

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

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Département de génie

électrique



Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Option : Energies renouvelables

Thème :

**Commande par mode glissant d'un système de
pompage photovoltaïque**

Réalisé par :

- ❖ SAFER Youba
- ❖ SADAOUI Noureddine

Encadré par :

- ❖ Mr. BERBOUCHA Ali

Promotion 2022/2023

Remerciement

Nous tenons d'abord à remercier ALLAH de nous avoir guidés vers le droit chemin, de nous avoir aidés tout au long de nos années d'étude.

Un grand merci à notre promoteur : Mr BERBOUCHA Ali, qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicace 1

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 leurs accordent une très longue vie.

À mes frères et sœurs, à toute ma famille et à tous mes amis.

Noureddine

Dédicace 2

Au meilleur des pères

A ma très chère mère

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté

A qui je dois tout

A mes frères et sœurs

A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A mes amis et toute la famille

A tous ceux qui me sont chers

Et particulièrement

A ma chère et bienaimée Yasmine

Youba

Introduction générale	1
I.1 Introduction	4
I.2 Historique du photovoltaïque	4
I.3 Rayonnement solaire	5
I.4 Cellule photovoltaïque	6
I.4.1 Description.....	6
I.4.2 Principe de fonctionnement	6
I.5 Les différents types des cellules photovoltaïques.....	7
I.6 Type des systèmes Photovoltaïques	8
I.6.1 Les systèmes autonomes.....	8
I.6.2 Les systèmes photovoltaïques hybrides.....	9
I.6.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux	10
I.7 Générateur photovoltaïque	11
I.7.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque	11
I.7.2 Protection des modules photovoltaïques	12
I.8 Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque.....	12
I.8.1 Avantages	13
I.8.2 Inconvénient	13
I.9 Les systèmes de pompage photovoltaïque	13
I.9.1 Le pompage au fil du soleil	14
I.9.2 Le pompage avec stockage électrochimique	14
I.10 Les convertisseurs statiques	15
I.10.1 Les convertisseurs DC/DC (hacheurs).....	15
I.10.2 Les convertisseurs DC/AC onduleurs.....	17
I.11 Groupe moteur-pompe	17
I.11.1 Moteurs électriques.....	17
I.12 Conclusion.....	22
II.1 Introduction.....	25
II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	25
II.2.1 Le modèle idéal	25

II.2.2	Le modèle à une diode.....	26
II.2.3	Le modèle à deux diodes	27
II.3	Caractéristique courant-tension, puissance-tension d'un module.....	28
II.4	Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque.....	29
II.4.1	Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque	29
II.4.2	Influence de la température sur les caractéristiques du module Photovoltaïque	30
II.5	Modélisation du hacheur survolteur.....	31
II.6	Modélisation de l'onduleur de tension.....	32
II.7	Modélisation du groupe motopompe	34
II.7.2	Modélisation de la machine asynchrone.....	34
II.7.2.1	Hypothèses simplificatrices.....	35
II.7.2.2	Modèle triphasé du moteur asynchrone	35
II.7.2.3	Modèle biphasé de la MAS	37
II.7.2.4	Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q)	39
II.7.3	Modélisation de la pompe.....	40
II.8	Conclusion	41
III.1	Introduction	43
III.2	Description du système à simuler.....	43
III.3	Optimisation du système de pompage photovoltaïque.....	44
III.4	Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	44
III.4.1	Les méthodes de MPPT.....	45
III.4.2	La méthode Perturbation & Observation (P&O).....	45
III.5	La commande vectorielle de la machine asynchrone	48
III.5.1	Choix d'orientation de flux.....	48
III.6	Dimensionnement du système de pompage PV	49
III.6.1	Evaluation des besoins en eau	49
III.6.2	Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	49
III.6.3	Dimensionnement de la pompe centrifuge	50
III.6.4	Dimensionnement du moteur.....	51
III.6.5	Dimensionnement du générateur PV	52

III.7	Test de la méthode Perturbation & Observation (P&O)	52
III.8	Simulation du système global	57
	Conclusion	60
IV.1	Introduction	62
IV.2	Commande par mode glissant	62
IV.3	Les systèmes à structures variables	63
IV.4	Conception de la commande par mode de glissement	64
IV.4.1	Choix de la surface de glissement :	64
IV.4.2	Conditions de convergence.....	65
IV.4.2.1	Fonction directe de commutation.....	65
IV.4.2.2	Fonction de LYAPUNOV	65
IV.5	Phénomène de broutement (chattering).....	69
IV.5.1	Elimination du phénomène de chattering	70
IV.6	Application de la commande à la MAS	72
IV.6.1	Choix des surfaces de glissement	72
IV.6.2	Conditions de convergence et d'existence	72
IV.6.3	Régulation de flux rotorique.....	72
IV.6.4	Régulation de la vitesse	73
IV.7	Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement.....	73
IV.8	Résultats de la simulation du système de pompage contrôlé par le mode glissant	74
IV.8.1	Interprétation des résultats.....	76
IV.8.2	Comparaison.....	77
	Conclusion	77
	Conclusion générale.....	78

Liste des figures

Figure I. 1: Le rayonnement solaire	5
Figure I. 2 : Cellule solaire photovoltaïque	6
Figure I. 3: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	7
Figure I. 4: Cellules mono cristallines.	7
Figure I. 5: Cellule poly-cristallines.	8
Figure I. 6: Cellules amorphes.....	8
Figure I. 7: Système photovoltaïque autonome avec batterie.....	9
Figure I. 8: Système photovoltaïque hybride	10
Figure I. 9: Structure d'un système Photovoltaïque connecté au réseau	10
Figure I. 10: générateur photovoltaïque.....	11
Figure I. 11: La caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.	12
Figure I. 12: Pompage au fil du soleil.....	14
Figure I. 13: Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.	15
Figure I. 14: Convertisseur DC-DC.....	15
Figure I. 15: schéma d'un convertisseur Buck.	16
Figure I. 16: schéma d'un convertisseur BOOST	16
Figure I. 17: schéma d'un convertisseur BUCK-BOOST.	16
Figure I. 18: Convertisseur DC-AC.....	17
Figure I. 19 : Moteur à courant continu avec balais.....	18
Figure I. 20: Constitution du moteur courant continu sans balais	19
Figure I. 21: Moteur synchrone.	20
Figure I. 22: Moteur asynchrone.....	20
Figure I. 23: pompes à diaphragme	21
Figure I. 24: pompe centrifuge	22
Figure II. 1: Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.	25
Figure II. 2: Schéma d'une cellule photovoltaïque une diode.....	26
Figure II. 3 : Schéma d'une cellule photovoltaïque deux diodes.	27
Figure II. 4: Caractéristique courant-tension	28
Figure II. 5: Caractéristique puissance-tension.....	29
Figure II. 6: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$	29
Figure II. 7: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$	30
Figure II. 8: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$	30
Figure II. 9: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	30
Figure II. 10: Schéma d'un Hacheur parallèle (BOOST).....	31
Figure II. 11: Schéma de l'onduleur triphasé.....	32
Figure II. 12: Représentation schématique des enroulements de la MAS.	34
Figure II. 13: Représentation des axes de la machine	38
Figure III. 1: Schéma d'un système de pompage photovoltaïque	43
Figure III. 2: chaine de conversion d'énergie solaire	44

Figure III. 3: Principe de la P&O illustré sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque....	46
Figure III. 4: Organigramme de la méthode perturbation et observation.....	47
Figure III. 5: Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer).....	48
Figure III. 6: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.....	53
Figure III. 7: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps	53
Figure III. 8: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.....	53
Figure III. 9: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps	54
Figure III. 10: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.....	54
Figure III. 11: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps	54
Figure III. 12: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.....	55
Figure III. 13: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps	55
Figure III. 14: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.....	55
Figure III. 15: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps	56
Figure III. 16: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.....	56
Figure III. 17: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps	56
Figure III. 18: Variation de l'ensoleillement et de la température	57
Figure III. 19: Courant optimal á la sortie des panneaux photovoltaïques.....	57
Figure III. 20: Tension optimale á la sortie des panneaux photovoltaïques	58
Figure III. 21: Puissance optimale á la sortie des panneaux photovoltaïques	58
Figure III. 22: Vitesse de rotation et la vitesse de référence du groupe motopompe	58
Figure III. 23: Débit d'eau pompé par la pompe	59
Figure III. 24: Volume pompé par le groupe motopompe	59
Figure IV. 1: Les modes de trajectoire dans le plan de phase	63
Figure IV. 2: Linéarisation exacte de l'écart.....	65
Figure IV. 3: Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.	66
Figure IV. 4: Commande appliquée aux systèmes à structure variable.....	67
Figure IV. 5: Phénomène de chattering autour de la surface de glissement.	69
Figure IV. 6: Représentation de la fonction sat.....	70
Figure IV. 7: variation de la température et de l'ensoleillement.	74
Figure IV. 8: Allure de la tension.	74
Figure IV. 9: Allure du courant.	74
Figure IV. 10: évolution de la puissance.....	75
Figure IV. 11: évolution de la vitesse.	75
Figure IV. 12: évolution de la hauteur.	75
Figure IV. 13: évolution du volume.....	76
Figure IV. 14: évolution du débit.....	76

Liste des tableaux

Tableau II.1. Caractéristique du panneau photovoltaïque utilisé.

Liste des symboles

R_R : Résistance par phase rotorique.

R_S : Résistance par phase statorique.

$[\nu_s]$: Vecteurs des tensions des phases statoriques.

$[\nu_r]$: Vecteurs des tensions des phases rotoriques.

$[\varphi_s]$: Vecteurs des flux statoriques.

$[\varphi_r]$: Vecteurs des flux rotoriques.

$[i_s]$: Vecteurs des courants des phases statoriques.

$[i_r]$: Vecteurs des courants des phases rotoriques.

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.

$M_S = M_r$: Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor.

ω_s : La pulsation statorique.

ω_r : La pulsation rotorique.

ω_m : La pulsation mécanique.

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.

D: Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/S²).

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_p : Constante de la canalisation.

Q : le débit de la pompe.

Ω :Vitesse du moteur asynchrone (rad /s).

k_r : Un coefficient de proportionnalité[(Nm/rad. s⁻¹)²].

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone(W).

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad /s).

Q_m : Est le débit horaire moyen de la pompe centrifuge.

ρ : Densité de l'eau (1000 kg/m³).

g : Constante de la gravité.

η_m : Rendement du moteur.

P_{ele} : Puissance électrique nécessaire pour que le moteur fonctionne.

E_c : est l'énergie journalière demandé par la charge (groupe motopompe).

t_p : est le temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau.

V : la consommation quotidienne du village qui est estimée à 70 m³.

Abréviations utilisées

PV : Photovoltaïque

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

Liste des symboles et abréviations

GPV : Générateur photovoltaïque

HMT : la hauteur manométrique

PPM : Le point de puissance maximale

PI : Intégrale proportionnelle

MAS : Le moteur asynchrone

MC : le mode de convergence

MG : Le mode de glissement

MRP : Le mode du régime permanent

DC-DC : Convertisseur continu/continu

DC-AC : Convertisseur continu/alternatif

Introduction générale

Ces dernières décennies la consommation énergétique mondiale a connu une très grande croissance et il semble qu'elle va continuer à augmenter sous effet de la croissance du besoin en électricité dans le monde.

En effet, à ce jour, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel. 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.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. [1] Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jour après jour des développements considérables, il y a l'énergie solaire photovoltaïque qui représente une solution de remplacement par excellence.

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. L'utilisation des systèmes de pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture s'avère une solution très fiable pour le développement des zones rurales et isolées des pays en voie développement dont la moitié de la population n'ont pas d'accès à l'eau potable. Ce système est justifié économiquement où l'énergie fournie par le générateur est stockée sous forme d'eau pompée durant la journée au lieu d'être emmagasinée sous forme d'énergie électrique.

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. [2]

Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilisée des moteurs à courant continu à aimant permanent. Ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompage solaire à cause de sa simplicité, sa robustesse et sa fiabilité. [3]

Dans ce contexte général, notre étude se porte sur la commande par mode glissant d'un système de pompage photovoltaïque. Ce type de commande 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. Notre travail est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons 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, ensuite nous allons donner une description générale des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constitue 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 et les principes de la commande vectorielle qui sera appliquée à notre système, ainsi que les résultats de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK seront présentés par la fin de ce chapitre.

Dans le quatrième chapitre, on fait appel à une alternative stratégie de contrôle pour la commande du système de pompage, à savoir la commande par mode glissant, puis on fait une comparaison entre les résultats obtenus par les deux techniques de commande : la commande vectorielle et la commande par mode glissant. Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de
pompage photovoltaïque

I.1 Introduction

De nos jours, la demande en eau est de plus en plus importante, le problème se multiplie en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie, la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service. [4]

I.2 Historique du photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis plus de 40 ans, les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans Soleil. [5]

Voici quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [5] :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet Photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du

silicium pouvait être augmenté en ajoutant des "impuretés", c'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires, en effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [5]

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20%. [6]

I.3 Rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau, l'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela : [7]

- **Le rayonnement direct** : Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux. [7]
- **Le rayonnement diffus** : En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions. [7]
- **Le rayonnement réfléchi** : C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige, cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée. [7]

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante : [7]

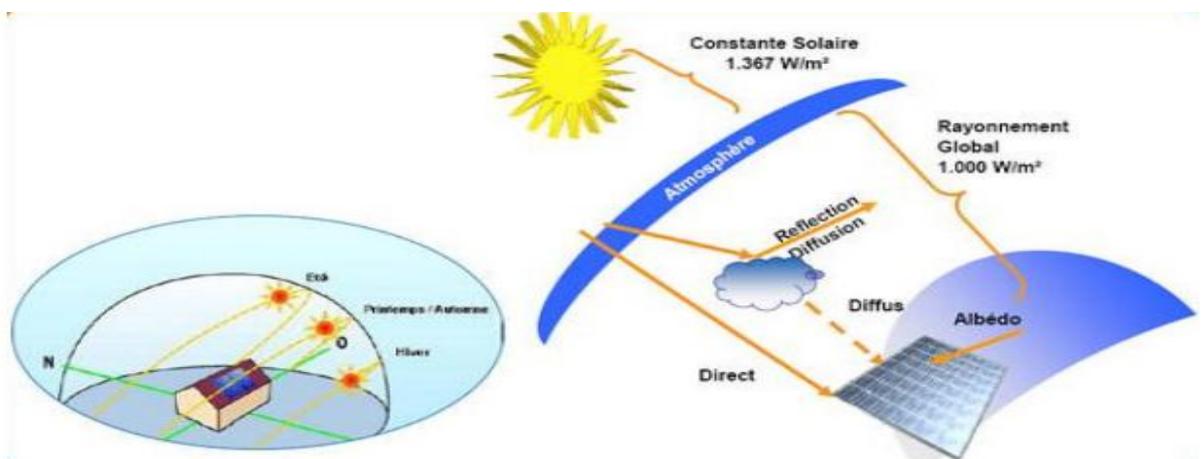


Figure I.1: Le rayonnement solaire [8]

I.4 Cellule photovoltaïque

I.4.1 Description

C'est une plaquette cristalline ronde ou polygonale, le plus souvent en silicium, lorsque la lumière atteint cette plaquette, des électrons sont libérés. Si les points de contact positif et négatif de la cellule sont raccordés à un consommateur, le courant circule. Ce courant est récolté par les électrodes en dessous et en dessus de la cellule. Ce phénomène est également appelé « effet photovoltaïque » c'est-à-dire production d'une tension (voltaïque) au moyen de photons (particules de lumière).

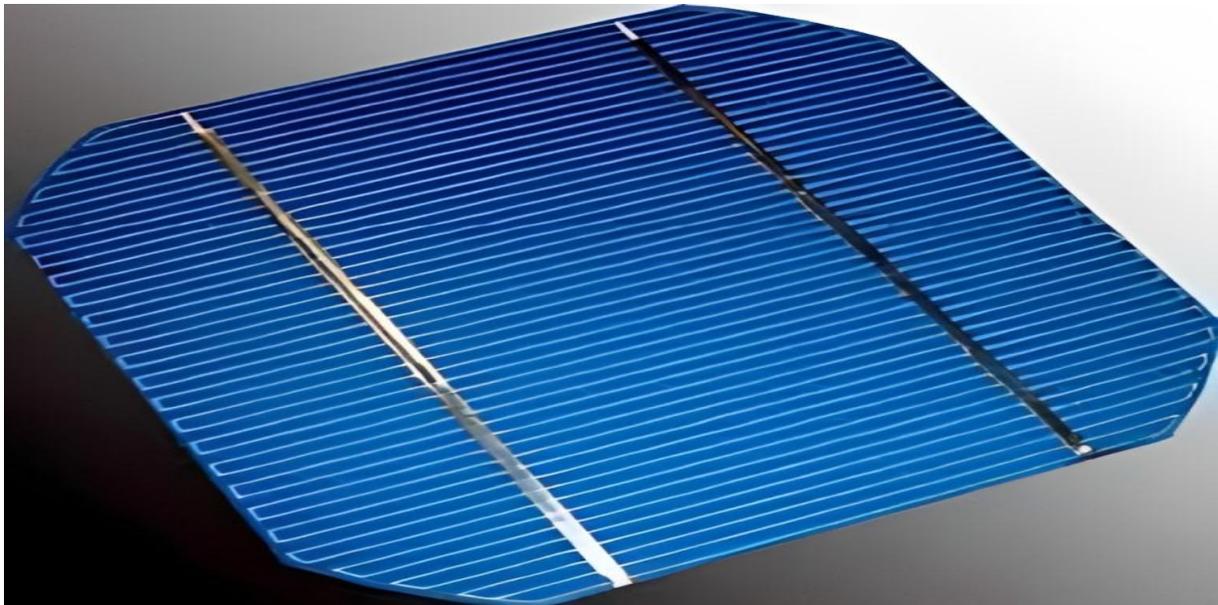


Figure I.2 : Cellule solaire photovoltaïque [9]

I.4.2 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium, elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P, ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches, Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.[10] Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré dans la figure I.3 ci-dessous.

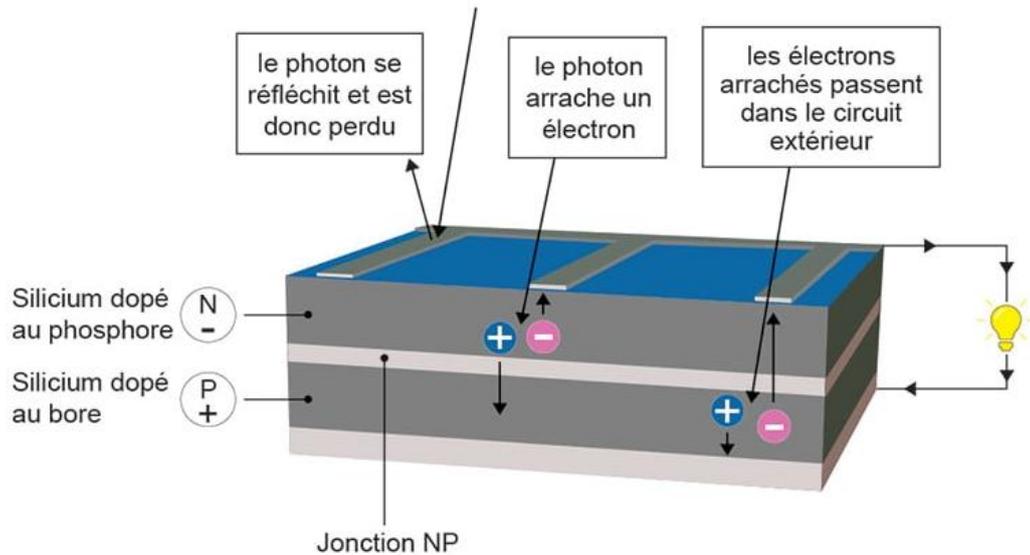


Figure I.3 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [8]

I.5 Les différents types des cellules photovoltaïques

La cellule PV, l'élément primaire d'un système PV, est fabriquée la première fois par les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis au cours des années 1950. [11] Elle constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis les besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt. [12] Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

➤ **Les cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.



Figure I.4 : Cellules mono cristallines. [9]

➤ **Les cellules poly-cristallines :** Leur conception étant plus facile, leur cout de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%).



Figure I.5 : Cellule poly-cristallines. [9]

➤ **Les cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un cout peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.

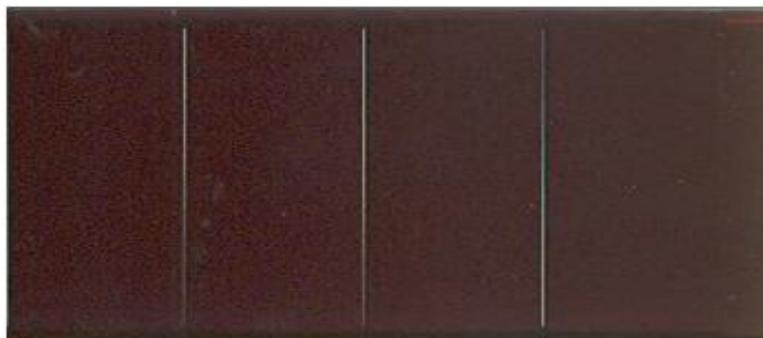


Figure I.6 : Cellules amorphes [9]

I.6 Type des systèmes Photovoltaïques

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de systèmes PV : comme les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes raccordés au réseau [13].

I.6.1 Les systèmes autonomes

Une installation PV autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Cette installation est utilisée pour

alimenter un ou plusieurs consommateurs situés à proximité, comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau. Il existe deux types de systèmes PV autonomes avec stockage et sans stockage, le schéma général d'un système PV autonome est représenté sur la figure (1.7) [13].

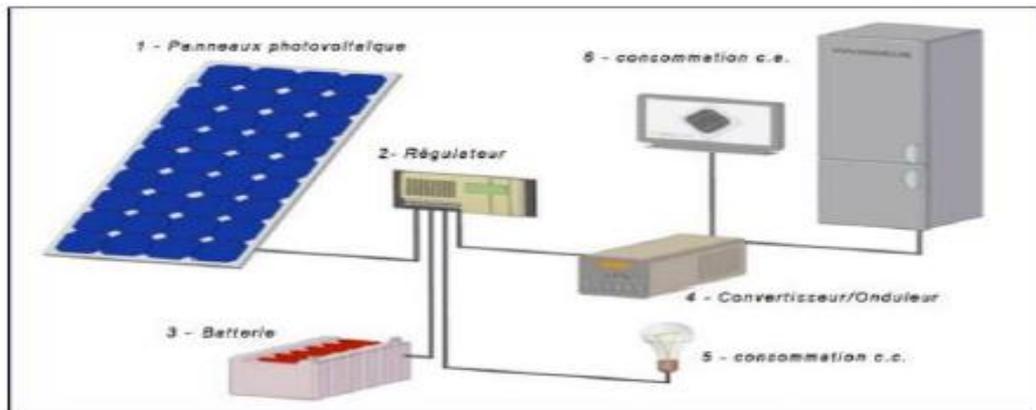


Figure I.7 : Système photovoltaïque autonome avec batterie. [14]

I.6.2 Les systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité. Ces systèmes s'appliquent particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système PV seul avec les batteries [14].

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [15]. Un système hybride est représenté par la figure (1.8).

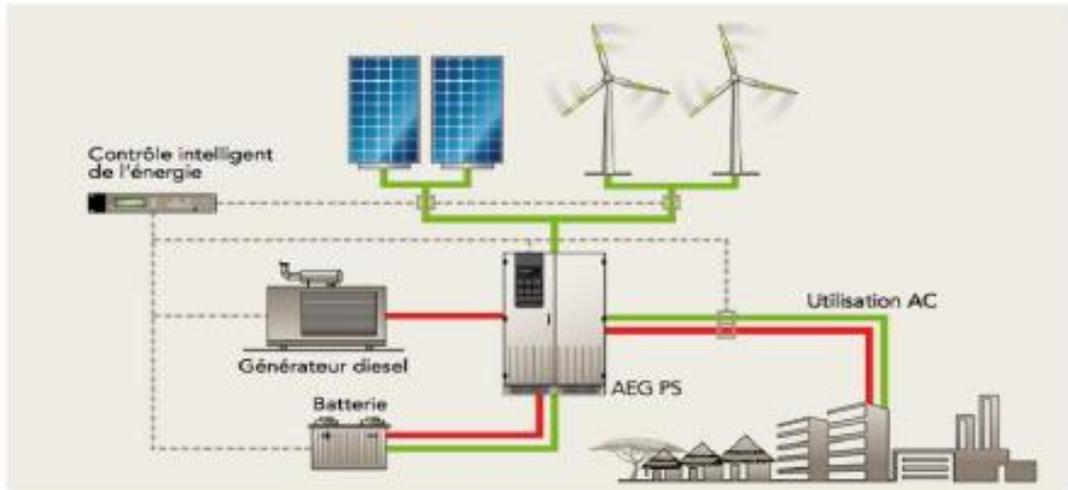


Figure I.8 : Système photovoltaïque hybride. [14]

I.6.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux

Dans ces systèmes PV, le générateur PV est couplé directement au réseau électrique, le système PV raccordé au réseau est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV, ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'une commande MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau. La structure d'un système PV connecté au réseau est montrée par la figure (1.9) [16]. L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie, on ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie [16].



Figure I.9 : Structure d'un système Photovoltaïque connecté au réseau. [14]

I.7 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est un ensemble de panneaux associés en série ou en parallèle pour assurer la production et la gestion de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire.

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer des modules photovoltaïques (générateur d'énergie), ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est possible et souvent utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. [7]



Figure I.10 : générateur photovoltaïque. [17]

I.7.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les données essentielles permettent de déterminer la caractéristique d'un module photovoltaïque :

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil "
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$

- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

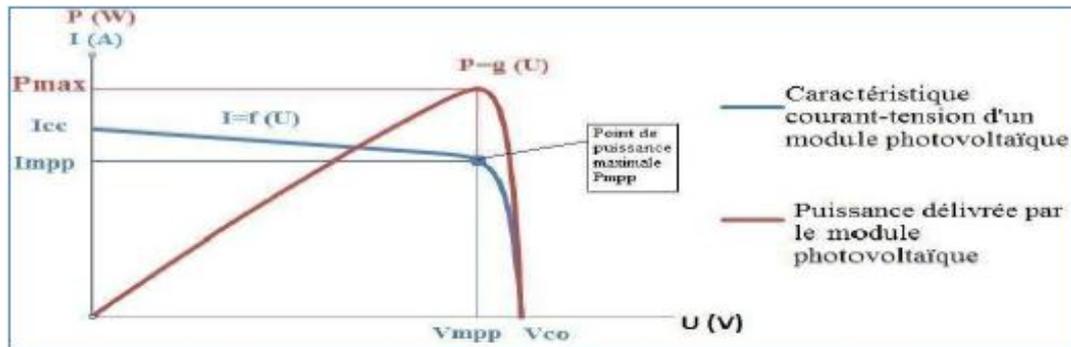


Figure I.11 : La caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque. [18]

I.7.2 Protection des modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque doit être protégé afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque [19] :

- **Protection par diodes parallèles (ou by-pass)** : Peuvent isoler un sous-réseau lorsque l'éclairage n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.
- **La diode série** : Placée entre le module et la batterie, empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour. [19]

I.8 Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

I.8.1 Avantages [20]

- Ils sont renouvelables et non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés, les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.

I.8.2 Inconvénient [20]

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le système de stockage de l'énergie très chère.
- Tributaire des conditions météorologiques qui causent la diminution du rendement.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs comparativement aux générateurs diesel, mais ils deviennent plus rentables surtout dans des régions isolées où le transport du carburant coûte une fortune.

I.9 Les systèmes de pompage photovoltaïque

Les systèmes de pompage photovoltaïque sont de plus en plus utilisés dans la vie quotidienne de l'être humain, le fonctionnement de ces systèmes consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe électrique permettant d'assurer l'alimentation en eau. [21]

Selon le mode de fonctionnement de l'installation, on distingue deux types de pompage : le pompage au fil de soleil et le pompage avec stockage électrochimique.

I.9.1 Le pompage au fil du soleil

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol, elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable, moins coûteux qu'un système avec batterie. [22]

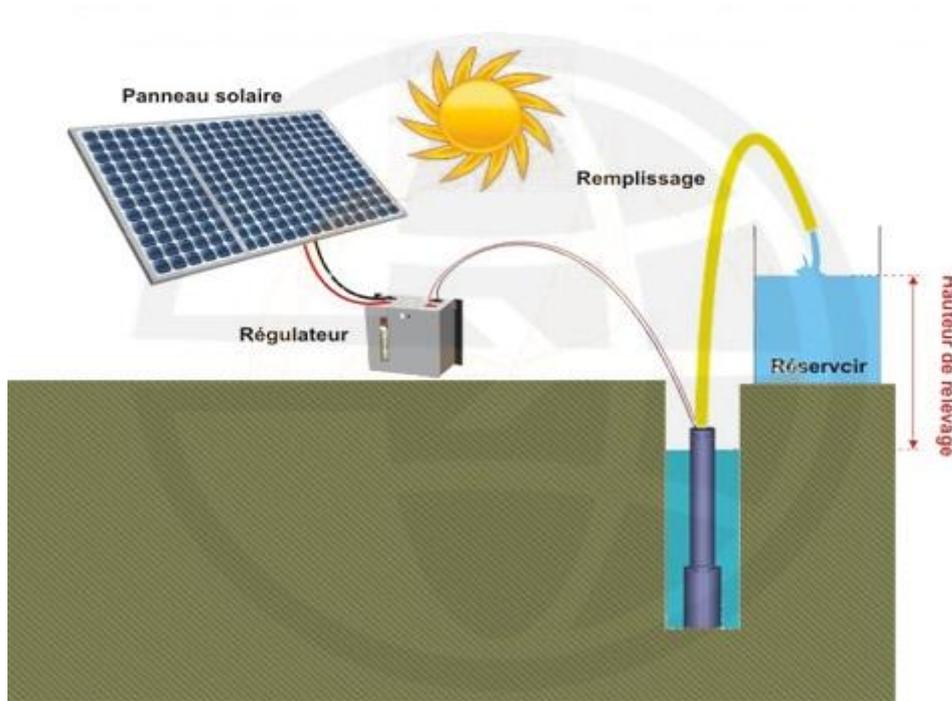


Figure I.12 : Pompage au fil du soleil. [23]

I.9.2 Le pompage avec stockage électrochimique

Dans ce type de pompage l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque sera stockée dans des batteries en parallèle avec le pompage afin de rendre le pompage possible lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques. Un tel système est plus coûteux que le précédent, vu l'exigence d'un entretien périodique et la nécessité de changer les batteries, car elles ont une durée de vie courte. [24]

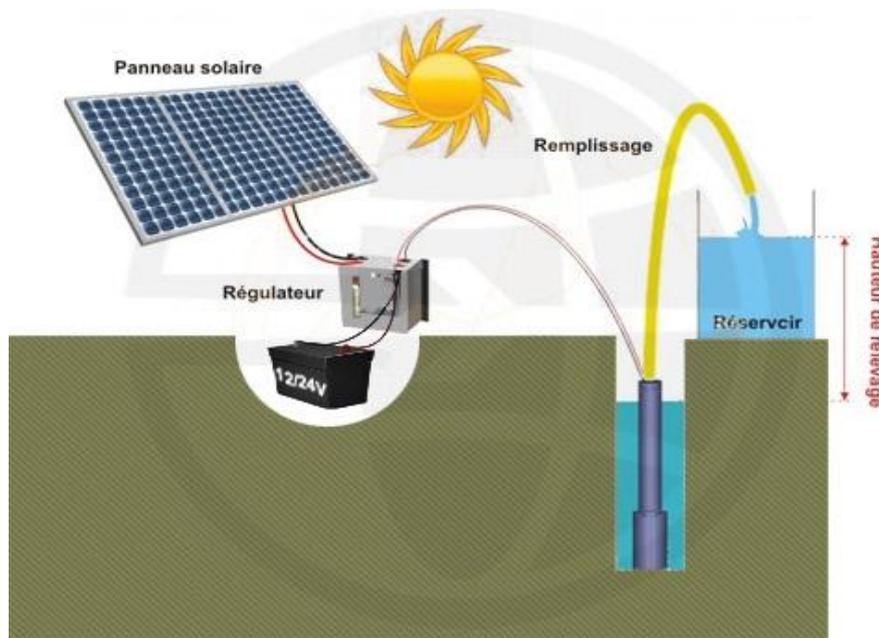


Figure I.13 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie. [25]

I.10 Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes [26].

I.10.1 Les convertisseurs DC/DC (hacheurs)

Le convertisseur « continu-continu » ou le hacheur a pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un découpage haut fréquence caractérisée par un rendement élevé. [27]

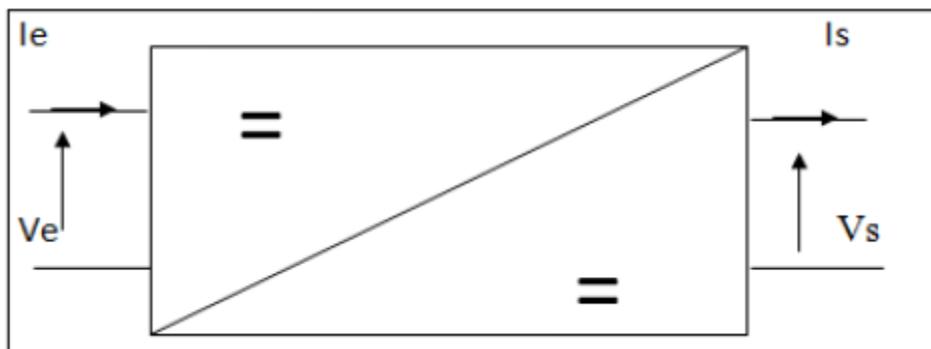


Figure I.14 : Convertisseur DC-DC.

➤ **Hacheur dévolteur (Buck)**

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

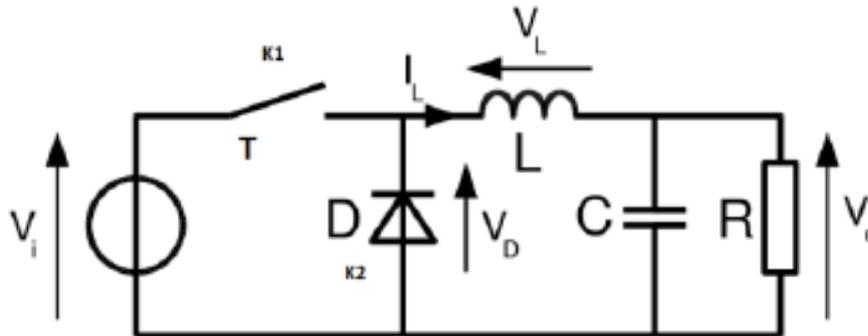


Figure I.15 : schéma d'un convertisseur Buck.

➤ **Hacheur survolteur (Boost)**

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

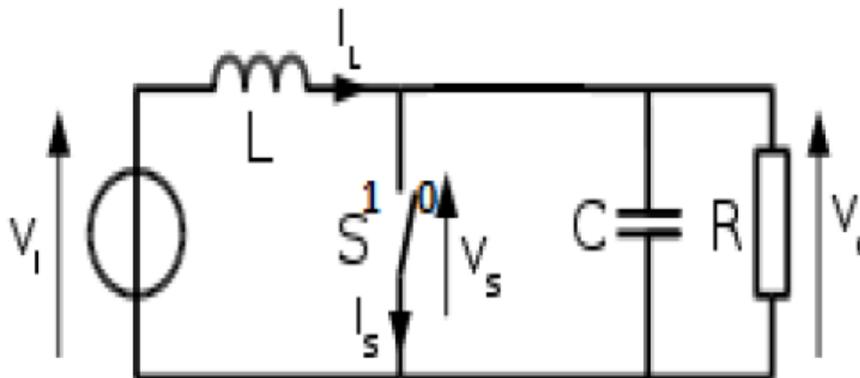


Figure I.16 : schéma d'un convertisseur BOOST

➤ **Hacheur dévolteur-survolteur (BUCK-BOOST)**

Un convertisseur Buck-Boost, ou hacheur série-parallèle, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur selon le mode de commutation. Cependant la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

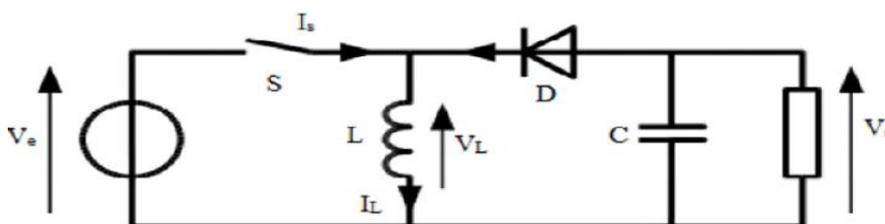


Figure I.17 : schéma d'un convertisseur BUCK-BOOST.

I.10.2 Les convertisseurs DC/AC onduleurs

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une puissance électrique sous forme continue en une puissance sous forme alternative, à une valeur désirée de tension ou du courant et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée. [28]

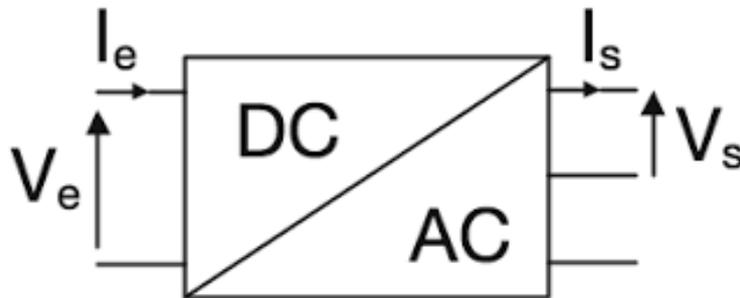


Figure I.18 : Convertisseur DC-AC.

I.11 Groupe moteur-pompe

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

I.11.1 Moteurs électriques

Le moteur est une machine électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation, on distingue deux grands types de moteurs électriques : les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif, pour une installation de pompage solaire, le choix d'un moteur à courant continu est avant tout une solution économique car le générateur photovoltaïque fournit du courant continu et on peut donc éviter l'utilisation d'un convertisseur statique. L'évolution des convertisseurs statique efficace permet également de choisir des moteurs performants, disponibles et surtout moins chers. [27]

❖ *Moteurs à courant continu*

Un moteur à courant continu est une machine électrique alimentée en courant continu, il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique, d'où l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique, donc c'est une machine réversible. La configuration la plus usuelle dans le pompage photovoltaïque et à base d'un moteur à courant continu vue la simplicité de son couplage direct avec le générateur photovoltaïque, son adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur

vitesse, son couple et son 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. [29]

a- Moteur à courant continu avec balais

En faisant varier la direction du courant circulant dans un rotor soumis à un champ magnétique produit par le stator, alors l'énergie électrique appliquée sera transformée en énergie mécanique. Les balais d'un moteur à courant continu sont en charbon et le graphite assure la commutation du courant dans le rotor. Les moteurs à balais sont les plus communs, mais leurs balais doivent être changés périodiquement, ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. [29]

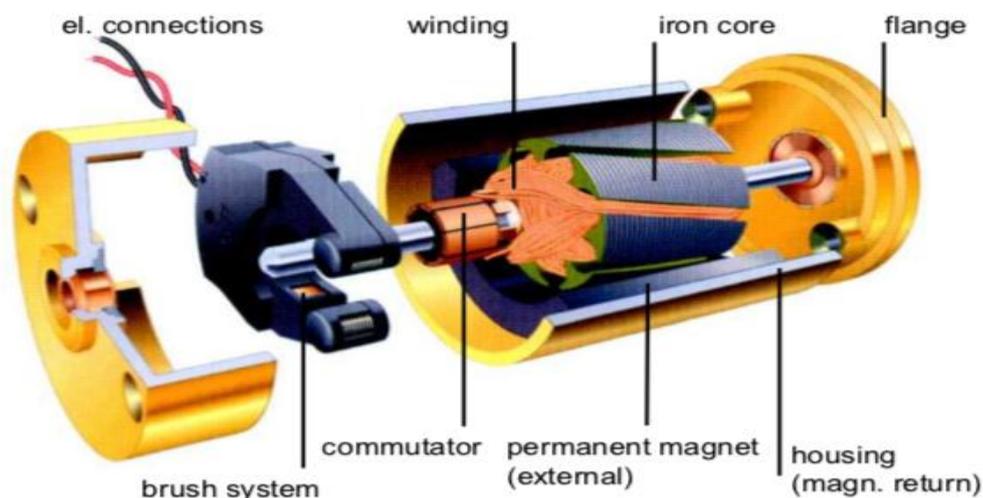


Figure I.19 : Moteur à courant continu avec balais. [32]

b- Moteur à courant continu sans balais

Le moteur à courant continu sans balais, comme son nom l'indique est un moteur alimenté en courant continu et qui ne possède pas un système collecteur-balais.

Ce moteur est similaire au moteur à courant continu traditionnel en principe de fonctionnement, mais sa construction en est différente. Le stator de ce moteur est le même que celui de la machine synchrone (moteur ou alternateur) et le rotor est à un aimant permanent où les balais sont remplacés par un système à commutation électronique. [31]

Ces dernières années, il y a eu une croissance rapide de l'utilisation du moteur à courant continu sans balais en tant que machine rotative pour les systèmes de pompage photovoltaïques.



Figure I.20 : Constitution du moteur courant continu sans balais. [32]

❖ Moteur à courant alternatif

Un moteur à courant alternatif est un moteur électrique alimenté en courant alternatif, tous les moteurs fonctionnant en courant alternatif ont en commun l'existence d'un champ magnétique tournant produit par les enroulements du stator. L'utilisation du moteur à courant alternatif pour les applications de pompage photovoltaïque devient de plus en plus importante à cause de son faible coût, son faible besoin d'entretien et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attractif pour ce type de système.

On distingue deux types de ces moteurs : Les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

❖ Moteurs synchrones

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible qui peut fonctionner soit en génératrice (alternateur), soit en moteur. Le terme de moteur synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Il présente des caractéristiques remarquables tel que la vitesse constante quel que soit la charge. Il peut supporter des chutes de tension relativement importante et ceci grâce aux possibilités de surexcitation sans décrocher. Par contre l'inconvénient du moteur synchrone est la difficulté lors de son démarrage. [33]

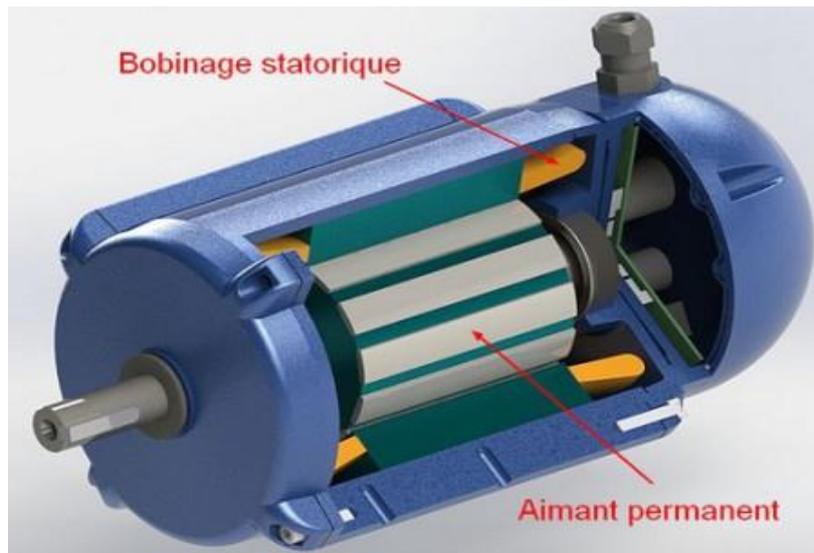


Figure I.21 : Moteur synchrone. [34]

❖ Moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Il utilise l'induction électromagnétique du champ magnétique du bobinage du stator pour produire un courant électrique dans le rotor et donc du couple. L'utilisation d'un moteur asynchrone, plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur. [27]

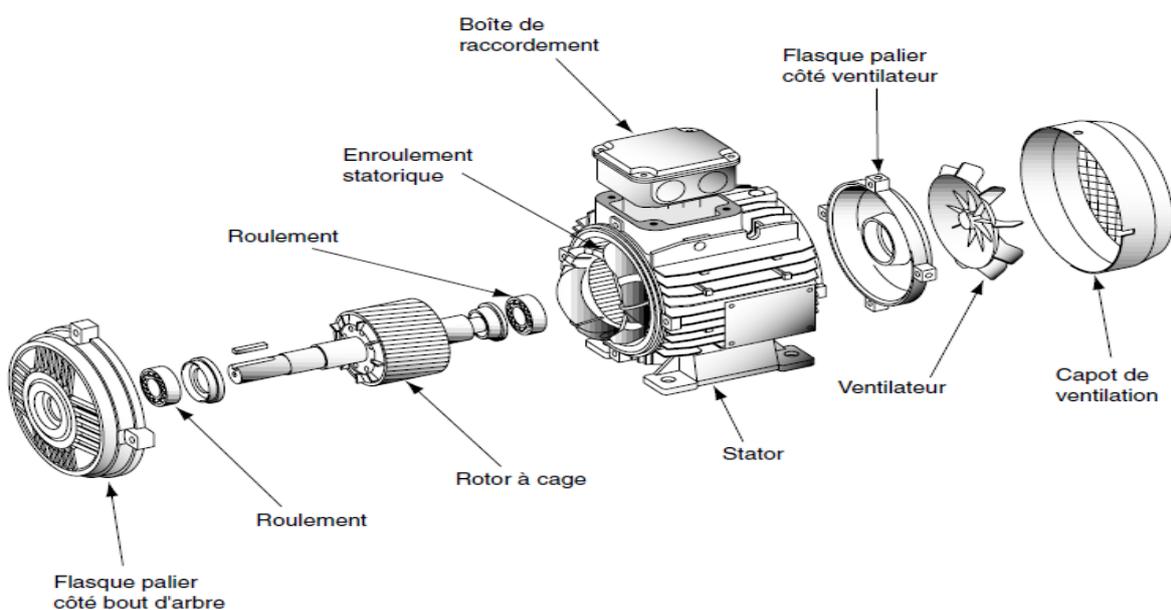


Figure I.22 : Moteur asynchrone. [35]

❖ Les pompes

Une pompe est un appareil transformant une énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur manométrique que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement. [36]

❖ Type de pompe

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. [22]

a- La 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.

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. [22]

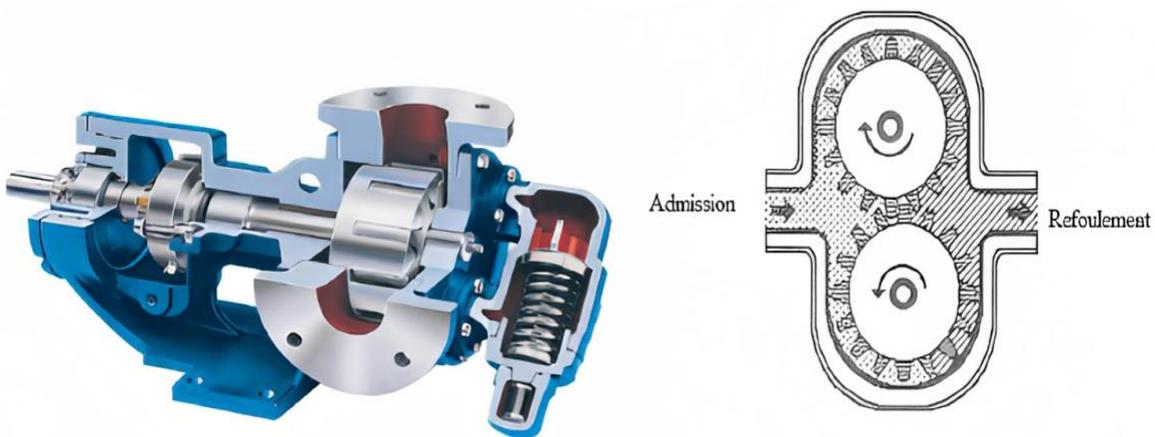


Figure I.23 : pompes volumétriques. [37]

b- La Pompe centrifuge

Dans ces pompes, l'énergie mécanique est tout d'abord transformée en énergie cinétique, le liquide est mis en vitesse dans un impulseur (roue et aube). L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie potentielle (de pression) par ralentissement de la vitesse de liquide dans une volute. La pression que peut donner une pompe centrifuge est liée à la vitesse de rotation de son axe et au diamètre de son impulseur [38]. 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. [39]

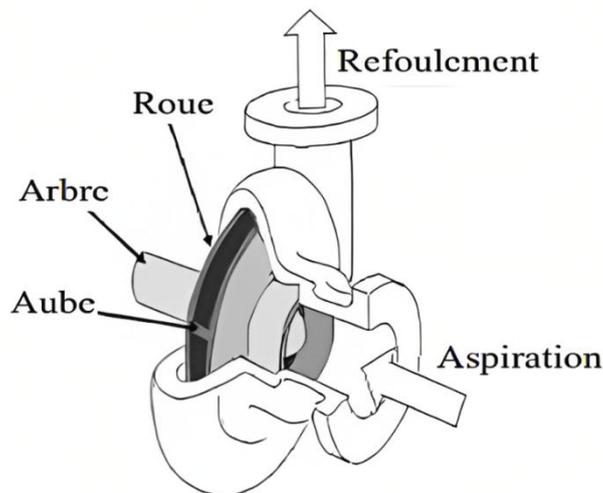


Figure I.24 : pompe centrifuge [40]

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque, les types de systèmes photovoltaïques, les différents constituants de ce système, ainsi que ses caractéristiques. Ensuite on a étudié les différents types de convertisseurs statiques, qu'on va utiliser dans la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.

Finalement nous avons présenté le groupe motopompe et ses différents constituants, la modélisation des différents constituants de ce système fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

II.1 Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procédons à la modélisation de ces éléments. Un modèle est un outil mathématique qui permet de représenter ou de reproduire un système réel donné, afin de le simuler sous le logiciel (Matlab/Simulink).

II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul du courant et de la tension. Parmi ces modèles on trouve : [41]

II.2.1 Le modèle idéal

C'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est supposée être nulle ($R_s = 0$).

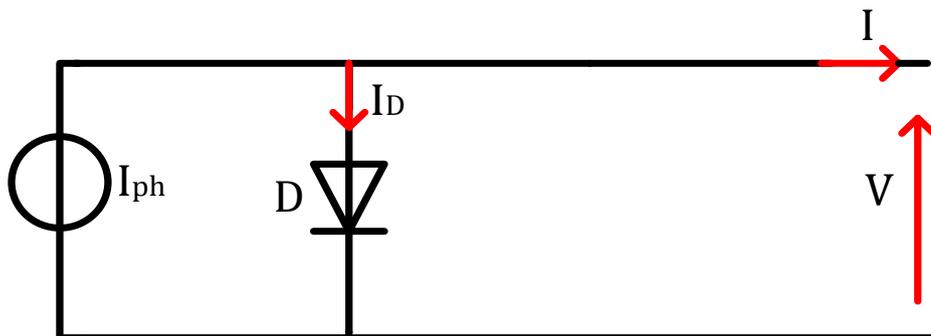


Figure II. 1: Schéma idéal d'une cellule photovoltaïque.

D'après la loi des nœuds, on obtient :

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

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

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{q \cdot v}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode.

Q : Charge de l'électron qui est égale à $1,60217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

K : Constante de Boltzmann qui est égale à $1,3806503 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$.

T : Température de la jonction PN (K).

A : Constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale.

II.2.2 Le modèle à une diode

Pour tenir compte des chutes de tension dans les zones P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéal, R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle, R_{sh}

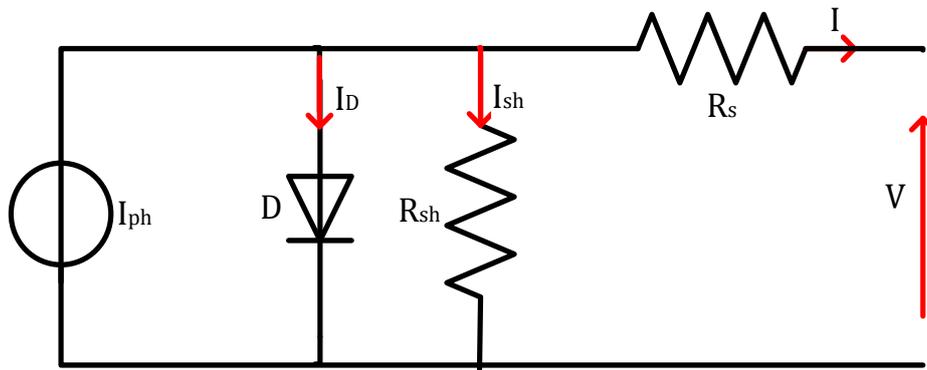


Figure II. 2: Schéma d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Le courant généré par le module est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (II.3)$$

Où :

$$I_{ph} = P_1 * G * [1 + P_2 * (G - G_{STC}) + P_3(T - T_{STC})] \quad (II.4)$$

Avec :

P_1, P_2, P_3 : Paramètres constants.

$G_{STC} = 1000 \text{ w/m}^2$

$T_{STC} = 25 \text{ °C}$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (II.5)$$

I_0 est le courant de saturation de la diode il est fortement dépendant de la température ; il est donné par :

$$I_0 = P_4 * T^3 * e^{\frac{-E_g}{K*T}} \quad (II.6)$$

Avec :

Eg : énergie de gap pour le silicium cristalline qui est égale à 1.12 ev.

Le courant dans la résistance parallèle est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V+R_s*I}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - \left[\frac{V+R_s*I}{R_{sh}} \right] \quad (II.8)$$

II.2.3 Le modèle à deux diodes

Une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons.

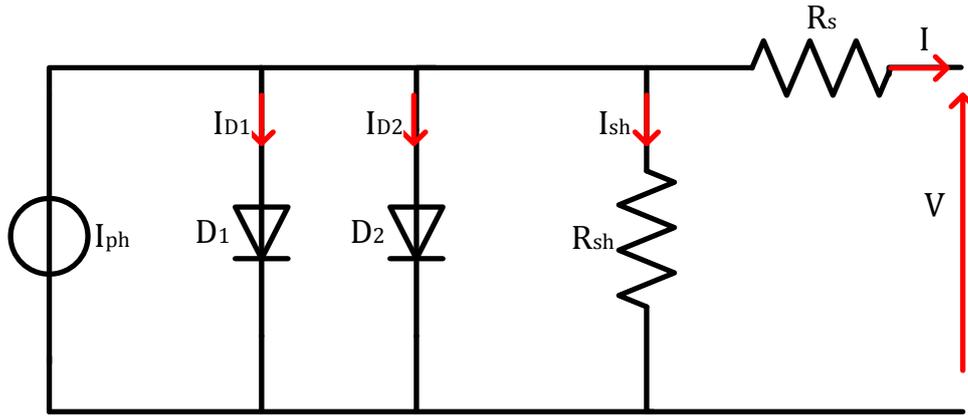


Figure II. 3 : Schéma d'une cellule photovoltaïque deux diodes.

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

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (II.9)$$

$$I_{D1} = I_1 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (II.10)$$

$$I_{D2} = I_2 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (II.11)$$

Avec : I_1 et I_2 courant de saturation des diodes.

Au final on obtient :

$$I = I_{PH} - I_1 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - I_2 \times \left[e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} \right] - \left(\frac{V+R_s*I}{R_{sh}} \right) \quad (II.12)$$

Le modèle à une diode est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité et précision, il apparaît très adapté pour notre étude.

II.3 Caractéristique courant-tension, puissance-tension d'un module

Les Figures II.4 et II.5 représentent respectivement les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau II.1, dans des conditions standard d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques a une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25C° .

Puissance nominale max	80 W
Tension du circuit ouvert	21.9 V
Courant de court-circuit	4.97 A
Tension à puissance maximale	17.5 V
Courant à puissance maximale	4.57 A
Coefficient de température de la tension de circuit ouvert	$-0.34 \text{ \%/}^\circ\text{K}$
Coefficient de température du courant de court-circuit	0.020 \%/K

Tableau II.1. Caractéristique du panneau photovoltaïque utilisé.

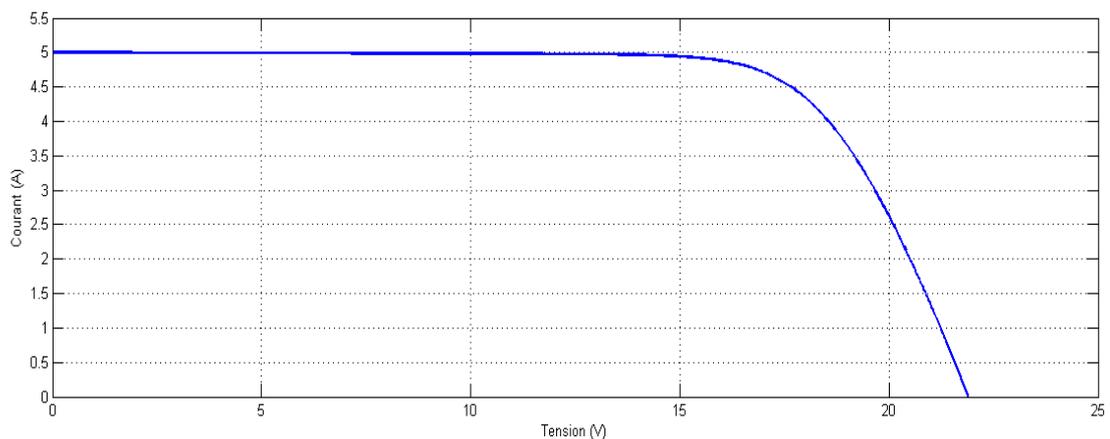


Figure II. 4: Caractéristique courant-tension

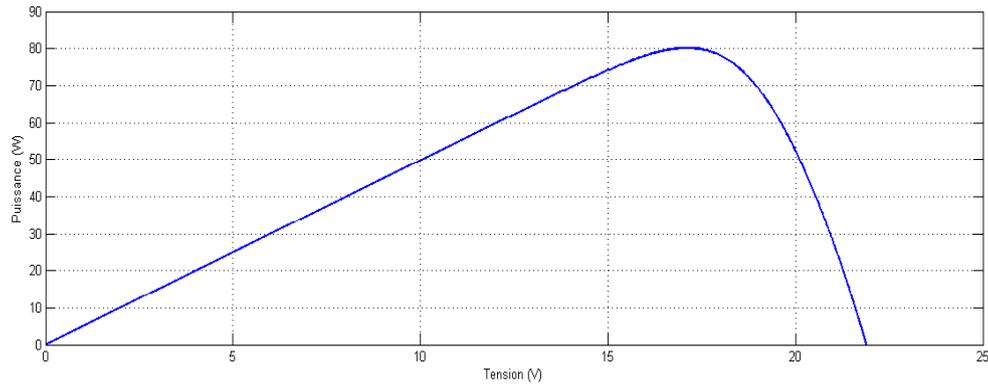


Figure II. 5: Caractéristique puissance-tension

II.4 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque

II.4.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Pour une température constante, lorsque l'ensoleillement varie, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation tandis que la tension de circuit-ouvert varie très peu. La figure (II.6) montre l'influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

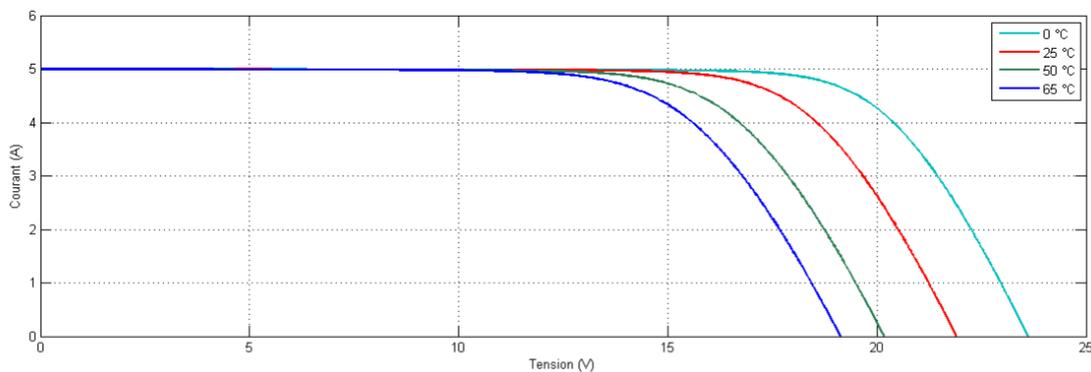


Figure II. 6: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

La puissance générée par un module photovoltaïque est le produit entre la tension et le courant, et vu que le courant est proportionnel à l'éclairement donc il y'aura des variations de la puissance en fonction de l'ensoleillement, ce qui nous permettra de déduire l'influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

La figure (II.7) montre l'influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

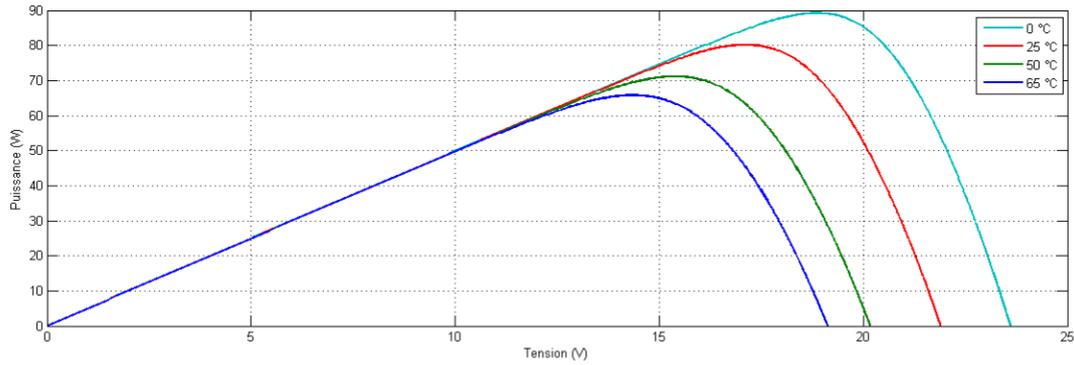


Figure II. 7: Influence de l’ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$

II.4.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module Photovoltaïque

Les figures II.8 et II.9 montrent l’influence de la température sur les caractéristiques $I_{pv=f}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes températures de fonctionnement d’un module photovoltaïque.

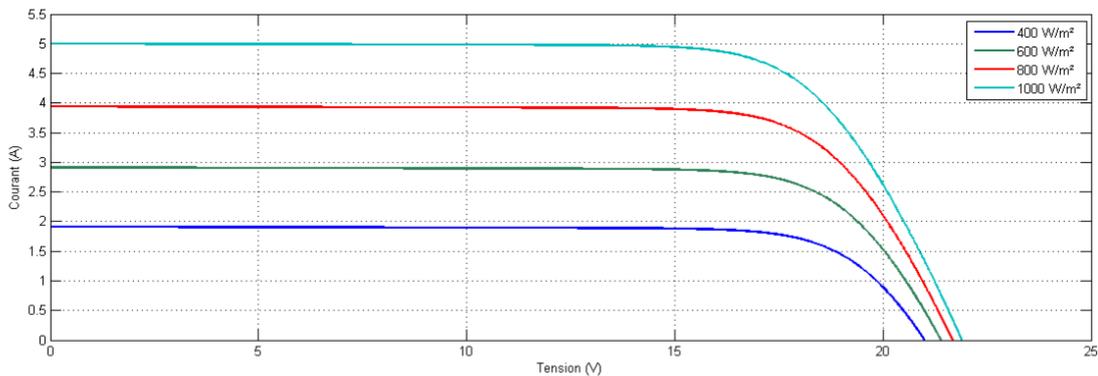


Figure II. 8: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

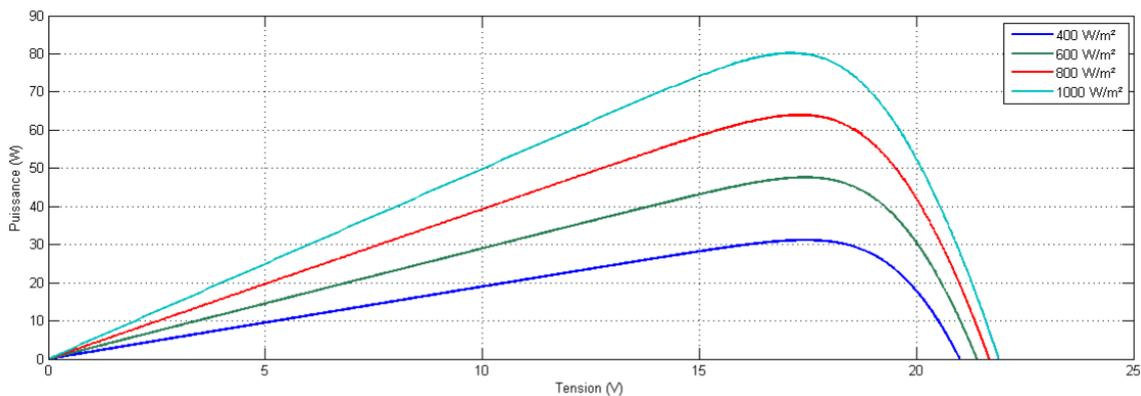


Figure II. 9: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

Vu qu’il y a une variation au niveau de la température forcément, il y aura une variation au niveau de la puissance délivrée, ce qui nous permet de déduire l’influence de la température sur la courbe $I_{pv=f}(V_{pv})$.

Suivant les Figures II.8 et II.9, on constate que lorsqu'on varie la température le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance P_{pv} sont presque indépendants de la température. Par contre, la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue lorsque la température augmente.

II.5 Modélisation du hacheur survolteur [42] :

Le convertisseur (DC/DC) le plus fréquemment utiliser est le convertisseur élévateur, connu aussi sous le nom de « BOOST » ou hacheur parallèle ; sa principale structure basique est illustrée dans la figure ci-dessous. Un BOOST est un convertisseur qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure.

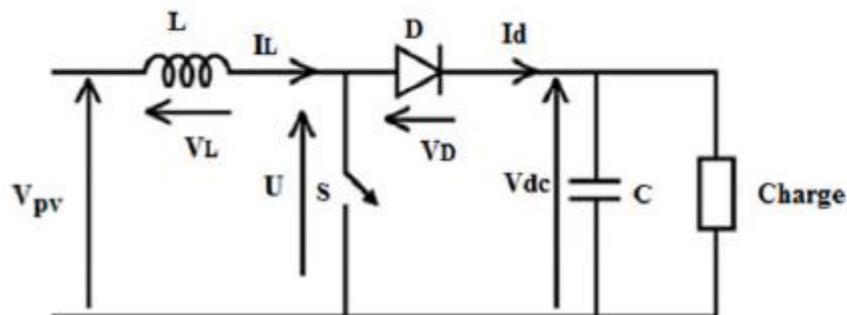


Figure II. 10: Schéma d'un Hacheur parallèle (BOOST).

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande x . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S :

- Lorsque S est fermé :

$$\begin{aligned} V_{PV} &= L \frac{dI_L}{dt} \\ 0 &= C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

- Lorsque S est ouvert :

$$\begin{aligned} V_{PV} &= L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \\ I_{PV} &= C \frac{dV}{dt} + I_{ch} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

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 des interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - x)V_{dc} \tag{II.15}$$

$$(1 - x)I_{pv} = C \frac{dv}{dt} + I_{ch}$$

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 α ($\alpha = T_{co} / T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes.

Soit :

$$\frac{di_{pv}}{dt} = -(1 - \alpha) \frac{V_{dc}}{L} + \frac{V_{PV}}{L} \tag{II.16}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_{pv}}{C} + \frac{V_{dc}}{RC} \tag{II.17}$$

II.6 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. [43]

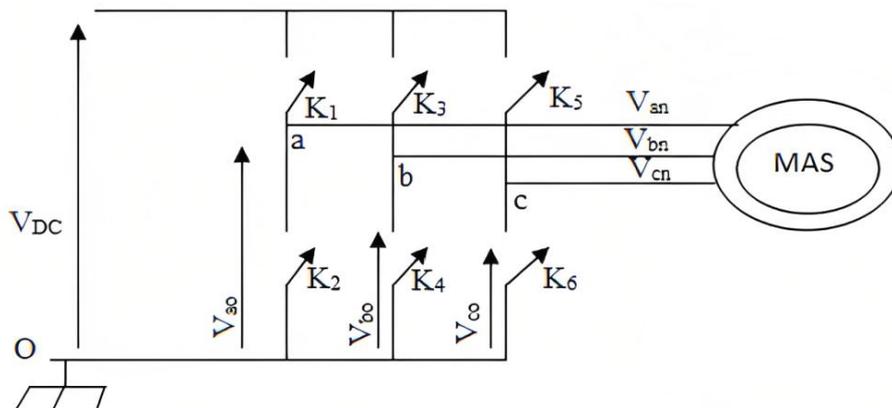


Figure II. 11: Schéma de l'onduleur triphasé.

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

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

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} - V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} - V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} - V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

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

On suppose que la charge est équilibrée c.à.d.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.20})$$

En remplaçant (II.20) dans (II.19) on aura :

$$V_{no} = \left(\frac{1}{3}\right) [V_{ao} + V_{bo} + V_{co}] \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant (II.21) dans (II.18) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{1}{3}\right) [2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}] \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right) [2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}] \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right) [2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{DC} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

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

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_0}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

II.7 Modélisation du groupe motopompe

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation. Principalement on rencontre deux familles des moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour l'application de pompage photovoltaïque :

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs asynchrones.

Pour le pompage photovoltaïque, il faut un onduleur pour commander la vitesse ceci apporte un coût supplémentaires, mais l'utilisation d'un onduleur avec le moteur asynchrone conduit pratiquement aux mêmes prix qu'avec l'utilisation d'un moteur à courant continu. Le moteur asynchrone à cage apparaît très adapté pour notre étude.

II.7.2 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.

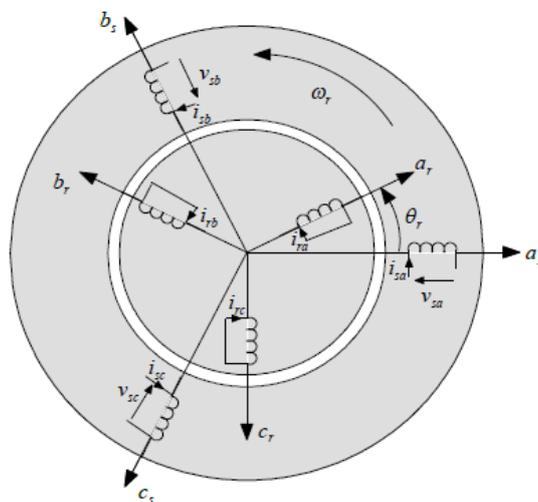


Figure II. 12: Représentation schématique des enroulements de la MAS.

II.7.2.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la machine, on va admettre les hypothèses simplificatrices suivantes [44] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encochage 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.7.2.2 Modèle triphasé du moteur asynchrone

Equations électriques :

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

➤ **Au stator :**

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \varphi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \varphi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

➤ **Au rotor :**

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \varphi_{ra} = 0 \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \varphi_{rb} = 0 \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rc} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Soit en écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_S][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [v_r] = [R_R][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

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.

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:

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{II.28})$$

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 :

$$[\varphi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{II.29})$$

Où :

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

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.

$M_s = M_r$: Inductance mutuelle entre phases du stator et du rotor.

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

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

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

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

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

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

Equation mécanique :

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

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega_m}{P} \quad (\text{II.33})$$

D'autre part :

$$\omega_m = \frac{(d\theta_m)}{dt} \quad (\text{II.34})$$

II.7.2.3 Modèle biphasé de la MAS

Transformation d-q :

Le principe de la transformation d-q 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 d-q $[P(\theta)]$. On applique la transformation d-q pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle, les repères de la transformation d-q des grandeurs statorique et celle des grandeurs rotorique doivent coïncider. On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant. [45]

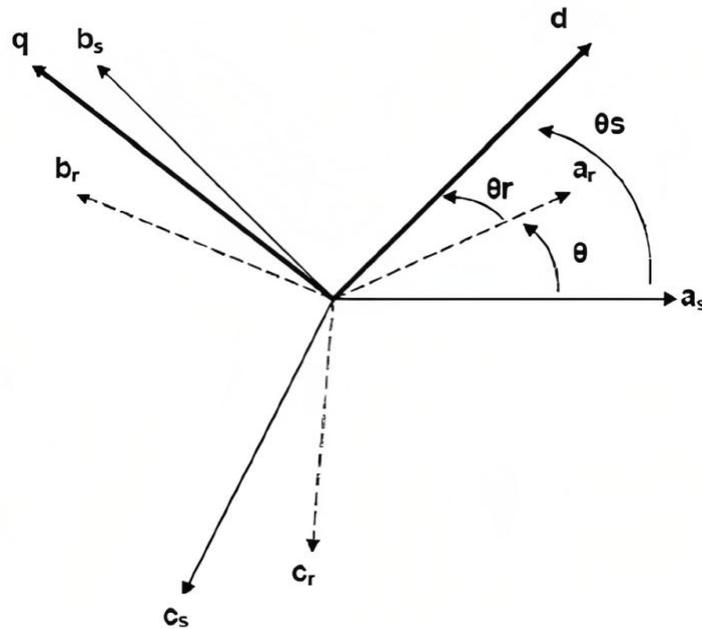


Figure II. 13: Représentation des axes de la machine

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

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 :

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

X : tension, courant ou flux.

o : indice de l'axe homopolaire.

II.7.2.4 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) :

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_m) \varphi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_m) \varphi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \mathcal{L}_s i_{ds} + \mathcal{M} i_{dr} \\ \varphi_{qs} = \mathcal{L}_s i_{qs} + \mathcal{M} i_{qr} \\ \varphi_{dr} = \mathcal{L}_r i_{dr} + \mathcal{M} i_{ds} \\ \varphi_{qr} = \mathcal{L}_r i_{qr} + \mathcal{M} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

En introduisant le système d'équations (II.38) dans (II.37), et en posant

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

ω_s : La pulsation statorique.

ω_r : La pulsation rotorique.

ω_m : La pulsation mécanique.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \mathcal{L}_s p i_{ds} + \mathcal{M} p i_{dr} - \omega_s (\mathcal{L}_s i_{qs} + \mathcal{M} i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \mathcal{L}_s p i_{qs} + \mathcal{M} p i_{qr} + \omega_s (\mathcal{L}_s i_{ds} + \mathcal{M} i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \mathcal{L}_r p i_{dr} + \mathcal{M} p i_{ds} - \omega_r (\mathcal{L}_r i_{qr} + \mathcal{M} i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \mathcal{L}_r p i_{qr} + \mathcal{M} p i_{qs} + \omega_r (\mathcal{L}_r i_{dr} + \mathcal{M} i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_s &= L_s - M_s \\ \mathcal{L}_r &= L_r - M_r \\ \mathcal{M} &= \frac{3}{2} M \end{aligned}$$

L'écriture sous forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \mathcal{L}_s & 0 & -\omega_s \mathcal{M} \\ \omega_s \mathcal{L}_s & R_s & \omega_s \mathcal{M} & 0 \\ 0 & -\omega_m \mathcal{M} & R_r & -\omega_m \mathcal{L}_r \\ \omega_m \mathcal{M} & 0 & \omega_m \mathcal{L}_s & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & 0 & \mathcal{M} & 0 \\ 0 & \mathcal{L}_s & 0 & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & 0 & \mathcal{L}_r & 0 \\ 0 & \mathcal{M} & 0 & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

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

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.41})$$

II.7.3 Modélisation de la pompe [46]

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse :

$$f(H, Q, \omega) = 0 \quad (\text{II.42})$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante .La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$HMT = H_g + P_c \quad (\text{II.43})$$

H_g = hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

P_c = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elle s'exprime de cette façon :

$$P = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^5} \right) = K_p Q^2 \quad (\text{II.44})$$

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

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

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_p : Constante de la canalisation.

Q : le débit de la pompe.

Dans cette application, la pompe centrifuge est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit Q.

En prenant comme paramètre la vitesse de rotation de moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression :

$$HMT = C_1\omega^2 - C_2\omega Q - C_3Q^2 \quad (\text{II.45})$$

C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes de la pompe données par le constructeur.

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.46})$$

Où :

Ω : 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)

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad /s)

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation des différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque a été élaborée à partir des modèles mathématiques. Pour le générateur photovoltaïque, nous avons présenté un modèle mathématique qui considère l'influence des différents paramètres météorologique, ensuite présenté un modèle mathématique pour le moteur asynchrone ainsi que la pompe centrifuge et nous avons décrit brièvement le modèle des convertisseurs statiques (hacheur et onduleur).

Cette modélisation est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la commande de ce système dans les chapitres qui suivent.

Chapitre III

Simulation du système de pompage photovoltaïque

III.1 Introduction :

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque une étude dimensionnelle est nécessaire ainsi que l'application d'une commande pour l'optimisation et le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous allons en premier lieu présenter quelques techniques d'optimisation existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. Nous allons ensuite présenter la commande vectorielle de la machine asynchrone, et finalement présenter brièvement les différentes étapes du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

Afin d'évaluer les performances des méthodes de commande étudiées avant d'établir un prototype réel, la simulation est la meilleure solution. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

III.2 Description du système à simuler :

Notre système est composé, comme le montre la Figure III.1 :

- **Les panneaux photovoltaïques :** permettent l'alimentation de la charge (motopompe).
- **La commande MPPT :** permet d'extraire la puissance maximale produite par les panneaux PV.
- **Le convertisseur DC/DC :** fournit une tension continue réglable à partir d'une tension continue d'alimentation.
- **Le convertisseur DC/AC :** fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.
- **Groupe motopompe :** convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge.

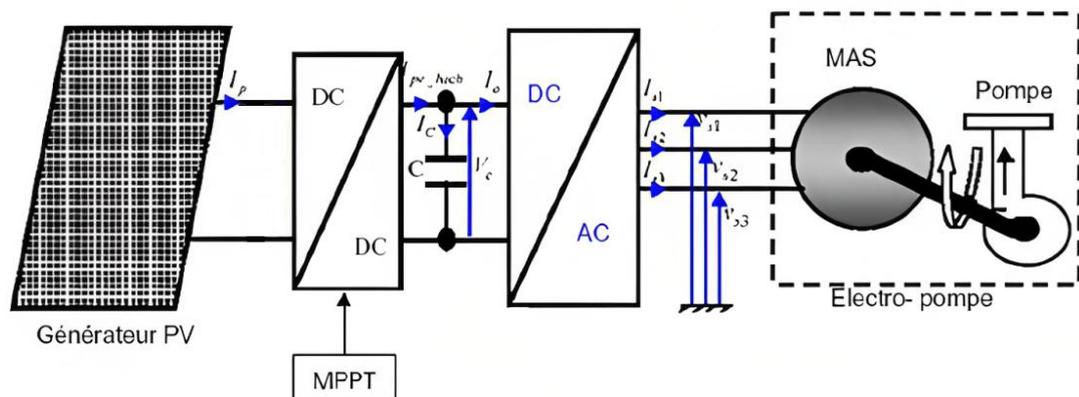


Figure III. 1: Schéma d'un système de pompage photovoltaïque [47]

III.3 Optimisation du système de pompage photovoltaïque

La production de l'énergie solaire photovoltaïque est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque (PV) ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance.

Pour que ce système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximum de leur caractéristique, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin.

La meilleure combinaison s'appelle dans la littérature « recherche du point de puissance maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT), elle donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnés [48].

III.4 Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La technique de poursuite du point de puissance maximale délivrée est basée sur l'introduction d'un convertisseur continu/continu (hacheur) entre le générateur et la charge qui permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelles que soient les conditions météorologiques (irradiation, température).

Le principe de la commande est de faire varier la valeur du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction du résultat de l'algorithme de commande, de manière à forcer le système à fonctionner au point de puissance maximale.

En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V) jusqu'à se placer sur le MPP. [49]

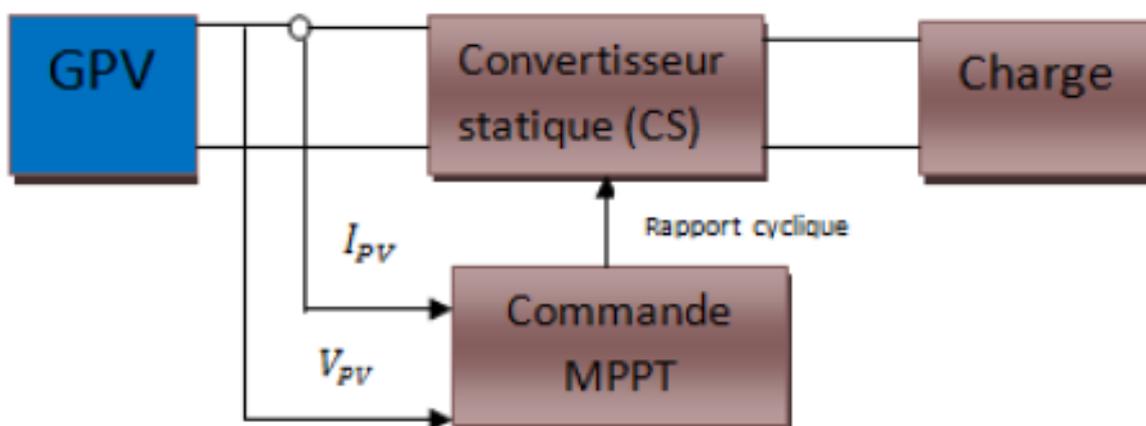


Figure III. 2: chaîne de conversion d'énergie solaire. [50]

III.4.1 Les méthodes de MPPT :

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes effectuant la recherche du PPM peuvent être utilisées :

- La méthode d'incrément de conductance,
- La méthode Perturbation Observation (P&O),
- La méthode d'ajustement de courbe,
- La méthode « look-up table »,
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur,
- La méthode de court-circuit,
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones)

Dans ce chapitre nous intéressons à la méthode perturbation & observation (P&O). Vu sa facilité d'implémentation, elle permet d'obtenir un bon rendement. [51]

III.4.2 La méthode Perturbation & Observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension (ou le courant) afin d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV.

La figure III.3 montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite.

De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM. [51]

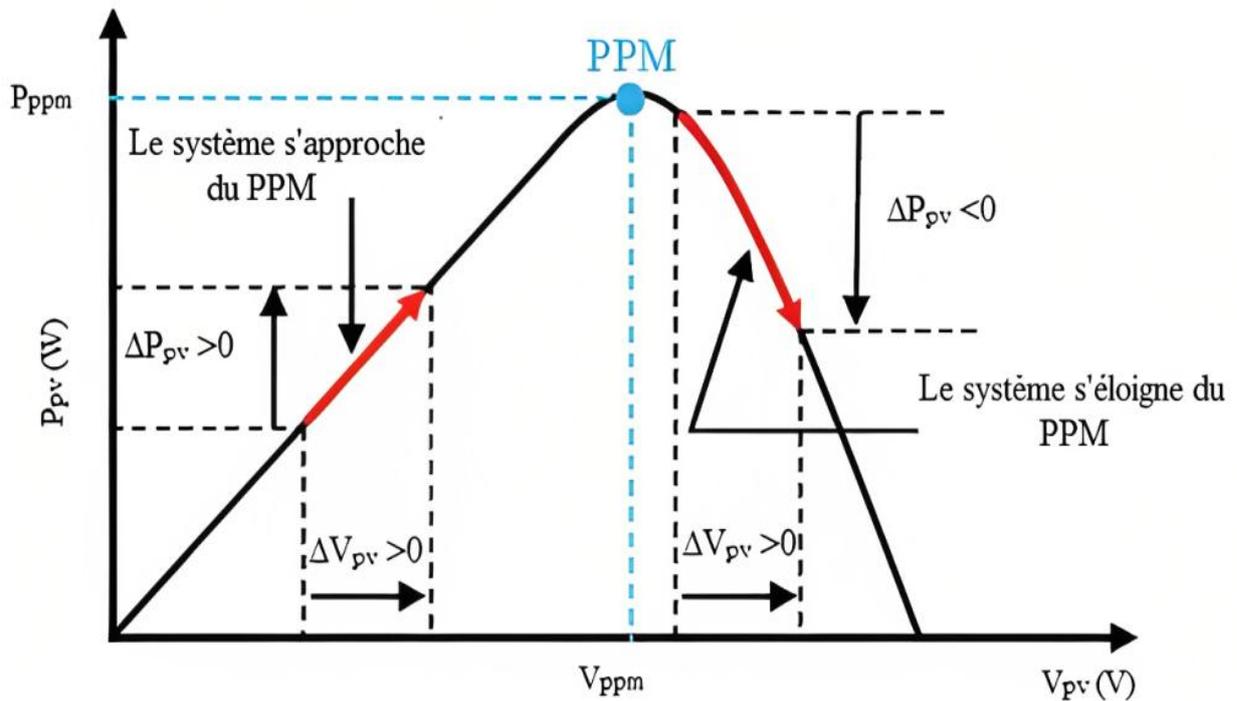


Figure III. 3: Principe de la P&O illustré sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque [52]

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

Facile à utiliser et à implanter dans un système de contrôle d'un panneau photovoltaïque, la P&O présente toutefois des inconvénients. En effet, elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM.

Un autre inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer et donner de mauvaises interprétations de la localisation du MPP lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques. [53]

La figure (III.4) illustre l'organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant.

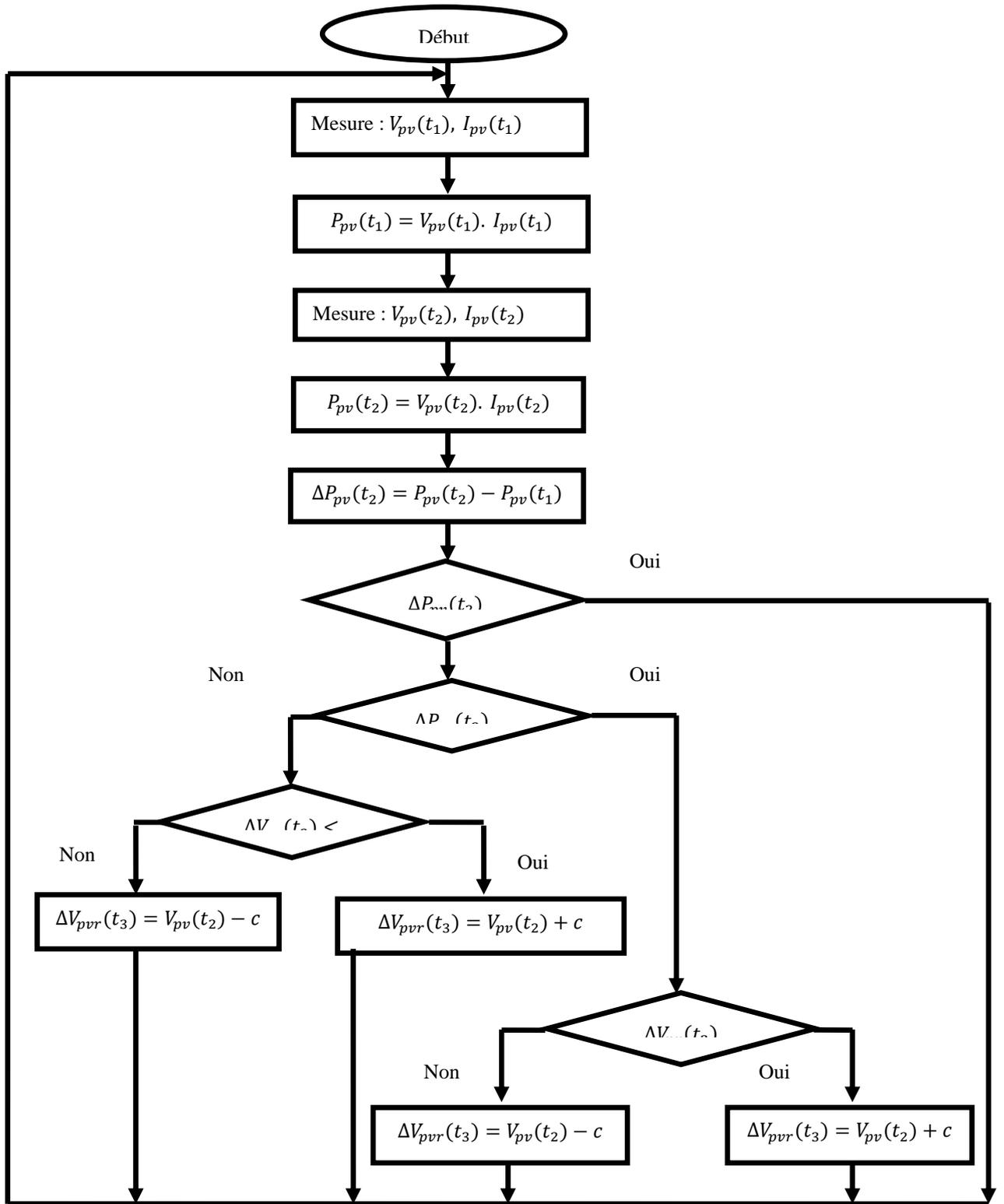


Figure III. 4: Organigramme de la méthode perturbation et observation.

III.5 La commande vectorielle de la machine asynchrone :

Le contrôle vectoriel de la machine asynchrone aussi appelée commande à flux orienté (field-oriented control en anglais), consiste principalement à commander en régime dynamique et séparément (de façon découplée), le flux et le couple comme c'est le cas (naturellement) pour une machine à courant continu. En fait, nous cherchons de nous rapprocher de la commande d'une machine à courant continu, en éliminant tous les problèmes causés par le moteur à courant continu (coût, entretien lourd, puissance massique inférieure...)

Le contrôle vectoriel consiste donc à choisir un système d'axe (d, q), de façon à régler le flux par une composante du courant (I_{sd}) et le couple par l'autre composante (I_{sq}). Ainsi, on peut construire une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. [54]

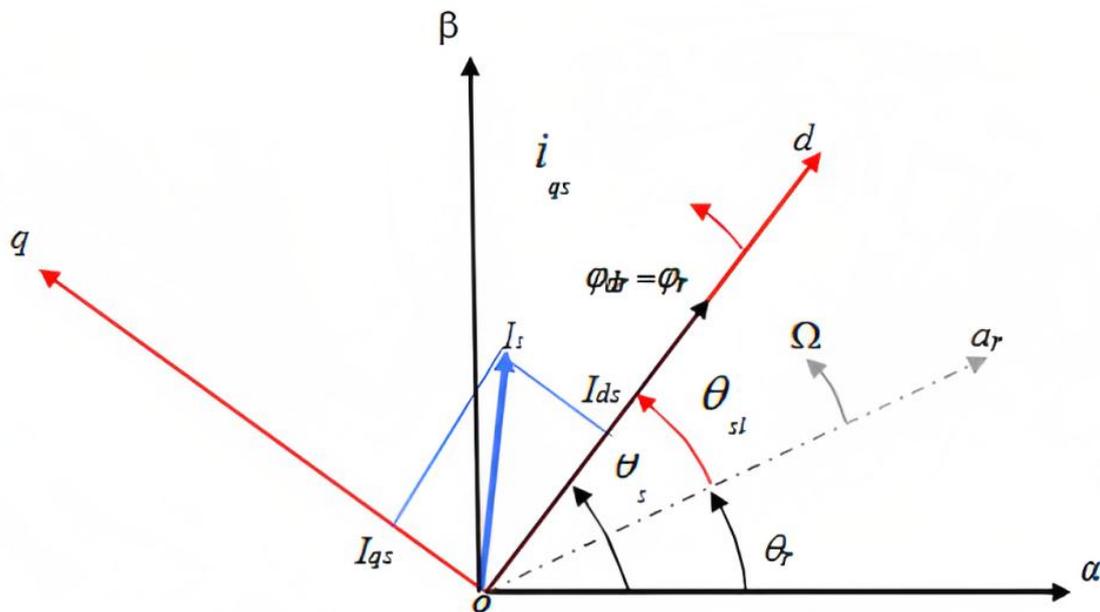


Figure III. 5: Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer). [55]

III.5.1 Choix d'orientation de flux :

La méthode de flux orienté est basée sur le choix du repère de référence, suivant la vitesse attribuée au repère, nous choisissons un référentiel lié au champ tournant tel que l'axe « d » coïncide avec la direction désirée du flux (statorique, rotorique ou entrefer)

Il existe trois types de référentiel :

1. Orientation du flux rotorique: $\varphi_{rq}=0, \varphi_{rd}=\varphi_r$.
2. Orientation du flux statorique: $\varphi_{sq}=0, \varphi_{sd}=\varphi_s$.
3. Orientation du flux d'entrefer : $\varphi_{mq}=0, \varphi_{md}=\varphi_m$.

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée car elle élimine l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer. [56]

Dans la suite de notre travail l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera utilisée.

III.6 Dimensionnement du système de pompage PV [57] :

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, nous permettra de définir les éléments de notre système et de déterminer le nombre de panneaux nécessaires pour satisfaire les besoins quotidiens en eau.

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

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

III.6.1 Evaluation des besoins en eau :

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau estimés pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse de vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système. [58]

III.6.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Pour le calcul de l'énergie hydraulique on doit tenir compte de deux facteurs :

- La quantité d'eau requise
- La hauteur manométrique totale (*HMT*) à laquelle cette eau doit être élevée pour pouvoir être utilisée.

La puissance hydraulique nécessaire pour assurer le déplacement de la quantité d'eau d'un niveau à un autre est donnée par la formule suivante :

$$P_H = Q_m \cdot \rho \cdot g \cdot HMT \quad (\text{III.1})$$

Avec :

Q_m : Est le débit horaire moyen de la pompe centrifuge

ρ : Densité de l'eau (1000 kg/m³)

g : Constante de la gravité

III.6.3 Dimensionnement de la pompe centrifuge

Comme on l'a déjà dit lors du calcul de la puissance hydraulique nécessaire, la connaissance de cette puissance nous ramène à dimensionner la pompe avec un débit et une hauteur supposés connus. Pour notre système, le débit nominal (Q_n) de la pompe est égal à 22m³ /h.

La hauteur manométrique totale (HMT) correspond au débit nominal est égale à 10m, on aura alors une puissance hydraulique :

$$P_H = \frac{22}{3600} \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 10 = 0.6 \text{ kW}$$

Or que, la puissance mécanique (P_{mec}) que reçoit la pompe pour assurer la puissance hydraulique et qui dépend du rendement (η_p) de la pompe est :

$$P_{mec} = \frac{P_H}{\eta_p} \quad (\text{III.2})$$

Si le rendement de la pompe centrifuge est de 55%, la puissance mécanique requise par la pompe sera :

$$P_{mec} = \frac{0.6}{0.55} = 1.09 \text{ kW}$$

Cette puissance est généralement donnée par le constructeur de la pompe choisie. La connaissance de cette puissance permet de choisir le moteur d'entraînement.

III.6.4 Dimensionnement du moteur

Le dimensionnement du moteur réside dans le calcul de la puissance électrique qu'il lui faut pour entrainer la pompe, cette puissance est exprimée en (W) et se calcule par la puissance mécanique requise par la pompe et le rendement du moteur, par la suite nous aurons :

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (III.3)$$

Avec :

- η_m : Rendement du moteur.
- P_{ele} : Puissance électrique nécessaire pour que le moteur fonctionne.

Pour notre cas :

$$P_{ele} = \frac{1.09}{0.85} = 1.28 \text{ kW}$$

Or que la puissance électrique demandée (P_d) qui devra être réellement fournie transite par les convertisseurs statiques, ce qui occasionne une perte de puissance, ce qui nous permet donc de tenir compte du rendement (η_{ond}) de la conversion DC-AC de l'onduleur comme suit :

$$P_d = \frac{P_{ele}}{\eta_{ond}} \quad (III.4)$$

Le rendement de l'onduleur est de l'ordre de 95%, ce qui nous donne donc :

$$P_d = \frac{1.28}{0.95} = 1.35 \text{ kW}$$

D'où les besoins énergétique en électricité journalière peuvent être évalués comme suit :

$$E_c = P_d \cdot t_p \text{ (en } \frac{kWh}{j} \text{)} \quad (III.5)$$

Tel que :

E_c : est l'énergie journalière demandé par la charge (groupe motopompe)

t_p : est le temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau et qui se calcul comme suit :

$$t_p = \frac{V}{Q_n} = \frac{70}{22} = 3,18 \frac{\text{heures}}{\text{jour}}$$

Avec : V : la consommation quotidienne du village qui est estimée à 70 m³.

D'où l'énergie journalière E_c demandée par la charge sera égale à :

$$E_c = P_d \cdot t_p = 1,35 \cdot 3,18 = 4,29 \frac{kWh}{j}$$

III.6.5 Dimensionnement du générateur PV

La puissance du générateur photovoltaïque (P_g) à installer doit tenir compte de l'énergie journalière demandée par la charge (E_c), de la durée moyenne journalière de l'ensoleillement (égale à t_p) et des pertes qu'on suppose égale à environ 15% de la puissance attribuables à la température, la poussière et les pertes du convertisseur DC-DC.

Donc la puissance théorique du générateur PV est donnée par :

$$P_g = \frac{E_c}{t_p \cdot (1 - \text{pertes})} \quad (\text{III.6})$$

Le nombre de panneaux nécessaire se calcule par :

$$N \geq \frac{P_g}{P_s} \quad (\text{III.7})$$

Avec P_s : Puissance normalisée du panneau (puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque à un éclairement de 1000 W/m² et une température de 25°C.

Pour notre cas on prend un module de puissance P_s égale à 80W.

D'où :

$$P_g = \frac{4,29 \cdot 1000}{3,18 \cdot (1 - 0,15)} = 1587,12 \text{ W}$$

Donc, le nombre de panneaux nécessaire est de :

$$N \geq \frac{1587,12}{80} = 19,84$$

On prend alors, $N=20$ panneaux.

III.7 Test de la méthode Perturbation & Observation (P&O)

Pour faire une étude de la robustesse de la technique proposée vis-à-vis des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

Nous soumettons les systèmes contrôlés à différentes conditions environnementales :

- ✓ D'abord, on maintient une température constante ($T=25^\circ\text{C}$) et on varie l'éclairement solaire suivant une variation rapide ou bien lente :
- ✓ Ensuite, on maintient l'éclairement solaire à une valeur fixe (1000 W/m²) et on varie la valeur de la température suivant une variation rapide ou bien lente.

Et enfin, on soumet le contrôleur MPPT à des changements aléatoires des variables de température et de l'ensoleillement.

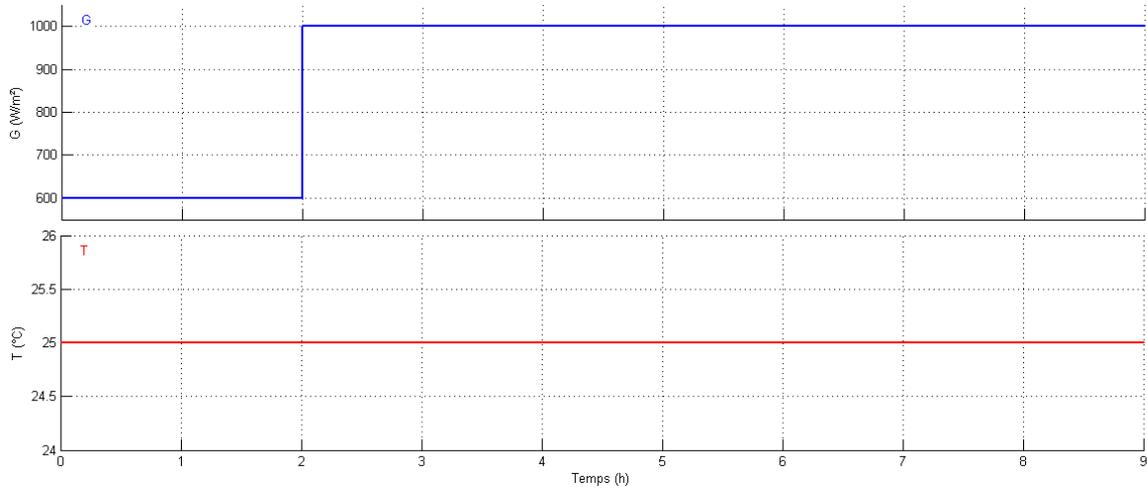


Figure III. 6: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.

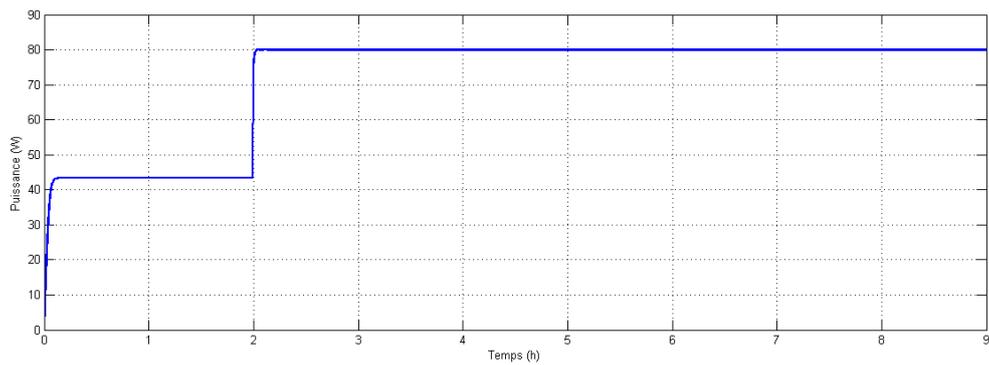


Figure III. 7: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

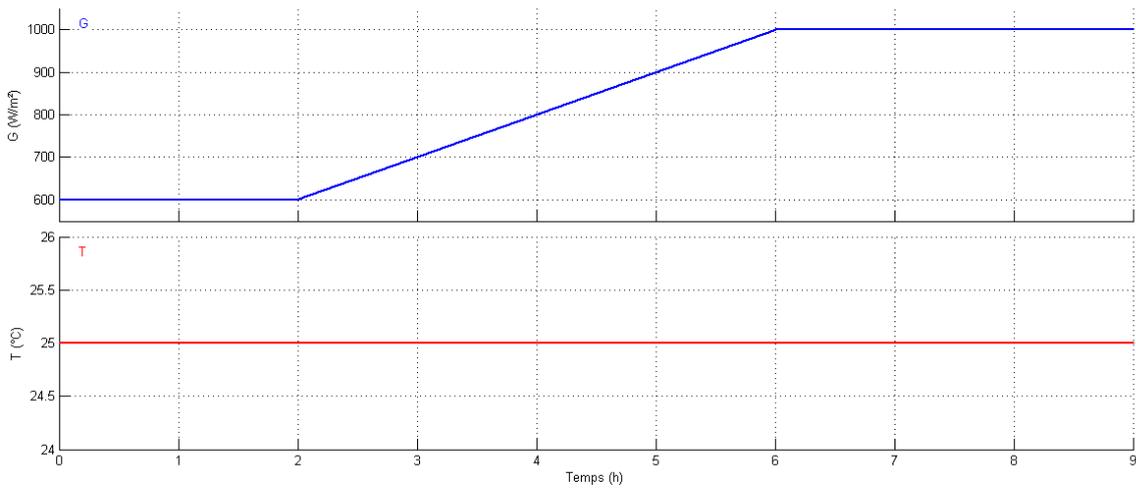


Figure III. 8: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps.

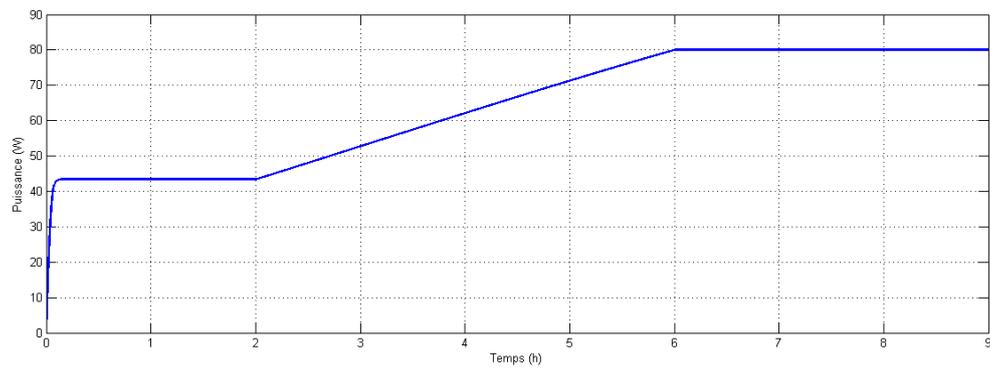


Figure III. 9: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

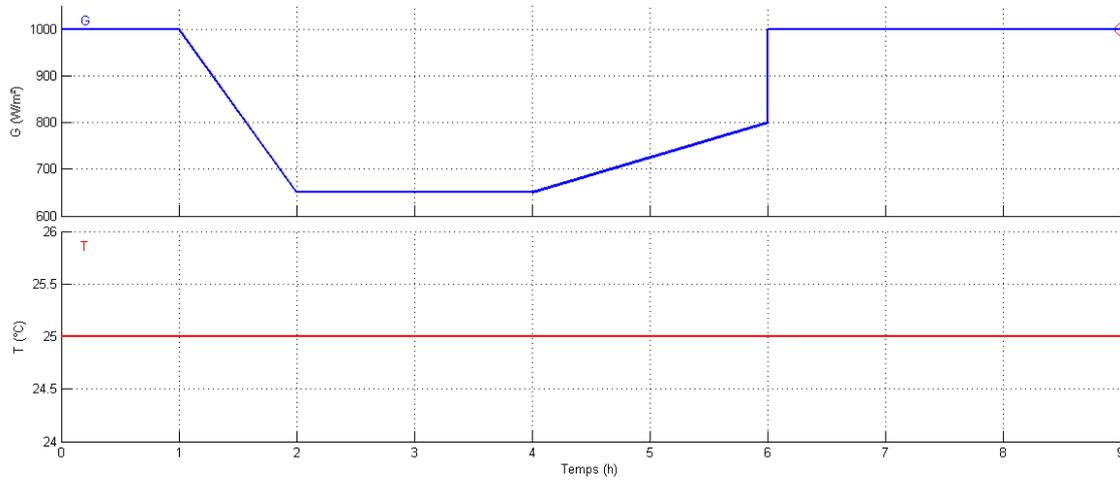


Figure III. 10: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

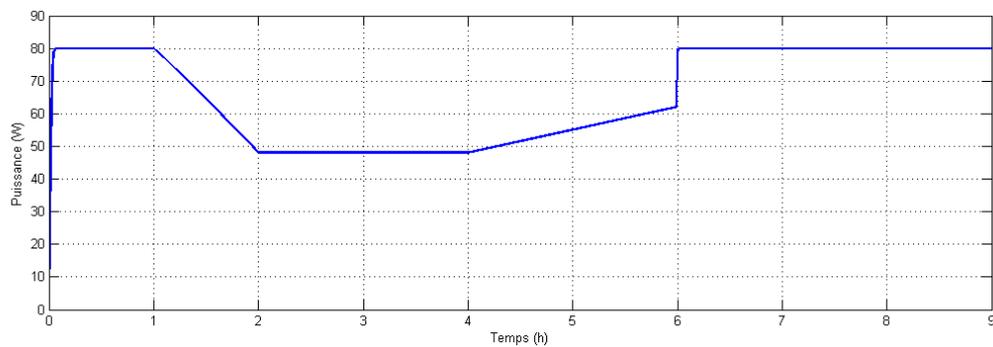


Figure III. 11: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

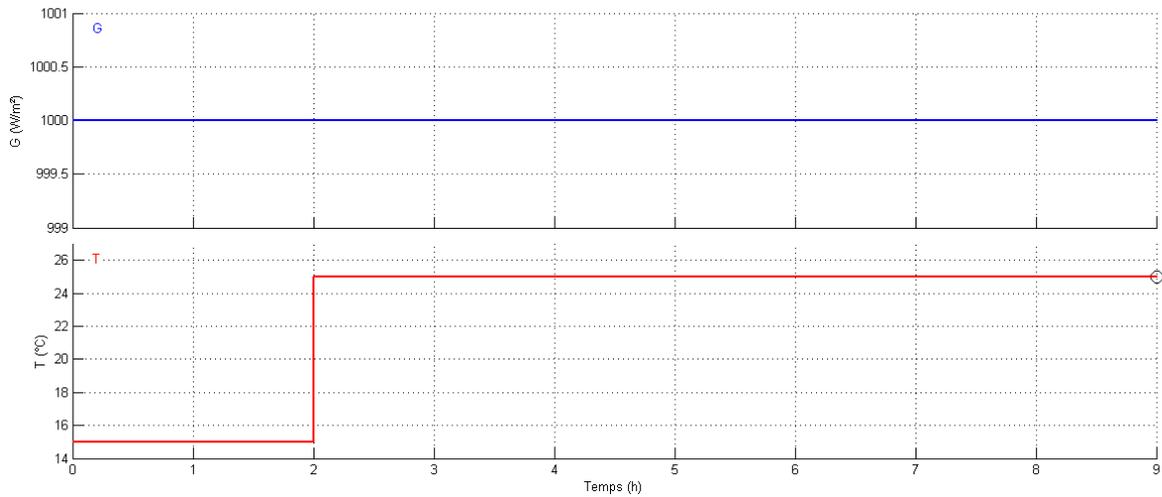


Figure III. 12: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

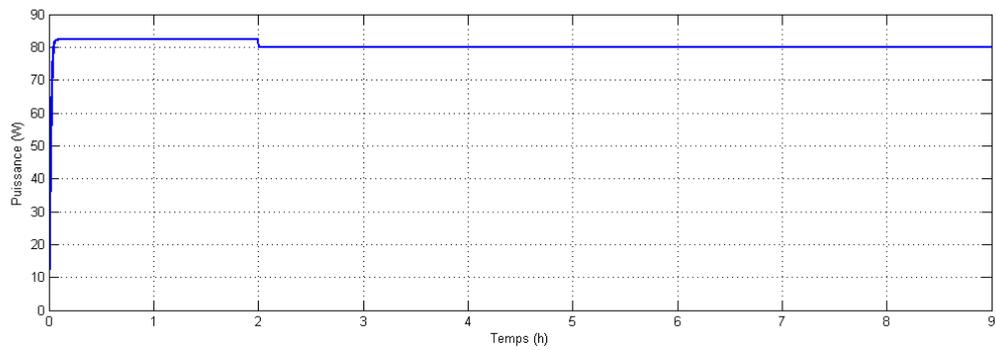


Figure III. 13: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

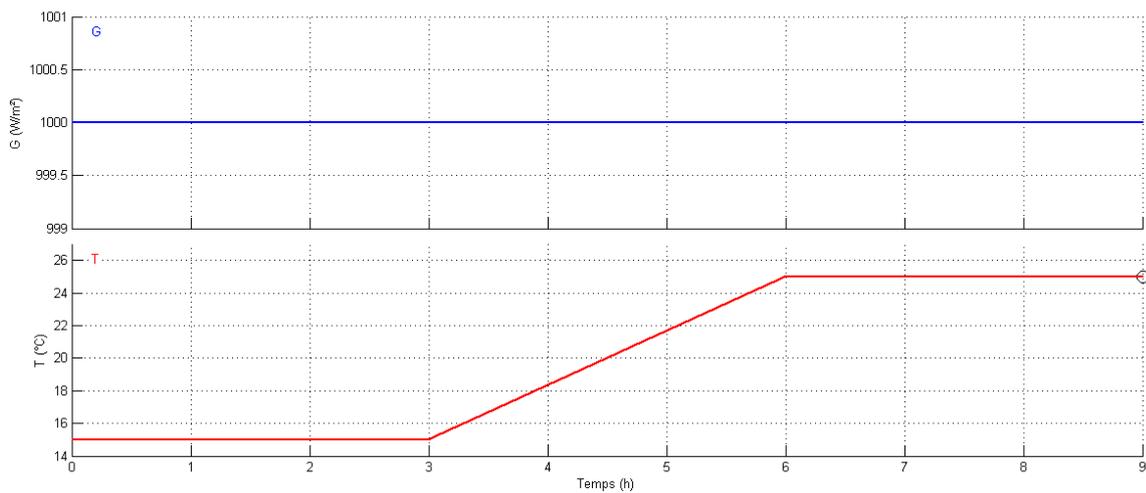


Figure III. 14: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

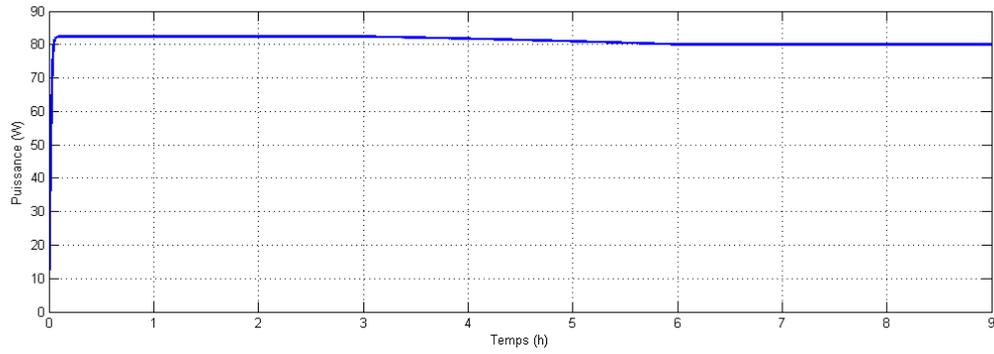


Figure III. 15: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

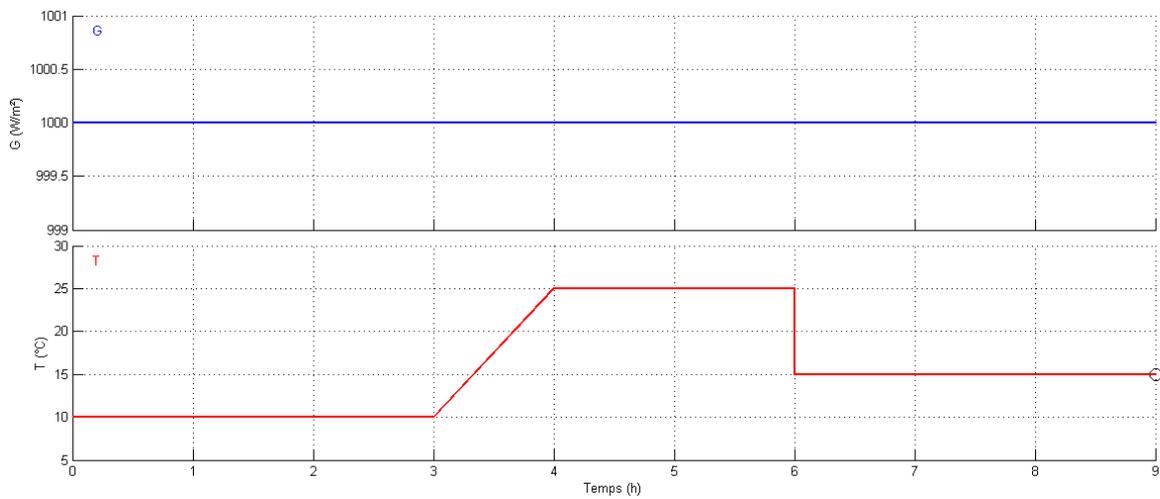


Figure III. 16: Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

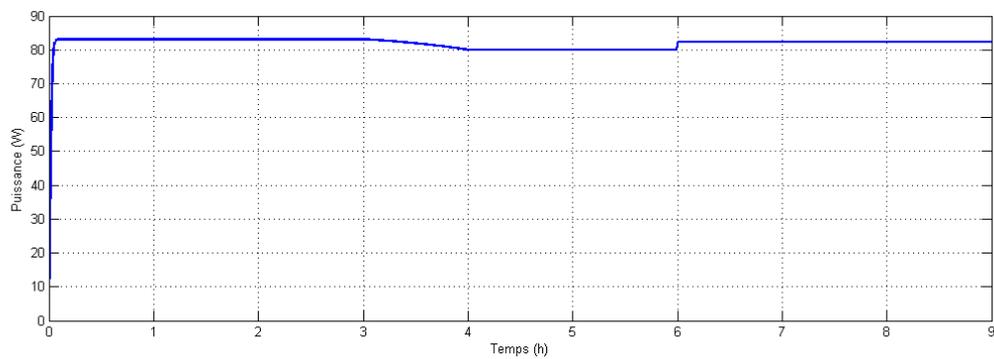


Figure III. 17: Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

Résultats : Les résultats obtenus lors de ces tests indiquent que le contrôleur MPPT suit la consigne (variation de l'ensoleillement) et il donne des résultats satisfaisants. Il présente aussi une très bonne poursuite, donc le point de puissance maximal se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température. L'augmentation de la température implique toujours une diminution de la puissance.

III.8 Simulation du système global

Pour la simulation de notre système de pompage photovoltaïque on prend le cas d'une journée aléatoire de l'année dont les variations de l'éclairement et de température sont données par la figure (III.18). Avec l'exploitation de la puissance maximale produite par le générateur PV pour les différentes valeurs d'éclairement et de température, en utilisant la commande P&O présentée précédemment.

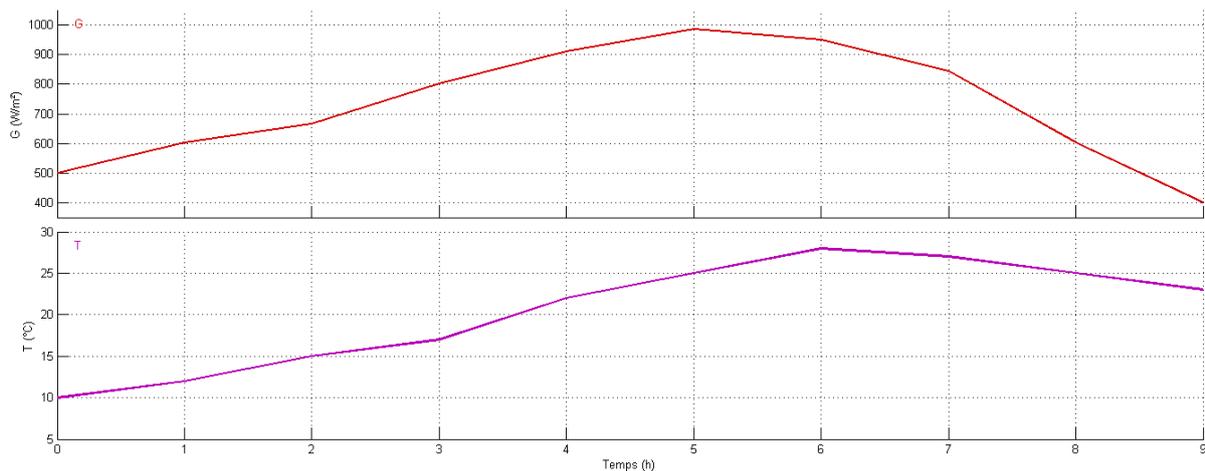


Figure III. 18: Variation de l'ensoleillement et de la température

Les courbes du courant, de la tension et de la puissance obtenues à la sortie des panneaux photovoltaïques sont les suivantes :

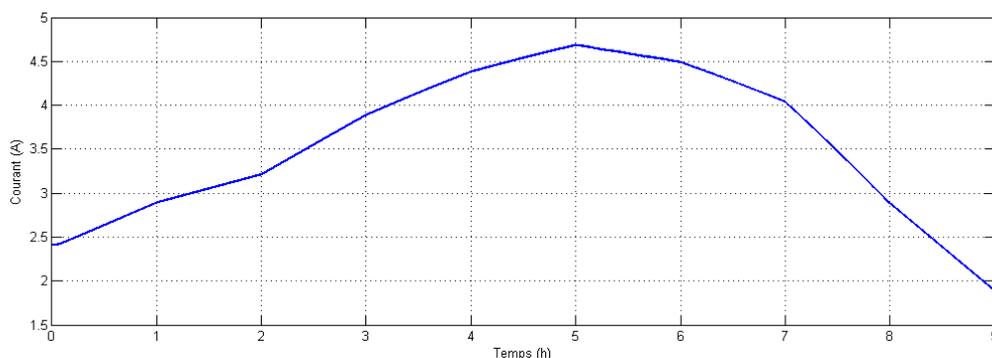


Figure III. 19: Courant optimal à la sortie des panneaux photovoltaïques

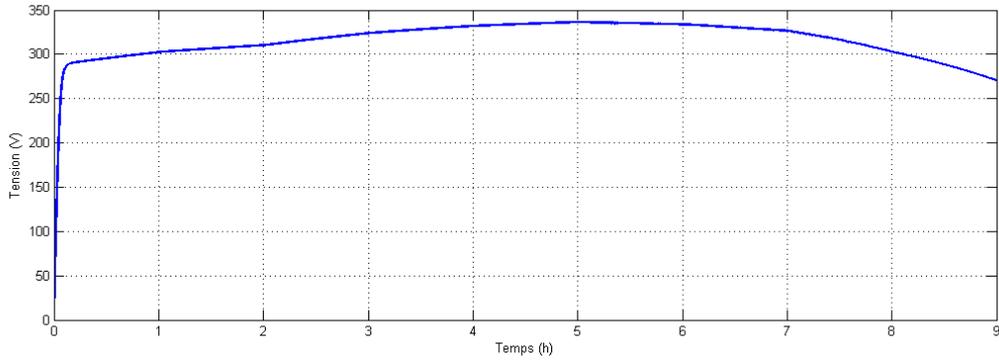


Figure III. 20: Tension optimale á la sortie des panneaux photovoltaïques

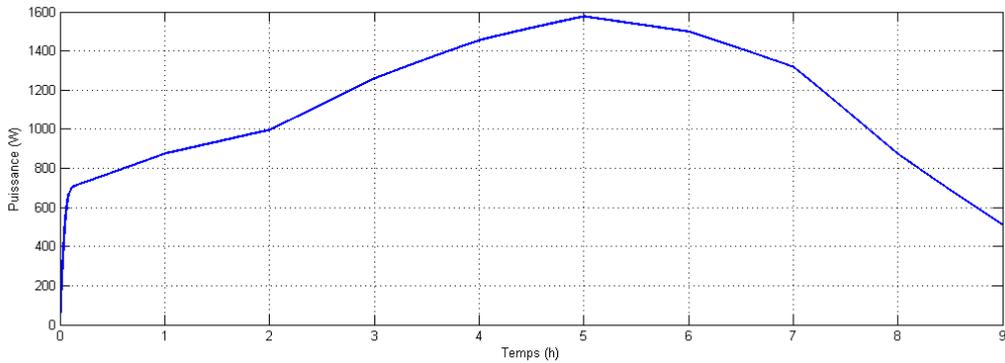


Figure III. 21: Puissance optimale á la sortie des panneaux photovoltaïques

Les variations climatiques influent énormément sur les paramètres électriques délivrés par les générateur PV. La puissance maximale délivrée par les GPVs est entre 4h et 6h lorsque l'éclairement est á son maximum.

La simulation de système de pompage photovoltaïque nous donne les résultats suivants :

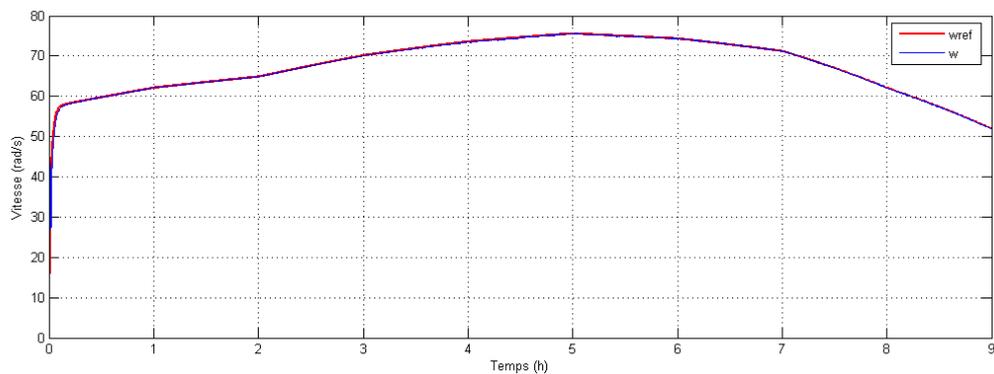


Figure III. 22: Vitesse de rotation et la vitesse de référence du groupe motopompe

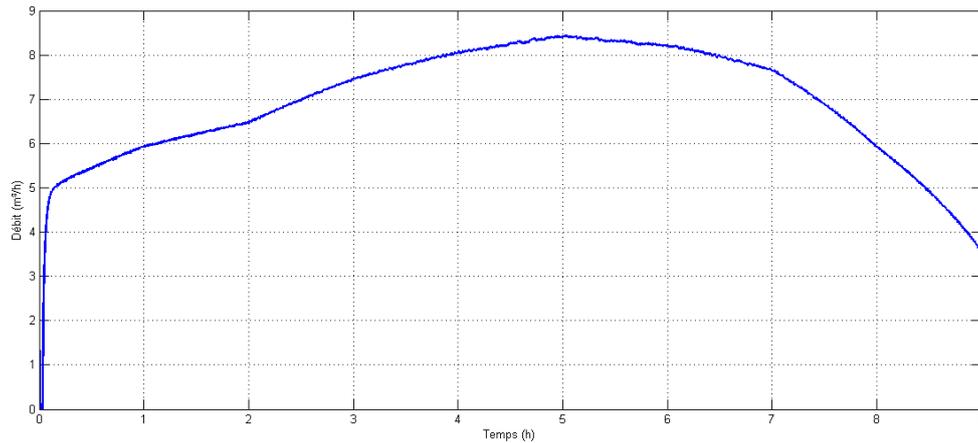


Figure III. 23: Débit d'eau pompée par la pompe

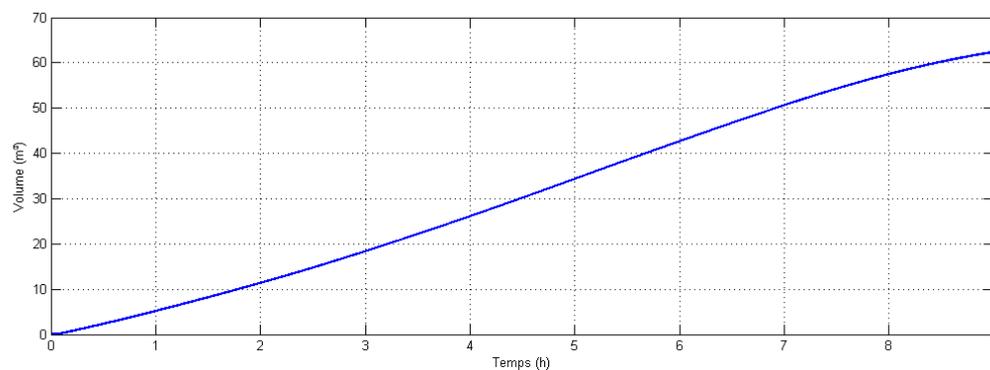


Figure III. 24: Volume d'eau pompée par le groupe motopompe

Discussion des résultats :

A partir des courbes obtenues, on remarque que :

La vitesse de rotation du groupe motopompe et le débit délivré par la pompe varient en fonction de l'ensoleillement solaire, une variation de l'éclairement engendre une variation de puissance délivrée par le générateur qui va être ressentie par la machine.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques méthodes pour l'optimisation du système photovoltaïque nous avons décrit la commande MPPT, qui permet la recherche de point précis de puissance maximale. Dans notre travail on a choisi l'algorithme Perturbation et observation (P&O) pour sa simplicité et sa facilité de réalisation. Ensuite nous avons présenté le principe de la commande vectorielle de la machine asynchrone.

Ce chapitre aussi était consacré pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque où nous avons élaboré une étude dimensionnelle des éléments constituant la chaîne de pompage photovoltaïque étudiée.

Finalement à l'aide du logiciel Matlab/Simulink les performances du système de pompage photovoltaïque ont été testées et représentées pour différents profils d'ensoleillement et de températures.

Dans le chapitre qui suit, on va présenter la commande par mode glissant, et à l'aide des résultats de la simulation obtenus dans ce chapitre on va faire une comparaison entre cette commande et la commande vectorielle.

Chapitre IV

Commande par mode glissant du système de pompage PV

IV.1 Introduction

Les lois de commande classique donnent des bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes.

De nombreux systèmes réels présentent en plus des perturbations extérieures, des non linéarités et des erreurs paramétriques. Le recours à des algorithmes de commande robuste est donc souhaitable aussi bien en stabilisation qu'en poursuite de trajectoire.

La commande en régime glissant (ou plus exactement la commande à structure variable générant un régime glissant) qui par sa nature est une commande non linéaire, possède cette robustesse.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques notions fondamentales de la commande par mode glissant, ensuite nous allons l'appliquer à notre système de pompage photovoltaïque.

Afin d'évaluer les performances de la commande étudiée, la simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK est la meilleure solution.

IV.2 Commande par mode glissant : [59]

La commande par mode glissant est une classe de la commande à structure variable, elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires.

La commande par mode glissant consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers une surface désirée (surface de glissement) à partir de n'importe quel point dans le plan de phase, et de faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre.

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.

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.

C'est une approche particulière de la conception des systèmes à structures variables développée il y a longtemps. La principale différence de cette technique par rapport aux contrôleurs classiques est la grande fréquence de commutation du système.

IV.3 Les systèmes à structures variables :

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation.

Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure. [60]

Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase. [61]

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [61] :

- **Le mode de convergence (MC) :** C'est le mode durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point initial du plan de phase vers la surface de commutation $S(x, y) = 0$ et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- **Le mode de glissement (MG) :** C'est le mode durant lequel la variable d'état à atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y) = 0$.
- **Le mode de régime permanent (MRP) :** Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

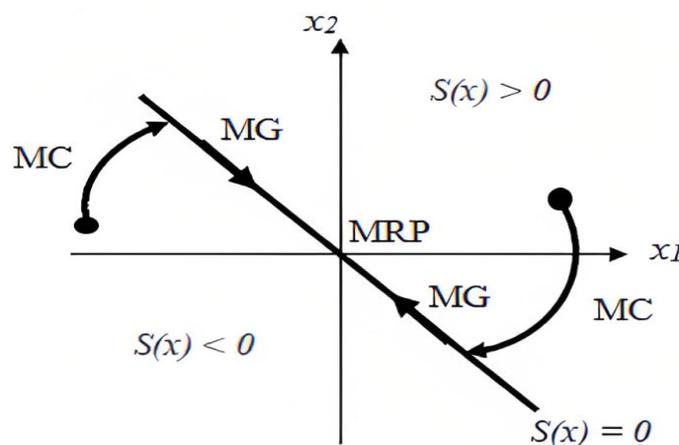


Figure IV. 1: Les modes de trajectoire dans le plan de phase. [61]

IV.4 Conception de la commande par mode glissant :

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

1. Le choix de la surface.
2. L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
3. La détermination de la loi de commande.

IV.4.1 Choix de la surface de glissement :

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme. En fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivant [62] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \\ y = C^t x, \quad y \in \mathbb{R}^m \end{cases} \quad (\text{IV-1})$$

Il faut choisir « m » surfaces de glissement pour un vecteur y de dimension « m ». En ce qui concerne la forme de la surface, deux possibilités se présentent ; soit dans le plan de phase ou dans l'espace d'état, deux possibilités sont offertes. La première dans le plan d'état et la seconde dans le plan de phase. La première présente une réponse transitoire lente et elle est parfois de conception difficile. Par contre la deuxième est une fonction scalaire assujettie à la dynamique désirée.

J. J. Slotine propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{IV-2})$$

Avec :

$e(x)$: L'écart de la variable à régler $e(x) = x_{ref} - x$.

λ_x : Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour $r = 1$, $S(x) = e(x)$.

Pour $r = 2$, $S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$.

Pour $r = 3$, $S(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$.

$S(x) = 0$ Est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$.

En d'autre terme, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence. La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre « r ».

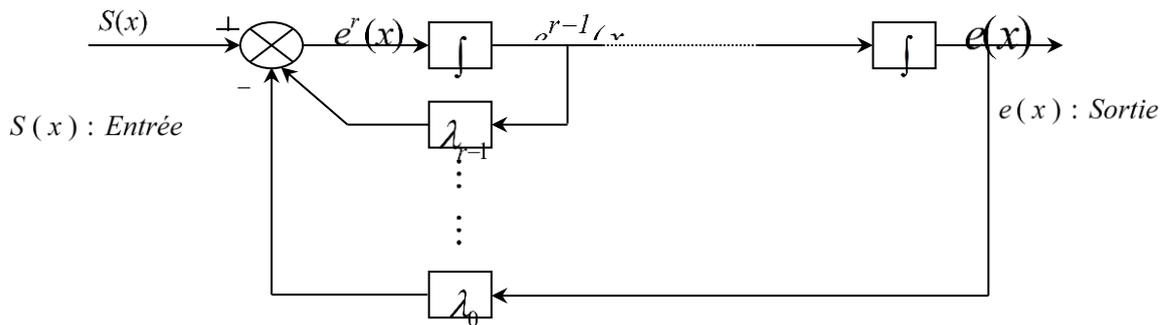


Figure IV. 2: Linéarisation exacte de l'écart

IV.4.2 Conditions de convergence

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions, celles-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système.

IV.4.2.1 Fonction directe de commutation

Elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \tag{IV-3}$$

IV.4.2.2 Fonction de LYAPUNOV

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction. Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires [62].

La fonction de LYAPONOV est définie comme suivant :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \tag{IV-4}$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \tag{IV-5}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \tag{IV-6}$$

L'équation (VI. 6) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimée par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés comme on le constate sur la figure (IV-3). Cette condition suppose un régime glissant idéal.

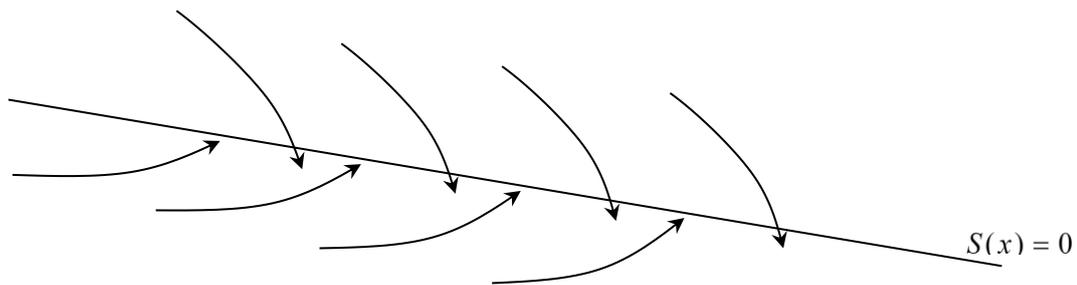


Figure IV. 3: Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.

IV.4 .3 Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande 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.

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre u_{Max} et u_{Min} instantanément (fréquence infinie), en fonction du signe de la surface de glissement (Figure IV-4) .Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées « *Broutement* » ou « *Chattering* » apparaissent dans le mode glissant.

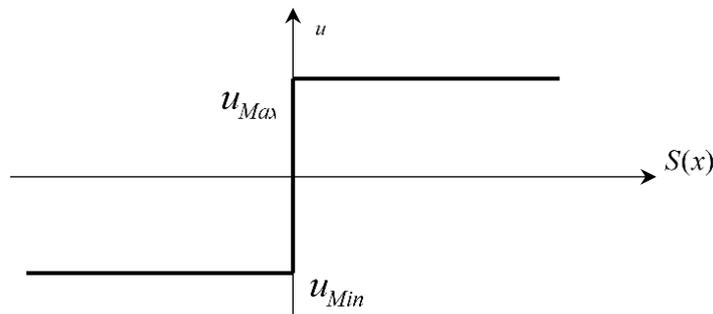


Figure IV. 4: Commande appliquée aux systèmes à structure variable.

a. Définition des grandeurs de commande :

Comme il a été vu précédemment, la surface de glissement se détermine en fonction du système et des performances désirées, indépendamment de la commande, et l’obtention du régime glissant supposerait la commande discontinue .De ce fait, si cette commande est indispensable, elle n’empêche nullement, au contraire, qu’une partie continue lui soit adjointe pour diminuer l’amplitude de la discontinuité.

Par conséquent, la structure d’un contrôleur comporte deux parties ; une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante .Cette dernière est très importante dans la technique de commande par modes glissant, car elle est utilisée pour rejeter les perturbations extérieures.

Nous posons donc :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \tag{IV-7}$$

$u_{eq}(t)$ Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin. Cette commande est considérée comme la plus directe et la plus simple .Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par : $\dot{S}(x) = 0$

$u_N(t)$ Est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence $S(x)\dot{S}(x) < 0$.Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc

pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et il est donné par : $\dot{S}(x) = u_N$

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre u_{Max} et u_{Min} .

b. Expression analytique de la commande :

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV-8):

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (IV-8)$$

Le vecteur u est composé de deux grandeurs : u_{eq} et u_N , soit :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \quad (IV-9)$$

Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \{f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} \quad (IV-10)$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\} u_N = 0 \quad (IV11)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur (IV-11) dans l'équation (IV-8). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} \quad (IV12)$$

Le problème revient à trouver u_N tel quel :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} < 0 \quad (IV-13)$$

La solution la plus simple est de choisir u_N sous la forme de relais. Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_N = K \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (\text{IV-14})$$

En remplaçant l'expression (IV-14) dans (IV-13), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x,t)K|S(x)| < 0 \quad (\text{IV-15})$$

Où le facteur $\frac{\partial S}{\partial x} g(x,t)$ est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (IV-15). 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 des 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 [62].

IV.5 Phénomène de broutement (chattering) :

Pour des raisons de perturbations ou de paramètres du système mal connues ou variantes, les systèmes en boucle fermée ne glissent pas parfaitement sur la surface de glissement, ils quittent celle-ci mais la commande discontinue l'y ramènent, il existe alors un phénomène de commutation autour de la surface de glissement (chattering) comme représenté sur la (figure.IV.5)

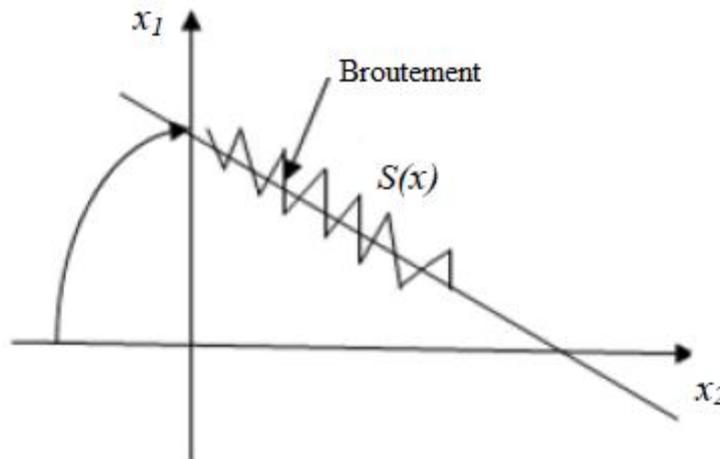


Figure IV. 5: Phénomène de chattering autour de la surface de glissement.

Le phénomène de broutement (chattering) constitue un inconvénient majeur non négligeable, car même s'il est possible de le filtrer à la sortie de processus, il est susceptible d'exciter les modes de hautes fréquences qui n'ont pas été pris en compte lors de la modélisation du système. Ceci peut dégrader les performances et même conduire au problème d'instabilité.

Les actionneurs, niveau des circuits de puissance électrique. Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées.

IV.5.1 Elimination du phénomène de chattering :

➤ Solution de couche limite :

Elle est aussi connue par le nom «boundary layer solution», elle a été proposée par Slotine 1984, elle consiste à effectuer une approximation continue des discontinuités présentes dans la loi de commande au voisinage de la surface de glissement.

Supposons que la commande discontinue qui provoque le phénomène de réticence s'écrit sous la forme :

$$u(t) = -K \text{sign}(s(t)) \quad (\text{IV-16})$$

La fonction $\text{sign}(s(t))$ est remplacée par une fonction plus lisse dans la couche limite de $s(t)=0$. Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction «sat» de saturation.

$$\text{sat}(s(t)) = \begin{cases} \frac{s(t)}{\varepsilon} & \text{si } \left| \frac{s(t)}{\varepsilon} \right| \leq 1 \\ \text{sign}(s(t)) & \text{si } \left| \frac{s(t)}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (\text{IV-17})$$

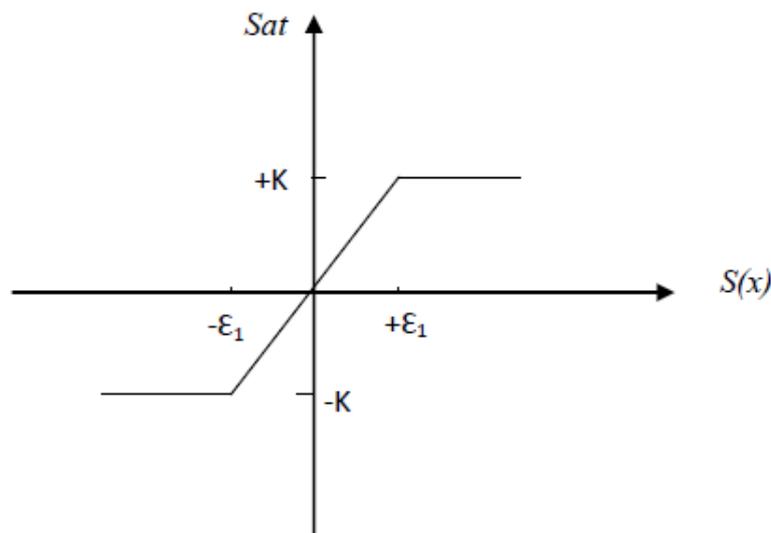


Figure IV. 6: Représentation de la fonction sat.

Le système ne converge plus vers la valeur désirée, mais vers un voisinage de cette dernière. Ainsi, la mise en place d'une commande continue dans une bande de la surface

nécessite un compromis entre la robustesse et les performances. D'autres fonctions d'adoucissement existent telles que les fonctions :

$$\frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{s}{\varepsilon}\right), \frac{s}{|s|+\varepsilon}, \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right), \dots \text{ etc} \quad (\text{IV-18})$$

➤ **Solution basée sur un observateur :**

La solution de la couche limite nécessite l'approximation continue du terme de discontinuité. Cependant, dans plusieurs applications les discontinuités de commande sont inhérentes au système.

D'autre part, ce terme de discontinuité de commande permet de réaliser une convergence asymptotique de l'équation décrivant la surface de glissement vers zéro, ce qui n'est pas garanti en effectuant cette approximation continue

En conséquence, lors de l'application d'une commande discontinue, le placement d'un observateur asymptotique par mode de glissement peut éliminer la réticence due à cette discontinuité de la loi de commande. L'idée de base consiste à générer les modes glissants idéaux dans une boucle auxiliaire d'observation, telle que cette boucle n'intègre aucune dynamique non modélisée. La boucle principale est poursuivie de la boucle d'observateur.

Sous les dynamiques de cet observateur, aucun problème de réticence n'apparaît et le système évolue comme si la commande équivalente continue est appliquée.

➤ **Commande par mode glissant d'ordre supérieur :**

Une autre solution plus efficace pour résoudre le problème de réticence est l'introduction de nouvelles dynamiques dans la commande. Cette technique est à la base du concept du mode glissant d'ordre supérieur où le problème de la discontinuité due à l'élément de commutation est déplacé sur les dérivées d'ordre supérieur ce qui permet de réduire la réticence tout en conservant les propriétés de robustesse et de la précision de la loi glissante d'ordre 1.

IV.6 Application de la commande à la MAS

IV.6.1 Choix des surfaces de glissement :

Le choix de la surface de glissement tient compte d'apparaître la grandeur de commande d'une manière explicite via la dérivée temporelle de cette surface. Dans notre cas, nous avons choisi les surfaces de glissement suivantes :

$$S_{\varphi_r} = \dot{\varphi}_r^{ref} - \dot{\varphi}_r \tag{IV-19}$$

$$S_{W_r} = \dot{W}_r^{ref} - \dot{W}_r \tag{IV-20}$$

IV.6.2 Conditions de convergence et d'existance

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0 \tag{IV-21}$$

$$\left(\dot{W}_r^{ref} - \dot{W}_r \right) \cdot \left(W_r^{ref} - W_r \right) < 0 \tag{IV-22}$$

$$V_w(x) = \frac{1}{2} (S^2(x)) = \frac{1}{2} (W_r^{ref} - W_r)^2 \tag{IV-23}$$

$$\left(\dot{\varphi}_r^{ref} - \dot{\varphi}_r \right) \cdot \left(\varphi_r^{ref} - \varphi_r \right) < 0 \tag{IV-24}$$

$$V_\varphi(x) = \frac{1}{2} (S^2(x)) = \frac{1}{2} (\varphi_r^{ref} - \varphi_r)^2 \tag{IV-25}$$

IV.6.3 Régulation de flux rotorique

La dérivée de la surface de glissement est donnée comme suite :

$$\dot{S}(\varphi_r) = \dot{\varphi}_r^{ref} - \dot{\varphi}_r \tag{IV-26}$$

Avec :

$$\dot{\varphi}_r = -\frac{\varphi_r}{T_r} + \frac{M}{T_r} I_{ds} \tag{IV-27}$$

$$\dot{S}(\varphi_r) = \dot{\varphi}_r^{ref} + \frac{1}{T_r} \varphi_r - \frac{M}{T_r} I_{ds} \tag{IV-28}$$

$$\dot{S}(\varphi_r) \text{sat}(S(\varphi_r)) \leq -\eta \tag{IV-29}$$

$$\dot{\varphi}_r^{ref} + \frac{1}{T_r} \varphi_r - \frac{M}{T_r} I_{ds} \leq -\eta \text{sat}(S(\varphi_r)) \tag{IV-30}$$

$$I_{ds} = \frac{T_r}{M} \dot{\varphi}_r^{réf} + \frac{1}{M} \varphi_r + K_1 \text{sat}(S(\varphi_r)) \quad (\text{IV-31})$$

IV.6.4 Régulation de la vitesse

La dérivée de la surface de glissement de la vitesse de rotation est donnée comme suivant :

$$S(\dot{w}_r) = \dot{w}_r^{réf} - \dot{w}_r \quad (\text{IV-32})$$

Avec :

$$S(\dot{w}_r) = \dot{w}_r^{réf} - \frac{1}{j} p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{sq} + C_r \quad (\text{IV-33})$$

$$S(\dot{w}_r) \text{sat}(S(\dot{w}_r)) \leq -\eta \quad (\text{IV-34})$$

$$\left(\dot{w}_r^{réf} - \frac{1}{j} p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{sq} + C_r \right) \leq -\eta \text{sat}(S(\dot{w}_r)) \quad (\text{IV-35})$$

$$I_{sq} = \frac{1}{\varphi_r} \cdot \frac{jL_r}{Mp} \left(\dot{w}_r^{réf} + C_r \right) + \frac{1}{\varphi_r} \cdot \frac{jL_r}{Mp} \eta \text{sat}(S(\dot{w}_r)) \quad (\text{IV-36})$$

IV.7 Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant

Il est reconnu que la robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle présente le point fort d'une commande par mode de glissant. Contrairement à une loi de commande classique, les performances dynamiques sont maintenues quelles que soient les variations des paramètres et quelle que soit l'amplitude des perturbations appliquées au système. De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, il permet de simplifier la complexité du système. Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

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

Parmi les solutions proposées à ces problèmes on peut citer la commande par mode glissant à bande limite qui consiste à remplacer la fonction de commutation dans la commande par une fonction de saturation (hystérésis, arc tangente,... etc.)[63]

IV.8 Résultats de la simulation du système de pompage contrôlé par le mode glissant

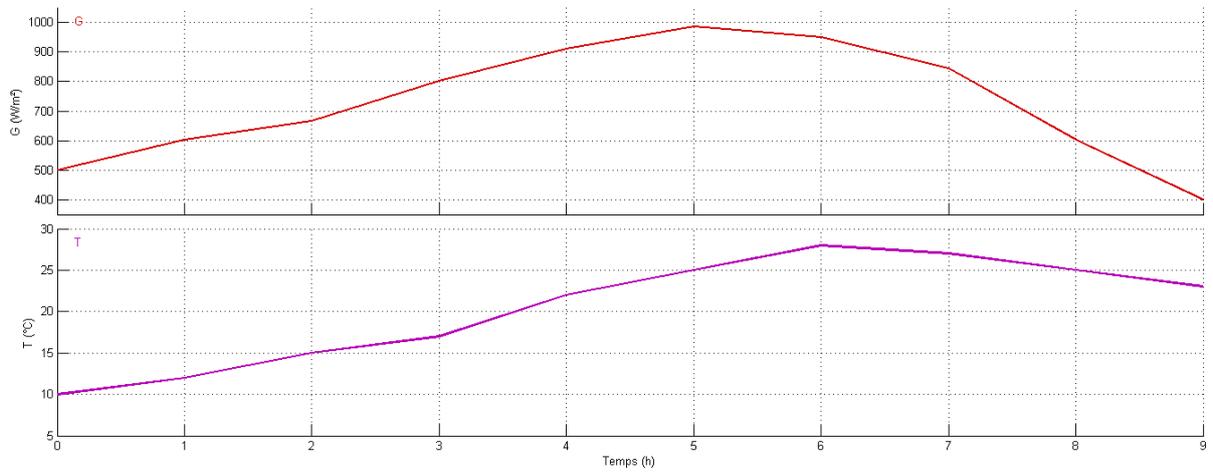


Figure IV. 7: variation de la température et de l'ensoleillement.

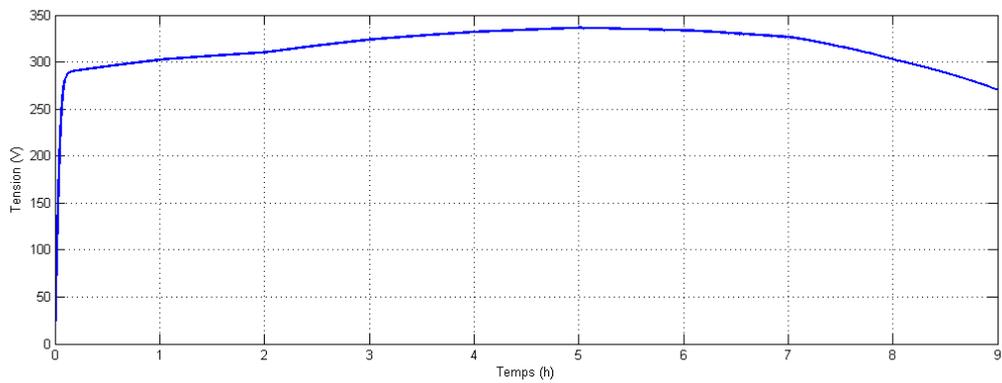


Figure IV. 8: Allure de la tension.

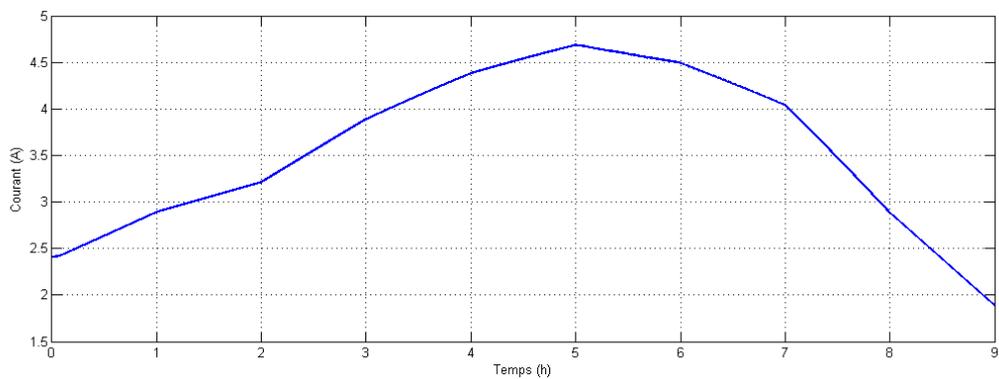


Figure IV. 9: Allure du courant.

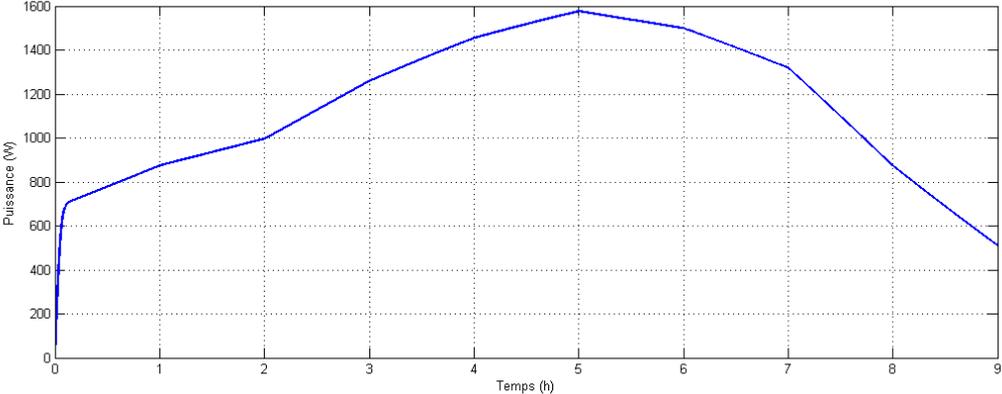


Figure IV. 10: Evolution de la puissance.

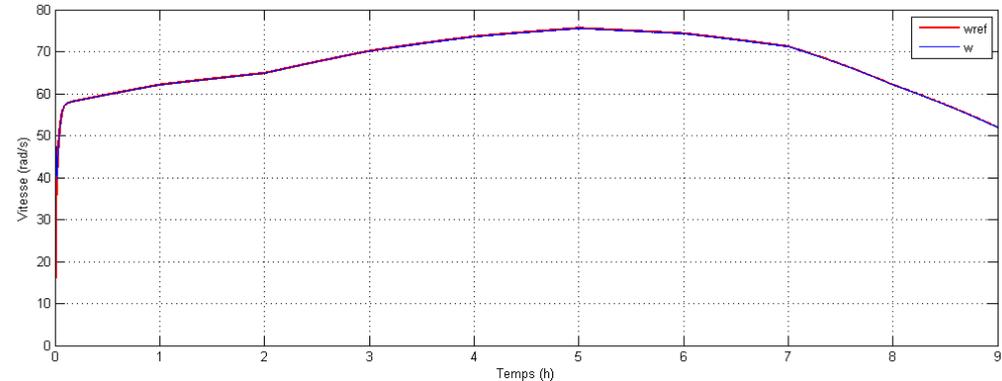


Figure IV. 11: Evolution de la vitesse.

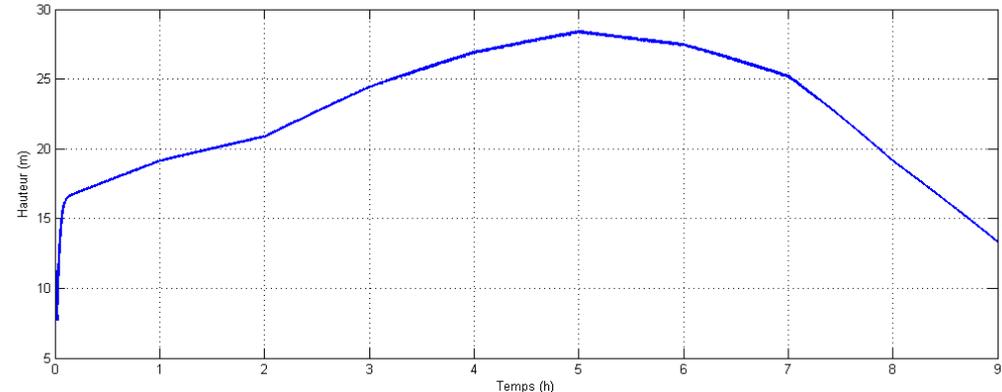


Figure IV. 12: Evolution de la hauteur.

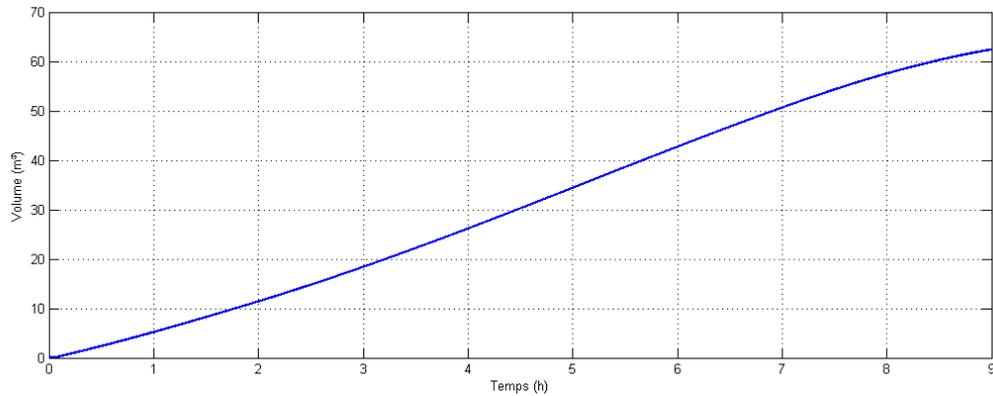


Figure IV. 13: Evolution du volume.

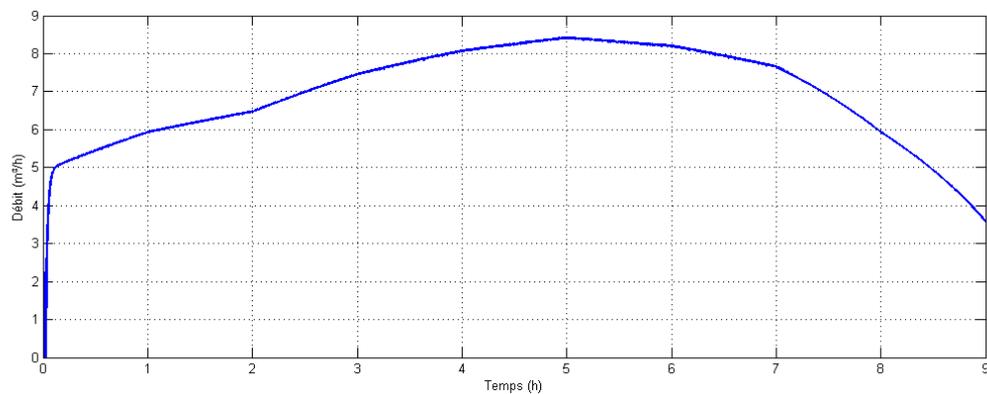


Figure IV. 14: Evolution du débit.

IV.8.1 Interprétation des résultats

- On remarque dans la figure(IV.9) que l'allure du courant évolue de la même manière que l'ensoleillement donc la même évolution pour la puissance.
- On remarque dans la figure (IV.13) que l'allure du volume augmente au fil du temps.
- On remarque dans la figure (IV.11) l'allure de la vitesse ω de la MAS suit parfaitement sa valeur de référence obtenue à partir de la puissance photovoltaïque.
- On remarque dans la figure(IV.14) Le débit délivré par la pompe suis la consigne évolution de la vitesse de rotation ω .

IV.8.2 Comparaison :

D'après les résultats de la simulation, on voit bien que la vitesse suit ses valeurs de référence surtout dans le cas de contrôle par mode glissant pas d'oscillation au niveau de la vitesse. On remarque que les réponses obtenues avec les deux types de réglage montrent clairement que le système commandé par mode glissant est plus robuste par rapport au réglage par commande vectorielle, on remarque aussi que le temps de réponse de la commande par mode glissant est plus rapide.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales de la commande par mode glissant. Après la présentation de la théorie de base de cette commande, nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande.

Ensuite nous avons appliqué cette commande à la machine asynchrone utilisée dans notre système de pompage photovoltaïque.

Enfin nous avons fait une comparaison entre cette commande et la commande vectorielle.

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

Conclusion générale

Notre travail c'est porté sur la commande d'un système de pompage photovoltaïque, le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme «MPPT» pour obtenir le point de puissance maximale, d'un hacheur survolteur qui assure la conversion « DC/DC » d'une manière élévatrice. Le courant issu de ce convertisseur va être transformé en courant alternatif à l'aide d'un onduleur triphasé qui assure la conversion « DC/AC » pour pouvoir alimenter le moteur asynchrone qui entraîne la pompe centrifuge à son tour. Pour cela nous avons appliqué deux commandes, la vectorielle (avec régulateur PI) et par mode glissant.

L'objectif de ce travail est d'étudier et contrôler un système de pompage photovoltaïque autonome, avec l'implémentation de la commande non linéaire par mode glissant.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré aux différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de pompage photovoltaïque et les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de tous les éléments de notre chaîne de pompage photovoltaïque, après on a illustré l'effet de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du GPV (puissance-tension et courant-tension).

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la commande MPPT en utilisant la méthode P&O avec laquelle notre générateur photovoltaïque sera optimisé. Ensuite on a fait l'étude dimensionnelle du système de pompage pour effectuer le bon choix des composants et pouvoir calculer le nombre de panneaux photovoltaïques dont on a besoin pour effectuer le pompage. Finalement nous avons présenté la commande vectorielle qui améliorera les performances de notre moteur asynchrone, responsable de l'entraînement de la pompe centrifuge. Enfin nous avons donné des résultats de simulations obtenus par le logiciel MATLAB/SIMULINK pour des conditions variables.

L'objectif du dernier chapitre de ce travail était de remplacer la commande vectorielle classique du système de pompage photovoltaïque par la commande par mode glissant, ou nous avons fait une comparaison entre les résultats des deux commandes.

Les résultats de la simulation ont confirmé l'avantage de la commande par mode glissant en termes de stabilité, rapidité et robustesse ainsi que sa contribution à l'amélioration des performances de la machine.

Références bibliographiques

- [1] **D. BOUKHERS** « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007
- [2] **R. CHENNI** « Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2007.
- [3] **M. Capderou**, «Atlas Solaire de l'Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux 2011 Synthèse bibliographique par Pr. A/Malek ROULA.
- [4] **A Mahjoubi, Ridha Fethimechlouch** «Dimensionnement D'une Installation Solaire De Pompage D'eau Pour L'irrigation Goutte à Goutte Au Climat De Médénine», Jerba (Tunisie) 15-16-17/12/2009 Actes Du 3ème Meeting International.
- [5] **Ben Djellouli Zakaria**« Contribution à la modélisation d'une cellule solaire», Thèse de Magistère, Université Bechar, le 28/06/2009.
- [6] **Thomas Mambrini** «Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies» THÈSE DE DOCTORAT UNIVERSITE PARIS-SUD , le 16/12/2014
- [7] **F.SALMA**, «Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecte au réseau électrique», Magister en Electrotechnique. Université de Sétif 2011.
- [8] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>, consulté le 13 mars 2023
- [9] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>, consulté le 13 mars 2023.
- [10] **A.C. Pastor**: « Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electroniques », Ecole Doctorale : GEET, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAASCNRS), Toulouse, 29 septembre 2006.
- [11] **A. Nouar**, «Etude et Modélisation des différent modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales», Mémoire de Magister, Université Setif 2010.
- [12] **M. OUSAID**, « *Optimisation d'un Générateur Photovoltaïques par Réseaux de Neurones Artificiels : Application au Pompage Photovoltaïques* », Mémoire de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [13] **C. Alonso**, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie», Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier –Toulouse III, 12 Décembre 2003.
- [14] **G.MedYacine, D.belkacem, D.akram**, « modélisation et commande d'un système PV connecte au réseau électrique utilisant DSTATCOM. », Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2020
- [15] **K. Ouabdelkader, H.Mersl**, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2015.

- [16] **Abbassen, L** « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [17] **R.A.Messenger and J.V** entre, photovoltaic Systems engineering, second edition, CRC Press LLC, 2004.
- [18] **Mohamed Lakhdar LOUAZENE**, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Thèse de Magister d'université El Hadj Lakhdar – Batna2008
- [19] **N.Debili**, « *Etude et optimisation en environnement MATLAB/SIMULINK d'un système de pompage Photovoltaïque* » ; Mémoire de magister, Université de Constantine, 2015.
- [20] **BOUALEM, DENDIB**, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.
- [21] **Pierre-Frédéric Ténier-Buchot**, Président du pS-Eau «le pompage solaire Options techniques et retours d'expériences Des repères pour l'action, » ,Article ,2015
- [22] **Jimmy Royer. Thomas Djiako .Eric Schiller.BocarSadaSy** « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ».Université d'Ottawa 1998.
- [23] <http://www.capenergie.fr/catalogue/site-isole/stockage-et-pompage-deau/au-fil-du-soleil.html> consulté le 15 mars 2023.
- [24] **T. AKASSEWA**« Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » Thèse de doctorat. Université de Nancy1 2010.
- [25] <http://www.capenergie.fr/catalogue/site-isole/stockage-et-pompage-deau/en-continu.html> consulté le 15 mars 2023.
- [26] **L.Lasen**« Electronique de puissance » DUNOD,PARIS,2011,2015.
- [27] **M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia** « Le Pompage Photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002.
- [28] **D.R. Chouiter** « Conception et réalisation d'une commande robuste de machine Asynchrone », Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [29] **M. Nabil, S. M. Allam, and E. M. Rashad**: « Performance Improvement of a Photovoltaic Pumping System Using a Synchronous Reluctance Motor». Electric Power Components and Systems, 41:447–464, 2013.
- [30] **Dahdouh, Adel**. COMMANDE EN VITESSE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU PAR BACKSTEPPING, 2013.

- [31] **HAYDER SALIM HAMEED**, « Brushless DC Motor Controller Design Using Matlab Applications », Department of Electrical Power and Machine Engineering, College of Engineering, University of DiyalaBaquba, Diyala, Iraq, ISCES article, 2018.
- [32] <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>_consulté le 20 avril 2023.
- [33] **J .Chenadec** " les machines synchrones- technologies et différents modes d'alimentations des machines synchrones"
- [34] **A . SAHLI, L. OURARI**,« Réglage et contrôle de la vitesse de la machine synchrone a aimantpermanent » Mémoire de Master 2. Université de Bejaïa, 2015.
- [35] [35] Cahier technique n° 207 SCHNEIDER ELECTRIC.
- [36] **B. Alimarina, Z. Aoua** : « Etude et conception d'une armoire de commande à démarreur électronique progressif –application à un groupe électropompe d'une station de pompage d'eau potable », Mémoire DEUA en Electrotechnique, UMMTO 2006.
- [37] **A. BELHOCINE et S.ZAIDI**,« Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master 2. Université de Bejaïa, 2012.
- [38]**James B. Rishel**, “Water Pumps and Pumping Systems”, McGraw-Hill, 2002.
- [39] Techniques de l'ingénieur, « Mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé », NB4,
- [40] **ZERIMECHE, Ines** «Étude et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque en mode alternatif» Thèse de Doctorat, Université de Frères Mentouri Constantine1, 2022
- [41] **C.BERNARD, C.SEBRAO-OLIVEIRA, B.LAVAL et C.VAUDOUER** «Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue» Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [42]**S. Belakehal** « Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010
- [43] **F. Boumaraf** « Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2009.
- [44] **J.P. CARON, J.P. HAUTIER** « modélisation et commande de la machine asynchrone » Edition technique France_1998.
- [45] **R. ACHOURI et M. HIDOUCHE** « Commande vectorielle de la machine asynchrone », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique Université El-Harrach, Alger 2007.
- [46] **R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne et T. Kerbache** « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque », Sciences et Technologie, Vol. N°26, page 49-54, décembre 2007.
- [47]: **G. Boukettaya, R. Andoulsi et A. Ouali** : « Commande vectorielle avec observateur de vitesse d'une pompe asynchrone couplée à un générateur photovoltaïque ». Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 75 – 85.

- [48] : **S.Bensmail**, « Optimisation Et Gestion D'un Système Hybride A Energies Renouvelables», Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2017.
- [49] : **SALAH MOHAMED AIT-CHEIKH** : « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique Décembre 2007.
- [50] **Oudiai, Fatih et Lagha-Menouer, Kahina et Hadj Arab, A. et Rachid, Zirmi.**«Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance», Article ,2019.
- [51] **A.T.Singo**«système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1,FRANCE, 2010
- [52] **Guisser, M'hammed** «Stratégies de Commande pour l'Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Autonomes et Connectés au Réseau», Rapport de synthèse pour l'habilitation universitaire, Université Hassan 1 er , 2015.
- [53] **C. Bernard, C. Sebrao – oliveira, B. Laval, C. Vaudouer** « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelables, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [54] **D. YAPTA** «Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone : simulation expérimentation » Rapport de projet 2ème année Master, université de Nancy 2010
- [55] **Mezian, S** " Commandes adaptative et prédictive de la machine asynchrone ", Thèse de doctorat ,Mentouri de Costantine 2009.
- [56] **LOTFI BAGHLI** <<Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques >> Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, 14 Janvier 1999.
- [57] : **A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Ghabi** "Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque". Revue des énergies renouvelables vol. 8, 2005.
- [58] **A. Louadah**, « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2009.
- [59] **I. DEGHBODJI** « Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d'ordre supérieur » Mémoire de magistère Université Constantine 1. 2013
- [60] **J.J.E. SLOTINE** et **W. LI**. " *Applied Non-linear Control* ", Prentice-Hall Englewood, New Jersey, 1991.
- [61] **A. Hussain**, «Contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants», thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, France, 2009.

Références bibliographiques

[62] : H.TAMRBED et T.AZAROBR« Réglage par mode glissant d'un machine asynchrone » Thèse d'ingénieur, Anaba, juin 2000.

[63] DJERIOUI Ali ; KHELIFI Faris "Commande et observation par mode glissant des convertisseurs multicellulaires séries " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA, 2009