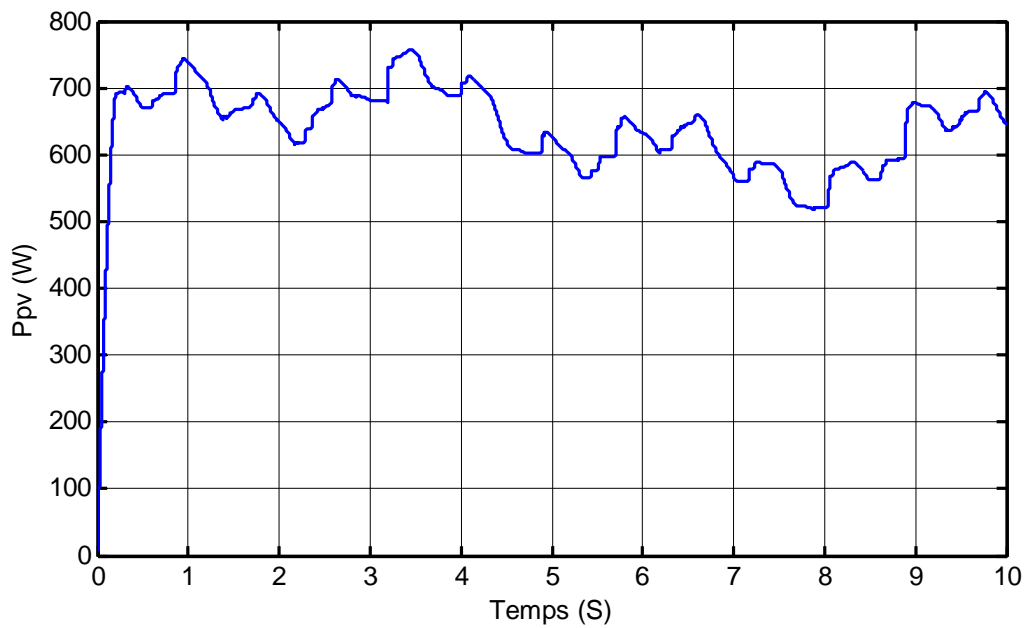
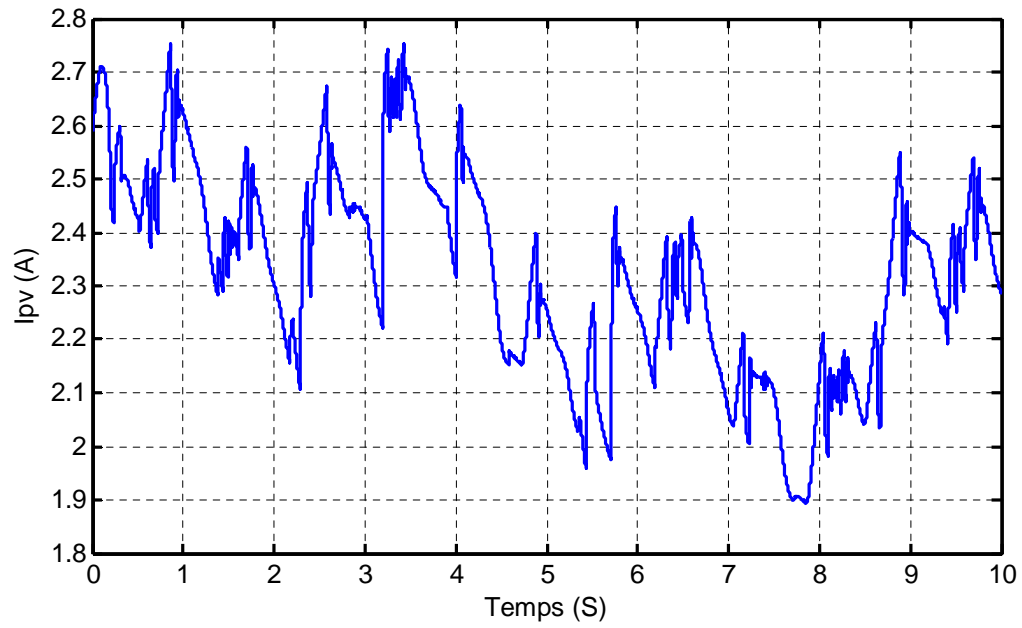
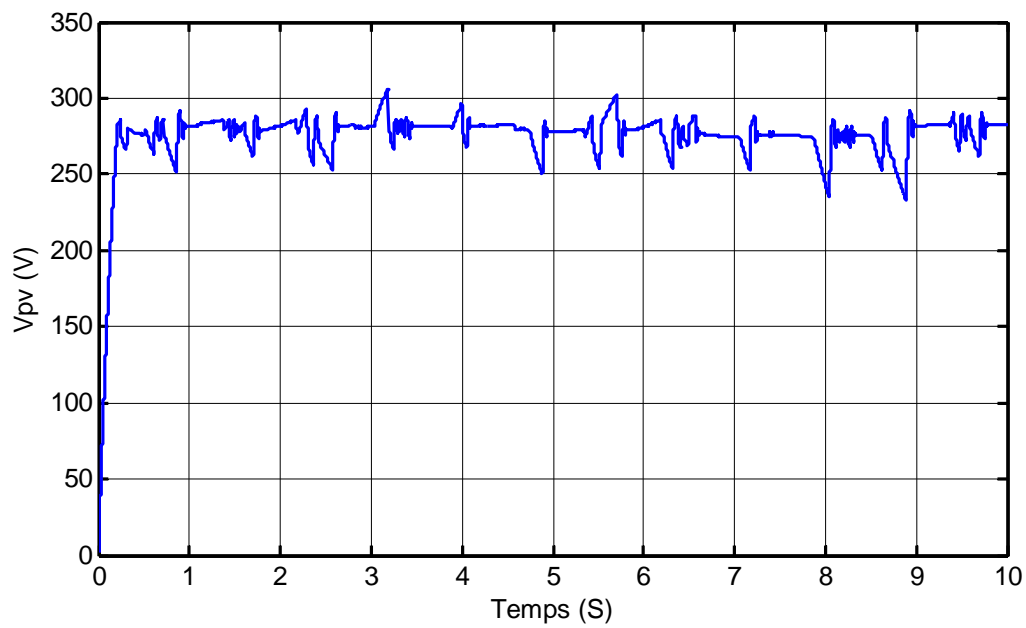


Figure IV.9 : L'évolution de la puissance.





**Figure IV.10** : L'évolution de courant  $I_{pv}$  (A).



**Figure IV.11** : L'évolution de la tension  $V_{pv}$ (V).

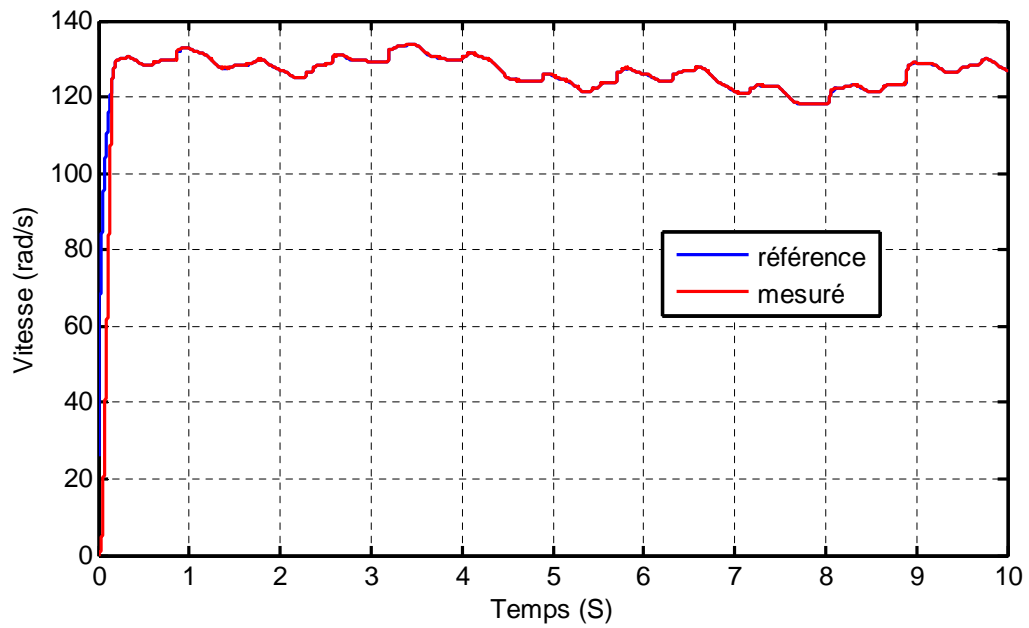


Figure IV.12 : L'évolution de la vitesse.

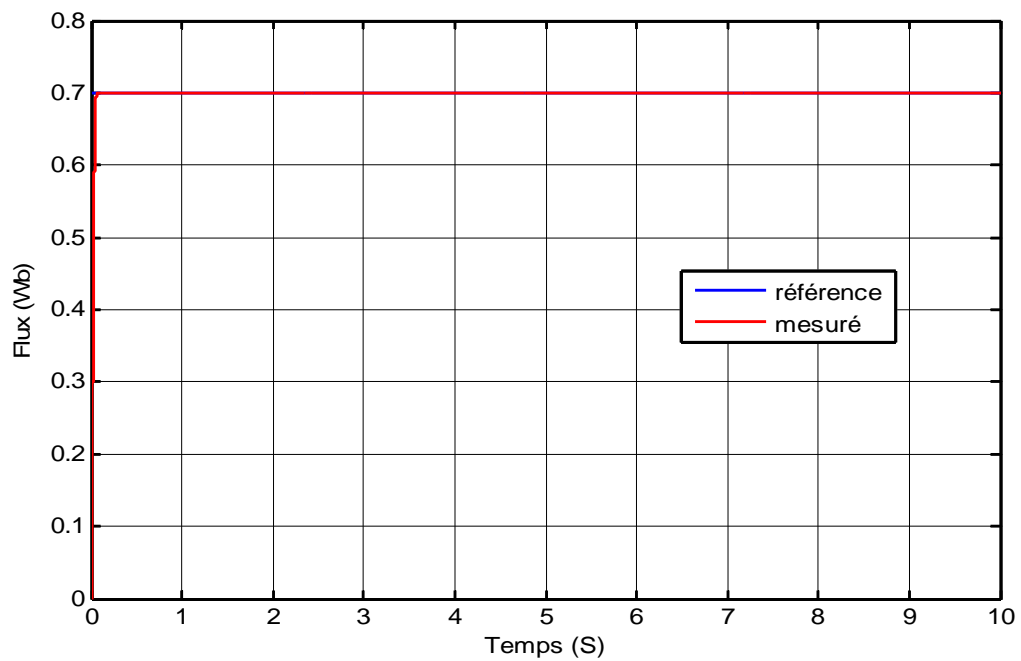


Figure IV.13 : L'évolution de flux.

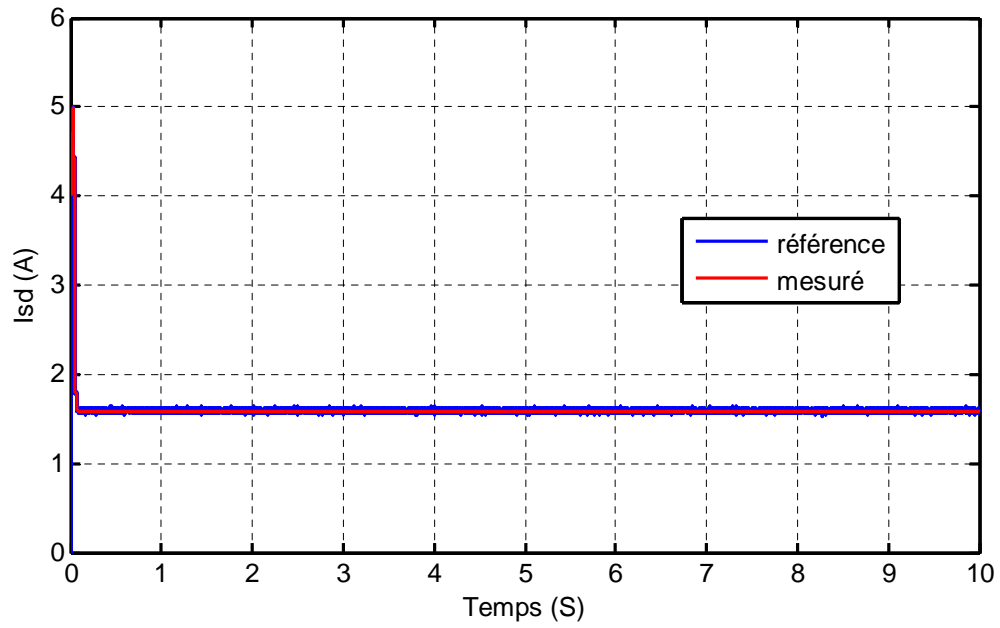


Figure IV.14 : L'évolution de courant  $I_{sd}$ .

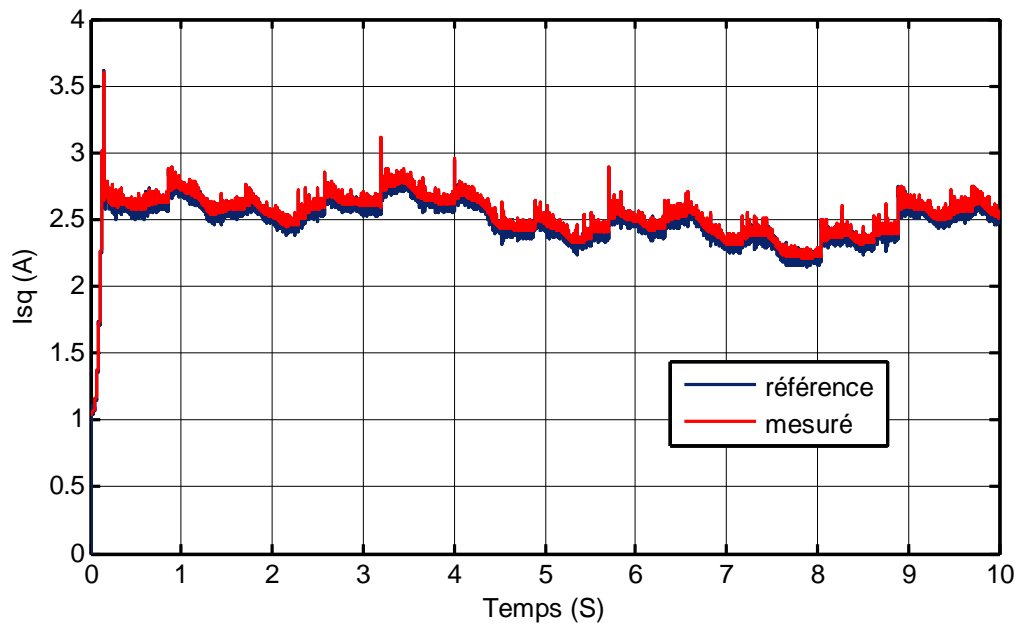


Figure IV.15 : L'évolution de courant  $I_{sq}$ .

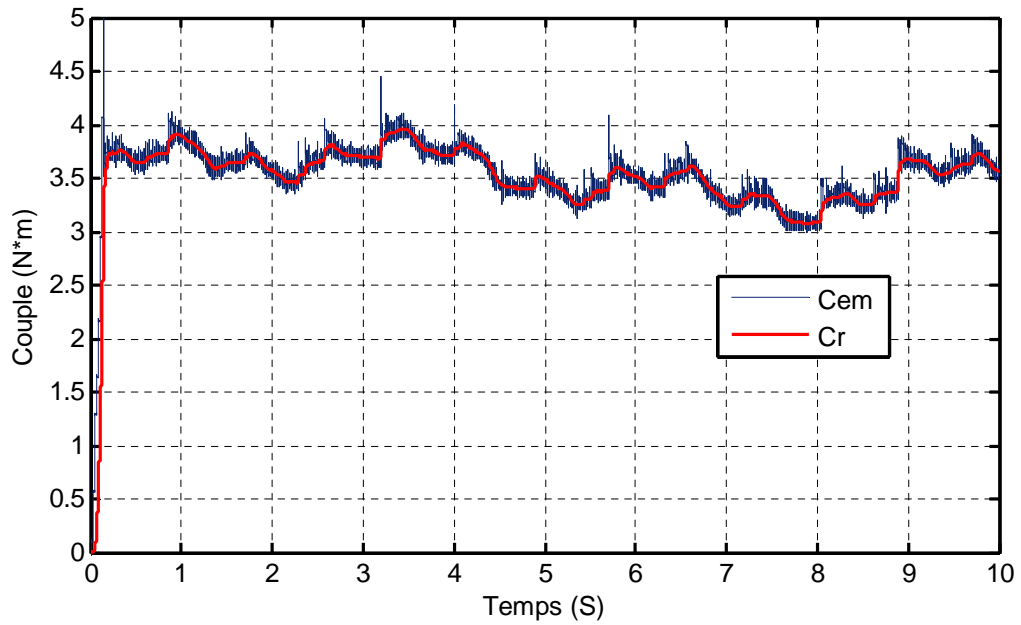


Figure IV.16 : L'évolution de couple.

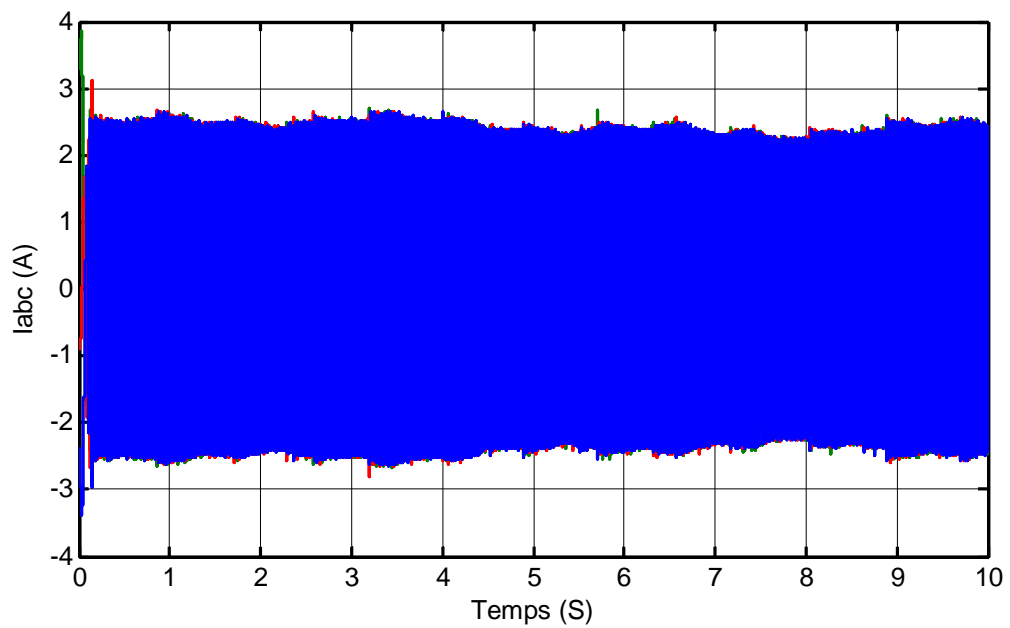
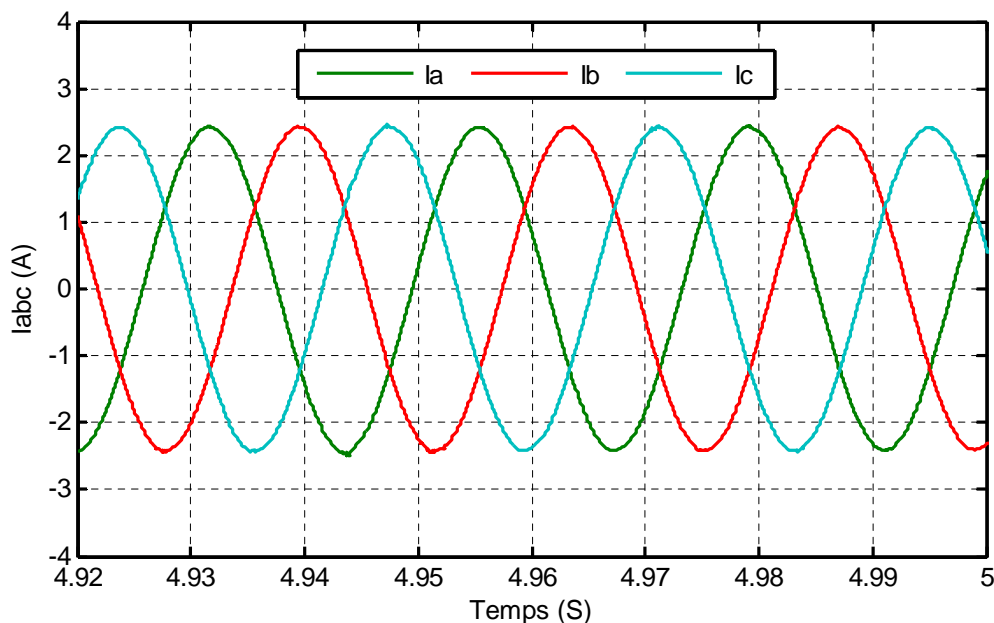
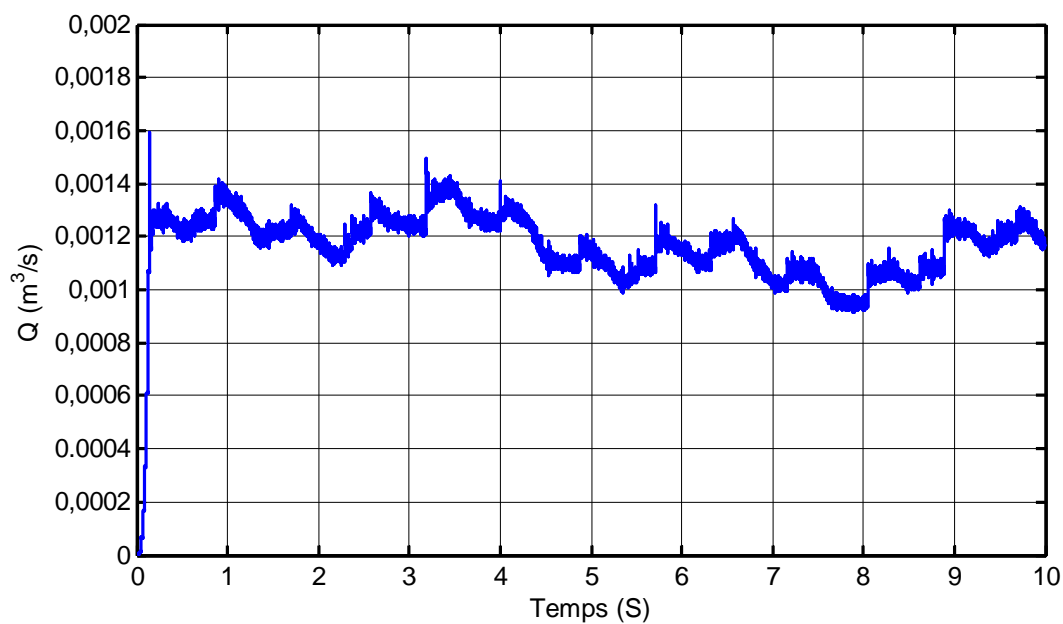


Figure IV.17 : L'évolution des courants statorique.



**Figure IV.18** : Zoom sur les courants statorique.



**Figure IV.19** : L'évolution de débit.

La vitesse de la MAS figure (IV.12) suit rapidement et sans dépassement sa valeur de référence obtenue à partir de la puissance photovoltaïque. D'après les figures (IV.13-16), on remarque que le système répond positivement à ce test, le courant  $I_{sd}$  suit la référence du flux qui aussi suit sa référence fixée à 0.7, le courant  $I_{sq}$  suit sa référence qui est l'image du

couple. Cependant les allures du flux et de courant  $I_{sd}$  ne variaient pas, l'erreur entre le courant de référence et le courant  $I_{sd}$  du système est presque nulle. On constate d'après les figures (IV.17-19) que les courants statoriques de la MAS sont sinusoïdaux et que le débit suit la variation de la vitesse qui est dû aux variations des conditions météorologiques.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons appliqué les deux commandes vectorielle (avec régulateur PI et par mode glissant) à notre système de pompage photovoltaïque composé de 8 panneaux photovoltaïques associés à un convertisseur DC/DC élévateur de tension commandé par un algorithme d'optimisation MPPT qui permet le fonctionnement du générateur photovoltaïque à son maximum de puissance quelle que soit les conditions météorologiques. Un groupe motopompe est alimenté par le générateur photovoltaïque à travers un onduleur de tension MLI.

La comparaison des résultats de simulation des deux commandes précédente nous a permis de voir que le contrôle par mode glissant présente les meilleures performances.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Notre travail c'est porté sur le contrôle d'un système de pompage photovoltaïque, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, des convertisseurs d'énergies (DC/DC, DC/AC), d'un groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge) et un réservoir d'eau. Pour cela nous avons appliqué deux commandes vectorielle (régulateur PI et par mode glissant), dont le but est de choisir la commande la plus robuste pour la régulation de vitesse de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le premier chapitre de ce travail est consacré à une étude générale sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes de pompages. A la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système à étudier.

Après nous avons fait une modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque, et on a simulé un panneau photovoltaïque pour différentes ensoleillements et températures afin de tracer les différentes caractéristiques (courant/tension et puissance / tension).

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté l'optimisation du système photovoltaïque. Pour exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum une commande MPPT a été utilisée pour permettre le fonctionnement au PPM. On a utilisé l'algorithme Perturbation et observation "P&O" car il a une structure de régulation simple et peu de paramètres de mesure. Ensuite nous avons présenté le principe de la commande vectorielle et la théorie du contrôle par mode glissant.

Dans le dernier chapitre, le système de pompage photovoltaïque a été simulé on utilisant les deux commandes que nous avons présentées précédemment. Les résultats de simulation montrent que les réponses avec le contrôle par mode glissant sont plus rapides et plus robustes vis-à-vis des variations d'éclairement et de la température. Les résultats de simulation montrent la fiabilité et la robustesse de cette commande.

Enfin, on propose quelques perspectives :

- L'implémentation des commandes présentées dans ce mémoire dans le but de vérifier expérimentalement les résultats trouvés.
- L'optimisation du système de pompage photovoltaïque par d'autres techniques d'optimisation (IC, logique flou...)



# REFERENCES

## *Références bibliographiques*

- [**ABD 06**] B. ABDELOUHAB et H. ADEL, « Commande par mode de glissement d'une suspension active d'un véhicule », PFE d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2006.
- [**ACH 07**] R. ACHOURI et M. HIDOUCHE « Commande vectorielle de la machine asynchrone », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique Université El-Harrach, Alger 2007.
- [**AKA 10**] T. AKASSEWA « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » Thèse de doctorat. Université de Nancy1 2010.
- [**ANT 06**] F. ANTONY, C. DÜSHNER et K. REMMERS, « Le photovoltaïque pour tous conception et réalisation d'installation », livre édité par : INES, 2006.
- [**AOU 14**] S. AOUI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de magister. Université F. ABBAS de Sétif, 2014.
- [**ARR 07**] M. ARROUF « Optimisation de l'ensemble onduleur moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque » Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2007.
- [**AZA 08**] R. AZAIZIA, « Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux » Mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2008.
- [**BAT 00**] BARTOLINI, G. FERRARA, A. USAI, E and UTKIN, V.I , "On multi-Input chattering free second order sliding mode control", IEEE Trans. Auto. Control. vol. 45, n°9. 2000.
- [**BEN 05**] N. BENYAHIA, K. SRAIRI, M. MIMOUNE « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique » Revue, courrier du savoir vol. N°06,pp.147-150, Université Biskra,2005
- [**BEN 09**] Z. BENDJELLOULIB « La contribution a la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de magister, Université de Bechar, 2009
- [**BEN12**] S. BENSMAIL « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques », Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université A. MIRA. Bejaia, 2012

- [BEK 10] Y. BEKAKRA «Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées » Mémoire de magister, Centre Universitaire d'El-Oued, 2010.
- [BEL 08] M. BELHADJ« Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » Mémoire de magister en université de Tlemcen 2008.
- [BEL 12] A. BELHOUCINIE et ZAIDI « Étude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » mémoire de master université de Bejaia 2012.
- [BEL 14] : F. BELDJOUDI et F. LAKHDARI « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries » Mémoire de master université de Bejaia 2014.
- [BEL 15] Dr S. BELAID Cours Energie Solaire photovoltaïque. Université A. Mira de Bejaia 2015. Site : <http://elearning.univ.bejaia.dz/>
- [BES 00] P. BESSEMOULIN, J. OLIVIERI «Rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la météorologie série 8-N 31, pp (42-59), 2000.
- [BOU 12] L. BOUDRAHEM, L. DJOUDI, « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de master Université de A. MIRA Bejaia 2012
- [BOU 10] A. BOURAIOU « Diagnostic de défauts par logique floue » Mémoire de magister université d'Annaba 2010.
- [BOU 07] DJ. BOUKHERS « Modélisation et commande des machines électriques » Mémoire de magister Université Mentouri de Constantine 2007.
- [BER 09] C. BERNARD, C. SEBRAO-OLIVIRA, B. LAVAL, C. VAUDOUEUR «Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique flou», Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energies renouvelables, université de technologie Compiègne, 2009.
- [BUY 02] A. BUYERS « Les systèmes photovoltaïques » Article Canada 2002. Site : <http://www.rncan.gc.ca>
- [CAB 08] C. CABAL « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque» Thèse Doctorat Université de Toulouse III 2008
- [CAR 98] J.P. CARON, J.P. HAUTIER « modélisation et commande de la machine asynchrone » Edition technique France\_1998.

- [**CHE 07**] R. CHENNI « Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2007.
- [**DEG 13**] I. DEGHBODJI « Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d'ordre supérieur » Mémoire de magistère Université Constantine 1. 2013
- [**DEH 07**] B. DHIBA, A. MEROUFEL, A. BENDAOU, M. B. BENABDELLAH. « Commande en vitesse par mode de glissement d'un moteur asynchrone avec limitation du courant par poursuite d'une surface de commutation » Article, Volume 48, Nombre 3. 2007
- [**DEN 07**] BOUALEM, DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative » Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif 2007.
- [**GAJ 07**] B. GAIDDON, « Les Onduleurs pour systèmes photovoltaïques fonctionnement, état de l'art et étude des performances » site internet : [www.hespul.org](http://www.hespul.org) Rapport, 2007.
- [**HAD 05**] A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM et A. GHABI « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 8. 2005
- [**IDJ 10**] K. IDJEDARENE « Contribution à l'étude et la commande de génératrice asynchrone à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes » Thèse de doctorat Université de Bejaia, 2010
- [**KHA 13**] M. KHAMI « Amélioration des performances de régulation d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique Neuro-flou » Mémoire de master Université d'Ouargla 2013
- [**KEN 12**] K. KENDOUCI « Contribution à la commande sans capteur mécanique d'une machine synchrone à aimants permanents » Thèse de Doctorat. Université d'Oran, 2012
- [**LAH 09**] D. LAHOUEL, « Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de magistère, Université de Batna, 2009.
- [**LOU 13**] M.L. LOUAZENE, D. KORICHI, B. AZOUI « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque Application sur le Site de Ouargla » ICEO 2013 Université d'Ouargla
- [**MUK 99**] R.P. MUKUND, « Wind and Solar Power Systems » Université Merchant Marine 1999.
- [**MEZ 10**] F. MEZIANI « Détermination du gisement solaire par traitement d'image MSG » Mémoire de magister. Université de M. MAMMERI de Tizi-Ouzou. 2010.

- [MIC 03] E. MICHEL, D. ARNAUD, « Énergie photovoltaïque » comité scientifique et technique des industries climatique COSTIC, FNDNE n°12 document technique réédition 2003.
- [MCE 12] A. MCEVOY, L. CASTANER, T. MARKVART « Solar cells » 2<sup>ème</sup> Edition Elsevier 2012.
- [MEZ 14] M. MEZZAI, S. MOULOUDJI « Contribution à l'étude d'un système de pompage PV » Mémoire de master université de Bejaia 2014.
- [NIK 03] M. NIKOZ, H. DEHBONEI, C.NAHER. «A dsp-controlled photovoltaic system with maximum power point tracking» Revue Electrical Engineering and Information Technology ITEE, pp : 1-6, Australie 2003.
- [NAI 07] A. NAIT SEGHIR, « Contribution a la commande adaptative et neuronale d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique, El-Harrach, 2007.
- [QUA 12] Quatorzième inventaire Observer chiffres 2011 de la production d'électricité dans le monde Edition 2012. Site : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosnucleaire/darkcartes>.
- [SLA 11] F.SLAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire magister université de Sétif 2011.
- [TAM 00] H.TAMRBED et T.AZAROBRA « Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone » proceedings de la conférence CEE'00, 2000.
- [THO 98] D.THOMAS, R. JIMMY, S.ERIC, S.BOCAR « Le pompage photovoltaïque 'manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens' ». Université d'Ottawa. Canada, 1998
- [TRA 11] F.TRAHI «Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA », mémoire de magister, université de M. MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2011.
- [ZAR 10] L. ZAROUR « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque éolien hors réseau »; Thèse doctorat. Université Mentouri de Constantine, 2010
- [ZEB 16] F. ZEBIRI, A. KESSAL, L. RAHMANI, A. CHEBABHI. « Analysis and design of photovoltaic pumping system based on nonlinear speed controller » Journal of power Technologies 96, (1). Université de Sétif. 2016
- [ZOU 10] Y.ZOUAOUI «Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone» Mémoire Magister. Université F. ABBAS de Sétif 2010

[AFL 16] <http://afleu.olympie.in/afleu/et3/synchrone/MSync.jpg>

[CAP 16] [www.capenergie.fr](http://www.capenergie.fr)

[CDE 16] portail. Cder.dz-IMG-JPG carte solaire irradiation globale surface horizontale Algérie

[DOS 10] <http://www.dossiers-techniques.fr/wp-content/uploads/2010/11/moteur-asynchrone.png>

[ENG 07] [http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaique.asp2007](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp2007)

[ENG 16] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16678>

[IRL 14] <http://www.irl-france.fr/fr/decouvrir-les-infrarouges-lointains/le-rayonnement-du-soleil-explique-par-irl-france>.

[MAC 16] Cours de génie électrique. Site :

<http://www4.ac-nancy-metz.fr/mendesfranceepinal/spip/spip.php?article6>

[MOR 16] Y. MOREL cours la machine synchrone. Site :

<http://fisik.free.fr/ressources/MachineSynchrone.pdf>

[POM 16] [http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg\\_2972\\_photo\\_url\\_2984.jpg?rand=416313161](http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg_2972_photo_url_2984.jpg?rand=416313161).

[TRA 16] [www.transtech-africa.de](http://www.transtech-africa.de)

# ANNEXE

## Annexe

- **Caractéristiques des panneaux photovoltaïques de type SIEMENS SM 110-24,110 Wc :**

Paramètre	valeurs
Puissance maximale du panneau $P_{mpp}$	110W
Courant au point de puissance maximale $I_{mpp}$	3,15A
Tension au point de puissance maximale $V_{mpp}$	35V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	3,45A
Tension en circuit-ouvert $V_{co}$	43,5V
Coefficient d'incrémentation du courant ( $\alpha_{cc}$ )	1,4mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension ( $\beta_{co}$ )	-152mV/°C

- **Paramètres de la machine asynchrone :**

La machine est asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeurs
Puissance nominale P	746 W
Vitesse de rotation nominale N	150 rad/s
Fréquence f	60 Hz
Courant I	3,4 A
Couple électromagnétique $C_{em}$	5 N.m
Nombre de paire de pôles P	2
Inertie J	0,0012 Kg/m <sup>2</sup>
Inductance mutuelle M	0,44 H
Inductance cyclique statorique $L_s$	0,642 H
Inductance cyclique rotorique $L_r$	0,642 H
Résistance statorique $R_s$	5,72 $\Omega$
Résistance rotorique $R_r$	4,2 $\Omega$
Coefficient de frottement visqueux	0



