

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE Amar Telidji de Laghouat
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
قسم الالكتروتقني
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROTENCHIQUE
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Réalisé par :

HACHEMI Fatima Zohra

THEME

***Commande Intelligente d'un Système de Pompage
PV à base d'un Moteur à Induction***

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mme KOUZI	Katia	Prof.	Présidente
Mme BOUCHIBA	Oum El Kheir	MCA	Examinatrice
Mme BENLARBI	Keltoum	MCB	Encadreuse
Mr. MOKRANI	Lakhdar	Prof.	Co-encadreur

Année Universitaire 2024/2025

Résumé, Abstract, ملخص

Résumé :

Ce travail explore une approche de commande intelligente pour optimiser les performances d'un système de pompage alimenté par un moteur à induction asynchrone (MAS) piloté par une technique à flux orienté.

L'un des défis majeurs réside dans la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) du générateur photovoltaïque, traditionnellement assurée par des algorithmes tels que la Conductance Incrémentale (IC). Bien qu'efficace, cette méthode présente des limitations, notamment dans la détermination manuelle de la vitesse de référence du moteur, souvent ajustée par essais et erreurs. Pour pallier ces contraintes, une stratégie avancée basée sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) est proposée.

L'étude compare d'abord les performances du système en couplage direct (sans étage DC-DC) et en mode MPPT classique, mettant en évidence les inconvénients d'une régulation empirique. Ensuite, une architecture intelligente est introduite, où un RNA génère automatiquement à la fois le rapport cyclique du hacheur et la vitesse de référence du MAS, garantissant un fonctionnement optimal sous différentes conditions d'irradiance. Les résultats de simulation confirment que cette approche améliore significativement l'efficacité énergétique et la stabilité du système.

Mots clés : Commande intelligente, Système de pompage photovoltaïque, Moteur à induction asynchrone (MAS), Commande à flux orienté (FOC), Point de puissance maximale (MPPT), Conductance Incrémentale (IC), Réseau de neurones artificiels (RNA), Optimisation énergétique

Abstract :

This work explores an intelligent control approach to optimize the performance of a photovoltaic (PV) pumping system driven by a field-oriented controlled induction motor (IM). One of the main challenges lies in achieving maximum power point tracking (MPPT) for the PV generator, traditionally ensured by algorithms such as Incremental Conductance (IC). While effective, this method has limitations, particularly in the manual determination of the motor's reference speed, often adjusted through trial and error. To overcome these constraints, an advanced strategy based on artificial neural networks (ANN) is proposed.

The study first compares the system's performance in direct coupling (without a DC-DC converter) and conventional MPPT mode, highlighting the drawbacks of empirical regulation. Then, an intelligent architecture is introduced, where an ANN automatically generates both the converter's duty cycle and the IM's reference speed, ensuring optimal operation under varying irradiance conditions. Simulation results confirm that this approach significantly improves energy efficiency and system stability.

Key words : Intelligent control, Photovoltaic pumping system, Induction motor (IM), Field-oriented control (FOC), Maximum power point tracking (MPPT), Incremental conductance (IC), Artificial neural network (ANN), Energy optimization

ملخص :

تهدف هذه الدراسة منهجية تحكم ذكي لتحسين أداء نظام ضخ يعمل بالطاقة الشمسية باستخدام محرك حثي متحكم فيه بتقنية التوجيه الشعاعي. يتمثل أحد التحديات الرئيسية في تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) لمولد الطاقة الشمسية، والذي تقليدياً يعتمد على خوارزميات مثل الناقلية المتزايدة (IC) رغم فعاليتها، فإن هذه الطريقة تعاني من قيود، خاصة في تحديد السرعة المرجعية للمحرك يدوياً عن طريق التجربة والخطأ. لمعالجة هذه القيود، تم اقتراح استراتيجية متقدمة تعتمد على الشبكات العصبونية الاصطناعية (ANA). تقارن الدراسة أولاً أداء النظام في حالة الربط المباشر (بدون محول DC-DC) وفي حالة MPPT التقليدي، مسلطة الضوء على عيوب التنظيم التجريبي. ثم تم تقديم طريقة ذكية، حيث تقوم الشبكة العصبونية بتوليد كل من دورة عمل المحول DC-DC والسرعة المرجعية للمحرك تلقائياً، مما يضمن التشغيل الأمثل تحت ظروف إشعاع متغيرة. تؤكد نتائج المحاكاة أن هذا النهج يحسن بشكل كبير كفاءة الطاقة واستقرار النظام.

كلمات مفتاحية : التحكم الذكي ، نظام الضخ بالطاقة الشمسية ، المحرك الحثي (MAS) ، التحكم بالتوجيه الميداني (FOC) ، تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) ، خوارزمية الموصلية المتزايدة (IC) ، الشبكات العصبونية الاصطناعية (RNA) ، تحسين كفاءة الطاقة .



Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma mère,

Mon amour, ma tendresse et tes prières ont été ma force dans chaque pas.

Tu es mon cœur.

À mon père,

Mon soutien silencieux et ton courage m'ont porté jusque-là.

Tu es mon pilier.

À vous deux,

Ce mémoire est un humble reflet de tout ce que vous avez semé en moi.

Merci pour tout. Je vous aime infiniment.

À mon frère et mes sœurs,

Pour leur présence réconfortante et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

À mes enseignants,

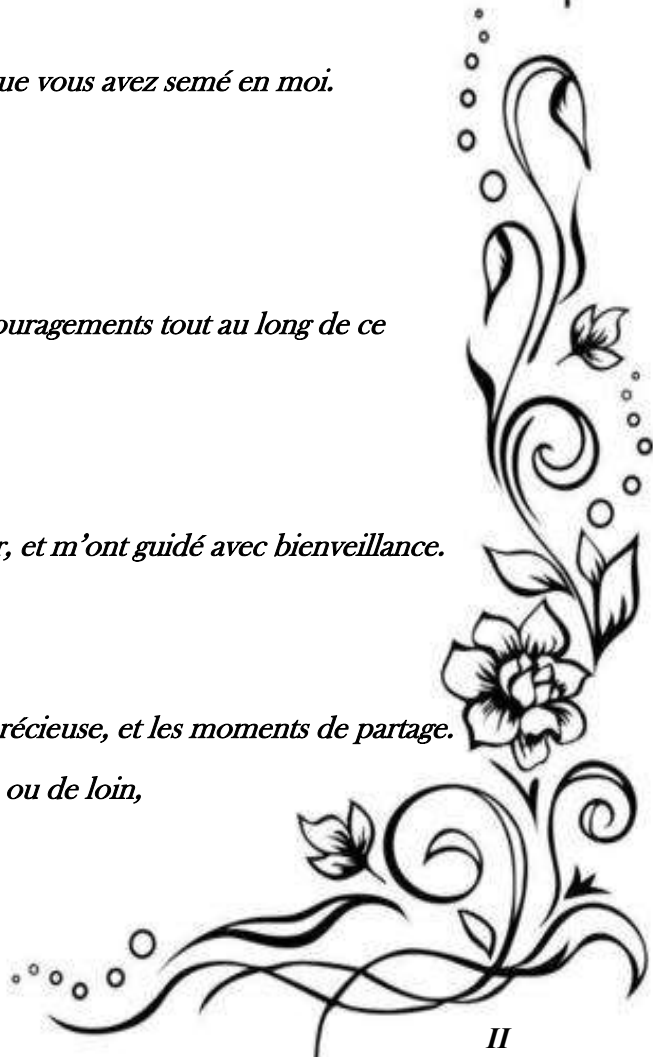
Qui ont su éveiller en moi la passion du savoir, et m'ont guidé avec bienveillance.

À mes amis et ma cousine,

Pour leurs mots d'encouragement, leur aide précieuse, et les moments de partage.

Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi, de près ou de loin,

Ce travail est le fruit de votre confiance.



Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame *Benlarbi Keltoum*, mon encadreuse, pour sa disponibilité, son accompagnement rigoureux, ses conseils précieux et son soutien constant tout au long de ce travail. Son expertise et son engagement ont été d'une grande importance pour la réussite de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur *Mokrani Lakhdar*, mon Co-encadreur, pour ses orientations pertinentes, et son implication tout au long de ce travail.

Leur encadrement attentif et bienveillant a grandement contribué à enrichir mes connaissances et à mener ce travail à bien.

Je remercie les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Liste des Abréviations et des Symboles

Abréviations

AC : Alternating Current (Courant alternatif).
AI : Intelligence Artificielle.
CIS/CIGS : Cellule silicium en couche mince.
DC : Direct Current (Courant continu).
GPV : Générateur Photovoltaïque.
IC : Conductance Incrémentale.
I-V : Intensité-Tension.
MAS : Machine Asynchrone.
MLI : Modulation de Largeur d'impulsion.
MPPT : Maximum Power Point Tracking.
RNN : Réseau de Neurones Récurrent.
PN : jonction entre de semi-conducteurs de type p et de type n.
PV : Photovoltaïque.
P&O : perturbation & observation
P- V : Puissance-Tension.

Symboles

V : Tension aux bornes de l'assemblage.
V_{co} : Tension aux bornes de la cellule.
N_p : nombre de cellule en parallèle.
N_s : nombre de cellule en série.
I_{ph} : Photo courant produit.
I_{sat} : Courant de saturation de la diode.
R_s, R_{sh} : La diode résistance série et la résistance parallèle, respectivement.
V_t = $\frac{KT}{q}$: Tension thermique a la température T.
q : Charge de l'électron($1.602 \times 10^{-19} C^\circ$).
K : Constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/k$).
k_i : Constante($1.2 cm^2 K^3$).
n : Facteur de non idéalité de la jonction.
T : Température effective de la cellule en degré Kelvin.

- E_g : Énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV).
- G : l'ensoleillement en W/m^2 .
- $P(W)$: Puissance fournie par la cellule PV.
- $V(V)$: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $I(A)$: Intensité débitée par la cellule PV.
- $P_{\max}(W)$: la puissance maximale fournie par la cellule PV.
- $V_{co}(V)$: La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $I_{cc}(A)$: L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV
- J : Moment d'inertie du rotor.
- Ω : vitesse angulaire mécanique du rotor.
- f_r : Coefficient de frottement visqueux.
- C_r : Couple résistant, ou de charge.
- ω : vitesse angulaire électrique du rotor.
- ω_s : vitesse des axes « d, q » dans le repère statorique.
- ω_r : vitesse des axes « d, q » dans le repère rotorique.
- N_{sq} : Vitesse spécifique du rotor.
- N_{ep} : Nombre d'étages de la pompe.
- H : Hauteur de charge effective en m.
- g : L'accélération de la pesanteur $=9.81 \text{ m/s}^2$.
- ω : Vitesse de l'arbre en rad/s.
- Q : Débit de la pompe en l/s.
- D_f : Diamètre du forage (ou du puits) en dm.
- K_{sp} : Constante.
- N : Vitesse de l'arbre du rotor en tr/min.
- C_r : Couple résistant.
- $T_r = \frac{L_r}{R_r}$: Constante de temps rotorique.
- $T_s = \frac{L_s}{R_s}$: Constante de temps statorique.
- $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$: Coefficient de dispersion.

Liste des Figures

Figure I .1 Schéma d’une Cellule Photovoltaïque..... 6

Figure I .2 Cellule en Silicium Poly Cristallin..... 7

Figure I .3 Cellule en Silicium Monocristallin..... 7

Figure I .4 Cellule Silicium amorphe en couche mince..... 8

Figure I .5 Cellule Silicium en Couche Mince CIS/CIGS..... 8

Figure I .6 Cellule Multi jonction..... 8

Figure I .7 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ 8

Figure I .8 Caractéristique de l’association des cellules..... 9

Figure I .9 Influence de l’éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ 10

Figure I .10 Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ et $I=f(V)$ 10

Figure II.1 Schéma général d’un système de pompage photovoltaïque 10

Figure II .2 Schéma équivalent électrique du module photovoltaïque à une diode..... 17

Figure II .3 Schéma électrique d’un hacheur Buck/Boost..... 17

Figure II .4 Schéma électrique d’un hacheur Buck/Boost K fermé 18

Figure II .5 Schéma électrique Buck/Boost pour K ouvert..... 21

Figure II .10 Organigramme du contrôleur IC..... 21

Figure II .11 Représentation de l’ensemble onduleur-MAS..... 21

Figure II.12 Représentation de la MAS dans le système triphasé.....

Figure III.1 Structure d’un système de pompage photovoltaïque entraîné directement par un MAS 23

à flux rotorique orienté 24

Figure III.2 Caractéristiques $I(V)$ du GPV et points de fonctionnement en couplage direct..... 25

Figure III.3 Caractéristiques $P(V)$ du GPV et points de fonctionnement en couplage..... 30

Figure III.4 Puissance en couplage direct..... 31

Figure III.5 Vitesse en couplage direct..... 31

Figure III.6 Schéma de simulation du système de pompage optimisé par MPPT en boucle fermée 32

de vitesse..... 32

Figure III.7 Variation du rapport cyclique en fonctionne de l’éclairement..... 32

Figure III.8 Caractéristiques $I(V)$ du GPV et points de fonctionnement en couplage direct et avec 32

MPPT... 33

Figure III.9 Caractéristiques $P(V)$ du GPV et points de fonctionnement en couplage direct et avec 34

MPPT..... 34

Figure III.10 Puissance en couplage direct et couplage avec MPPT..... 34

Figure III.11 Vitesse en couplage direct et couplage avec MPPT..... 34

	35
Figure III.12 Rapport cyclique de Buck-Boost à 1000 W/m ²	35
Figure III.13 Tension de <i>GPV</i> à 1000 W/m ²	35
Figure III.14 Courant de <i>GPV</i> à 1000 W/m ²	36
Figure III.15 Puissance de <i>GPV</i> à 1000 W/m ²	36
Figure III.13 Tension de <i>V_{dc}</i> à 1000 W/m ²	37
Figure III.17 Courant de phase statorique <i>i_a</i> et le courant de référence à 1000 W/m.....	37
Figure III.18 Vitesse de rotation à 1000 W/m ²	37
Figure III.19 Couple électromagnétique à 1000 W/m ²	38
Figure III.20 Variation de l'éclairement de 800 W/m ² à 1000 W/m ²	38
Figure III.21 Variation du rapport cyclique Alpha.....	38
Figure III.22 Variation de tension du GPV	39
Figure III.23 Variation de tension <i>V_{dc}</i>	39
Figure III.24 Variation de la vitesse de rotation de la <i>MAS</i> -pompe.....	41
Figure III.25 Variation de couple électromagnétique.....	
Figure IV.1 Neurone biologique.....	42
Figure IV.2 Neurone Artificiel.....	45
Figure III.3 Schéma de système de pompage <i>PV</i> optimisé par <i>RNA</i>	46
Figure IV.4 Concordance des points de rapport cyclique obtenus par approche classique et <i>RNA</i>	46
Figure IV.5 Concordance des points de Vitesse obtenue par approche en BO et <i>RNA</i>	47
Figure IV.6 Variation de l'éclairement en fonctionne de temps.....	47
Figure IV.7 Variation de rapport cyclique.....	47
Figure IV.8 Variation de la vitesse de référence et la vitesse de rotation du MAS	48
Figure IV.9 Variation de couple électromagnétique.....	48
Figure IV.10 Variation de la tension de <i>GPV</i>	48
Figure IV.11 Variation de la tension <i>V_{dc}</i>	49
Figure IV.12 Variation de l'éclairement en fonction de temps.....	49
Figure IV.13 Variation de rapport cyclique en fonction de temps.....	49
Figure IV.14 Variation de vitesse de rotation et la vitesse de référence	49

Table des matières

Résumé I

Dédicace I I

Remerciement..... I II

SymbolesIV

Liste des figures VI

Table des matièresVIII

Introduction Générale 1

Chapitre I Généralités sur les Systèmes de Pompage Photovoltaïque

I.1 Introduction.....5

I.2 Energie solaire.....5

 I.2.1 Energie solaire photovoltaïque5

 I.2.2 Effet photovoltaïque5

 I .2.3 Historique l’effet photovoltaïque.....6

I .3 Cellule photovoltaïque6

 I .3.1 Principe de fonctionnement6

 I .3.2 Types du cellules photovoltaïques7

 I .3.3 Caractéristiques des cellules photovoltaïques8

 I .3.4 Association un groupement des cellules9

I .4 Influence de l’ensoleillement et de la température 10

 I .4.1 Influence de l’éclairement 10

 I .5.2 Influence de la température 10

I .5 Principe de base de la conversion photovoltaïque 11

I .6 Définition de système de pompage photovoltaïque 11

 I .6.1 Principe de Fonctionnement du système de pompage..... 11

 I .6.2 Déférents types du système de pompage photovoltaïque..... 12

 I .6.3 Composants essentiels du système de pompage photovoltaïque..... 12

I .7 Application de l’énergie photovoltaïque..... 12

I .8 Avantages et Inconvénients..... 13

I .9 Etat de L’Art du Système de Pompage Photovoltaïque 14

I .10 Conclusion 15

Chapitre II Modélisation d’un Système de Pompage Photovoltaïque

II .1 Introduction 17

II.2 DESCRIPTION D’UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE 17

II .3 Modélisation Complete du module Photovoltaïque 18

 II .3.1 Caractéristiques D’un Module Photovoltaïque 19

 II.3.2 Générateur photovoltaïque..... 20

II .4 Convertisseur DC-DC 20

 II .4.1 Modélisation du hacheur 21

 II .4.2 Commande du hacheur par MPPT 22

II .5 Convertisseur *DC-AC*..... 23

 II .5.1 Modélisation de l’onduleur triphasé de tension a deux niveaux 24

 II .5.2 Commande de l’onduleur par *MLI* à hystérésis 25

II .6 Modélisation du Moteur à Asynchrone 25

 II.6.1 Modèle du *MAS*..... 25

 II.6.2. Commande vectorielle du *MAS* par orientation de flux rotorique 27

II.7 Modélisation de la pompe centrifuge 27

 II.7.1 Définition et constitution d’une pompe centrifuge 27

 II.7.2 Caractéristiques d’une pompe centrifuge..... 27

II.8 Conclusion 29

Chapitre III Optimisation par MPPT du Système de Pompage Photovoltaïque

III.1 Introduction 30

III.2 Couplage direct du système de pompage photovoltaïque 30

III.3 Couplage Optimisé par MPPT du système de pompage photovoltaïque 32

 III.3.1 Cas d’un démarrage du système pour un éclairement de 1000W/m² 35

 III.3.2 Cas d’une variation de l’éclairement de 800W/m² à 1000 W/m² 37

III.4 Conclusion 39

Chapitre IV Optimisation du Système de Pompage Photovoltaïque
Par Réseaux de Neurones

IV.1 Introduction 41

IV.2 Historique des réseaux de neurones [45]41

IV.3 Neurone biologique.....41

IV.4 Neurone artificiel42

IV.5 Réseaux de neurones42

IV.5.1 Apprentissage des réseaux de neurones42

IV.5.2 Apprentissage supervisé42

IV.5.3 Apprentissage non supervisé43

IV.5.4 Sur-apprentissage43

IV.6 Algorithme d'apprentissage de réseaux de neurones43

IV.6.1 Algorithme de rétro-propagation43

IV.6.2 Algorithme fast back-propagation43

IV.6.3 Algorithme random optimisation méthode (rom)43

IV.7 Optimisation du système de pompage photovoltaïque en utilisant réseaux de neurones44

IV.7.1 Conception d'un réseau de neurones assurant un fonctionnement *MPPT*44

IV.7.2 Simulation du système de pompage *PV* optimisé par réseaux de neurones45

IV.7.3 Test de performance et de robustesse du *RNA*47

IV.8 Conclusion50

Conclusion Générale.....51

Annexe53

Bibliographie.....54

Introduction Générale

Les systèmes de pompage photovoltaïque constituent une solution technologique prometteuse pour répondre aux besoins en irrigation et en approvisionnement en eau, particulièrement dans les zones rurales isolées dépourvues de raccordement au réseau électrique conventionnel. Ces installations exploitent l'énergie solaire, une ressource abondante et renouvelable, pour alimenter des groupes motopompes tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles et en minimisant l'impact environnemental. Toutefois, leur efficacité énergétique reste tributaire de leur capacité à extraire le maximum de puissance disponible des panneaux photovoltaïques malgré les variations météorologiques, ainsi que de l'optimisation de la commande du moteur asynchrone généralement utilisé dans ce type d'application [1].

Les systèmes de pompage photovoltaïques conventionnels recourent habituellement à des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale comme la méthode de Conductance Incrémentale pour optimiser le transfert d'énergie. Bien qu'efficaces, ces approches présentent des limitations notables. La régulation de vitesse du moteur est souvent déterminée de manière empirique par essais successifs, ce qui peut engendrer des sous-performances. De plus, ces systèmes manquent généralement d'adaptabilité face aux variations climatiques rapides et subissent des pertes énergétiques liées à l'utilisation de convertisseurs intermédiaires dans certaines architectures. Pour pallier ces insuffisances, ce travail de recherche propose une approche innovante s'appuyant sur des techniques d'intelligence artificielle, plus précisément sur les réseaux de neurones artificiels, afin d'automatiser et d'optimiser simultanément le suivi du point de puissance maximale et la commande du moteur asynchrone [2],[5].

Ce mémoire s'articule autour de quatre axes principaux. Le premier chapitre introduit les concepts fondamentaux relatifs à l'énergie solaire et aux systèmes photovoltaïques, en abordant notamment les principes de conversion énergétique, les caractéristiques des générateurs photovoltaïques et leur comportement sous différentes conditions d'ensoleillement, ainsi que les différentes configurations des systèmes de pompage photovoltaïque avec leurs avantages et limites respectifs.

Le deuxième chapitre présente la modélisation mathématique complète du système, incluant le générateur photovoltaïque et ses équations caractéristiques, les convertisseurs de puissance nécessaires à l'adaptation énergétique, le moteur asynchrone et sa commande à flux orienté, ainsi que l'intégration de l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale dans la chaîne de commande.

Le troisième chapitre analyse les performances du système dans deux configurations distinctes. La première configuration examine le couplage direct sans étage de conversion intermédiaire, où le générateur photovoltaïque alimente directement l'onduleur et le moteur. La seconde configuration étudie le fonctionnement en mode de poursuite du point de puissance maximale classique avec réglage manuel de la vitesse de référence du moteur. Les résultats de simulation obtenus dans ces deux cas de figure permettent d'évaluer l'efficacité énergétique et de mettre en lumière les limites de ces approches conventionnelles.

Le quatrième et dernier chapitre propose une solution avancée utilisant un réseau de neurones artificiels capable de générer automatiquement le rapport cyclique du hacheur pour maintenir le point de puissance maximale tout en déterminant la vitesse de référence optimale du moteur en fonction des conditions d'ensoleillement. Les simulations comparatives démontrent une amélioration significative des performances par rapport aux méthodes traditionnelles, avec une meilleure adaptation aux variations climatiques.

Chapitre I

Généralités sur les Systèmes de pompage photovoltaïque

I.1 INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité en utilisant des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque [1].

Ce chapitre présentera les généralités sur le système de pompage photovoltaïque, en abordant leurs principes fondamentaux, leurs composants essentiels et leurs caractéristiques opérationnelles.

I.2 ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui provient du rayonnement du soleil. Elle est captée et transformée en électricité ou en chaleur grâce à des technologies comme les panneaux photovoltaïques ou les capteurs solaires thermiques. Cette énergie, propre et inépuisable, joue un rôle clé dans la transition énergétique et dans notre écosystème.

L'énergie solaire peut être transformée en chaleur ou en électricité. Deux méthodes principales permettent cette conversion : l'énergie solaire thermique, qui capte la chaleur du soleil et l'énergie solaire photovoltaïque, qui convertit directement la lumière en électricité [2]-[4].

I.2.1 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une technologie qui transforme la lumière du soleil en électricité. Cela se fait grâce à des cellules photovoltaïques, souvent en silicium qui composent les panneaux solaires. Lorsque la lumière du soleil frappe ces cellules, elle génère un courant électrique continu. Ce courant peut ensuite être converti en courant alternatif pour alimenter des réseaux électriques. Cette méthode est propre, renouvelable et largement utilisée pour produire de l'électricité à petite ou grande échelle [4].

I.2.2 Effet photovoltaïque

La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un « trou », qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Ce phénomène crée un champ électrique permanent dans la cellule.

Grâce à cet effet diode et lorsque la paire électron-trou a été créée, les charges négatives vont être séparées des charges positives. Il se crée donc une différence de potentiel entre les couches *N* et *P* de la cellule. Un courant circule si une résistance est placée entre ces contacts [3].

I .2.3 Historique l'effet photovoltaïque

L'effet *PV* a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond-Becquerel. Son inspiration se justifier par le fait que certains matériaux peuvent produire de petites quantités d'électricités s'ils étaient exposés au soleil.

En 1905, Albert Einstein se pencha sur ce travail en publiant le résultat de ses recherches sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil. Ce document explore l'effet PV qui est une technologie sur laquelle, est fondée les modules (ou panneaux) solaires.

En 1913, William Coblentz a posé le 1er brevet pour une cellule solaire, mais, il ne pourra jamais la faire fonctionner. C'est ainsi qu'en 1916, Robert Millikan a été le 1er produire de l'électricité avec une cellule solaire. Les 1ers modules solaires ont été construits en 1954 par laboratoires Bell [2].

I .3 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule photovoltaïque est dispositif électronique est un dispositif qui converti l'éclairage du soleil en énergie électrique. Elle est également appelée cellule solaire ou panneaux solaire.

Les cellules photovoltaïques sont composées de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium, qui sont déposées sur une plaque de verre ou de plastique. Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule, elle excite les électrons dans les matériaux semi-conducteurs, ce qui crée un courant électrique [4],[5].

I .3.1 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque convertit une énergie radiative en énergie électrique. Actuellement, la majorité des cellules photovoltaïques industrielles est basé sur la structure de la jonction *PN* (jonction entre de semi-conducteurs de type p et de type n). Il est constitué de différents processus :

- Absorption de photons par le semi-conducteur.
- Séparation des électrons et des trous dans le semi-conducteur par agitation thermique.
- Circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre par le champ électrique à l'interface [4].

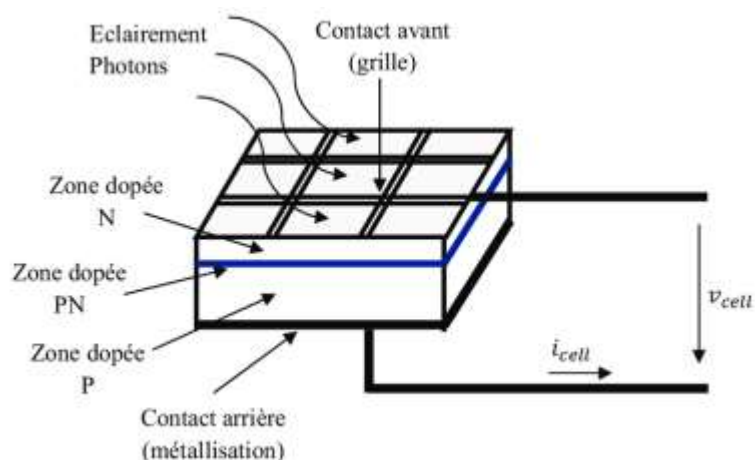


Figure I .1 Schéma d'une Cellule Photovoltaïque

I .3.2 Types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le

type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [5].

I .3.2.1 Cellule en silicium polycristallin

Le silicium multi cristallin (poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabrications est beaucoup plus simple, les couts de production sont donc plus faibles [6].

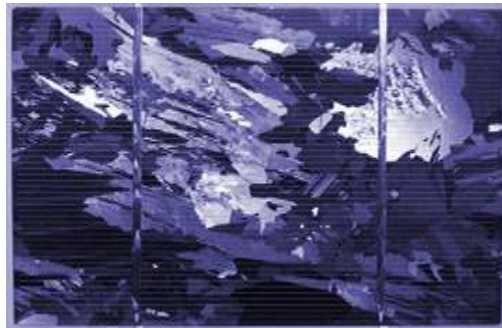


Figure I .2 Cellule en Silicium Poly Cristallin

I .3.2.2 Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son cout élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin [6].



Figure I .3 Cellule en Silicium Monocristallin

I .3.2.3 Cellule silicium en couche mince

La cellule au silicium amorphe est constituée d'un silicium ayant une structure atomique désordonnée, c'est-à-dire non-cristallin. Ce matériau absorbe beaucoup plus la lumière qu'un silicium cristallin. Il fait partie de la technologie "couche mince" qui consistent à déposer sous vide sur un substrat (verre, métal, plastique, ...) une fine couche uniforme composée d'un, et plus souvent de plusieurs matériaux réduits en poudre. Les cellules sont de couleur gris foncé [4],[7].



Figure I.4 Cellule Silicium amorphe en couche mince

a) Cellule silicium en couche mince CIS/CIGS

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince [4],[8].

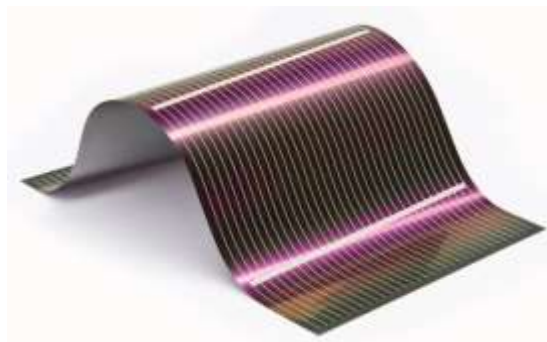


Figure I.5 Cellule Silicium en Couche Mince CIS/CIGS

b) Cellule multi jonction

Les cellules multi-jonction sont composées des différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion [8],[9].



Figure I.6 Cellule Multi jonction

I.3.3 Caractéristiques des cellules photovoltaïques

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension ($I-V$) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

Sa tension à vide V_{co} : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court-circuit I_{cc} : Cette valeur représenterait le courant générée par une cellule éclairée raccordée à elle- même.

Son point de puissance maximal MPP (en anglais : maximal power point) obtenue pour une tension et un courant optimaux V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp})[8]-[10].

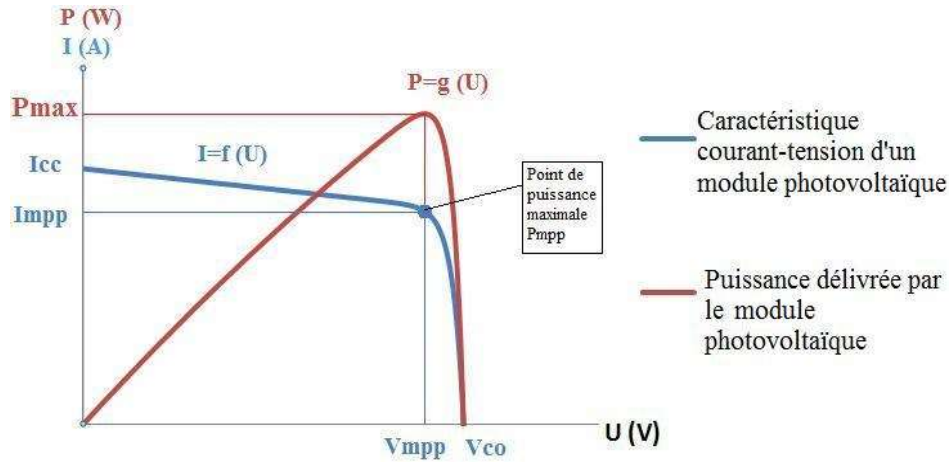


Figure I.7 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$.

I.3.4 Association un groupement des cellules

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module relativement puissant. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

a) Association de la cellule en série

Si on assemble en série N cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

$$V = NV_{co} \quad (I.1)$$

Dans le cas d'une association en série, les cellules délivrent le même courant mais elles peuvent fonctionner avec des tensions différentes.

b) Association de la cellule en parallèle

Une association parallèle de N_p cellules permet d'accroître le courant de sortie du générateur photovoltaïque. Les cellules sont soumises donc à la même tension et la caractéristique résultant est obtenue par addition des courants.

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.2)$$

$$V_{cop} = V_{co} \quad (I.3)$$

c) Association de la cellule en série-parallèle

Selon l’association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale son données par les relations suivants :

$$I_{spcc} = N_p \cdot I_{cc} \tag{I .4}$$

$$I_{spco} = N_s \cdot V_{co} \tag{I .5}$$

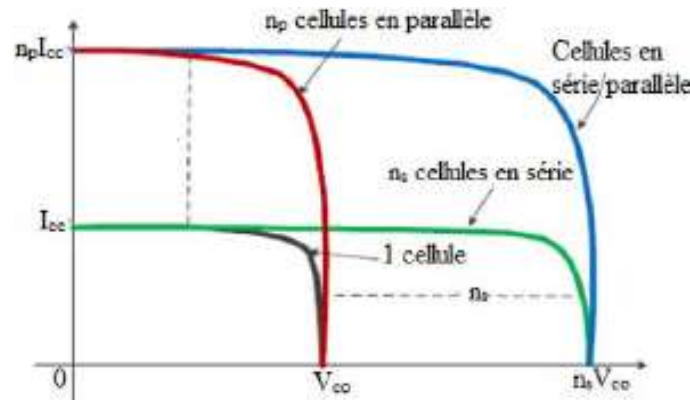


Figure I .8 Caractéristique de l’association des cellules

I .4 INFLUENCE DE L’ENSOLEILLEMENT ET DE LA TEMPERATURE

I .4.1 Influence de l’éclairement

L’augmentation de l’éclairement est directement proportionnelle à l’intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L’augmentation d’ensoleillement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ suivant l’axe des courant pour une température $t=25^{\circ}\text{C}$.

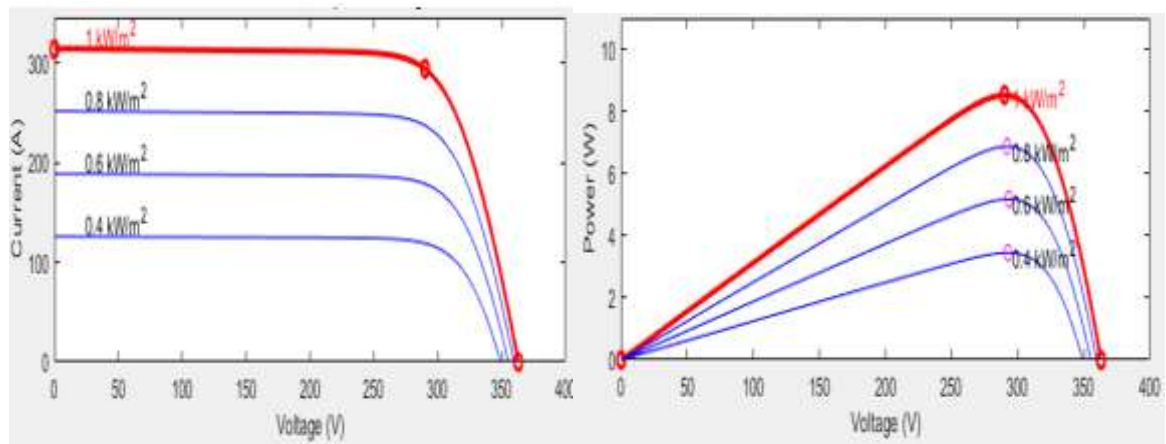


Figure I .9 Influence de l’éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

I .5.2 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure (I.10) montre que l’augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu’une diminution de la puissance maximale.

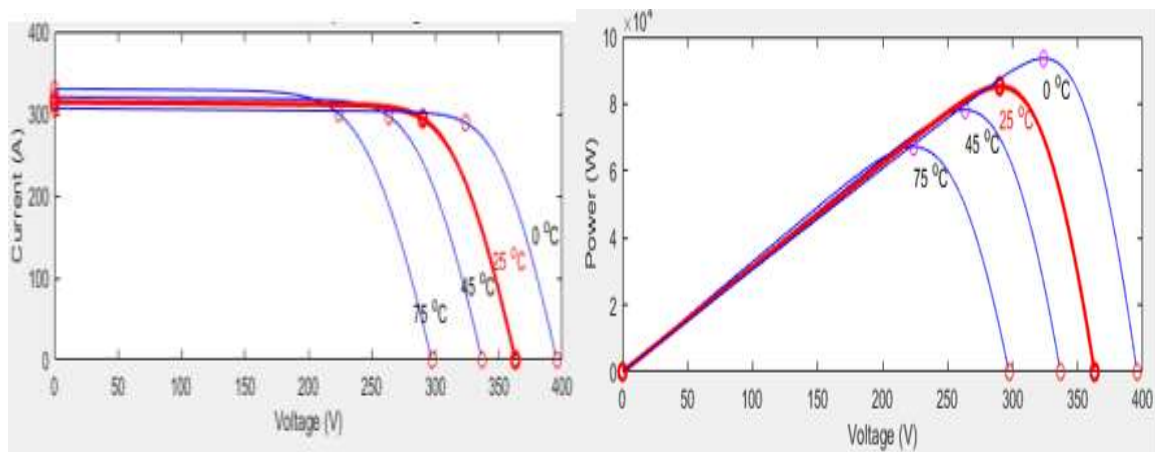


Figure I.10 Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ et $I=f(V)$

I.5 PRINCIPE DE BASE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie lumineuse des rayons du soleil est convertie en électricité par l'effet photoélectrique utilisé dans les cellules solaires, et ce par la production et le transfert de charges électriques positives et négatives sous l'influence de la lumière. C'est ainsi que se déroule le processus de conversion photoélectrique [15].

- Absorption de la lumière et création de pair électron/trou.
- Séparation de pair électron/trou sous l'effet d'un champ induit.
- Transport de charges vers les électrodes.
- Collection des charges.

I.6 DEFINITION DE SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Un système de pompage photovoltaïque est une installation qui utilise l'énergie solaire pour pomper et distribuer de l'eau, combinant des panneaux photovoltaïques, une pompe spécialement conçue, et éventuellement un système de stockage hydraulique. Cette technologie permet d'alimenter en eau des zones isolées sans nécessiter de connexion au réseau électrique [14].

I.6.1 Principe de Fonctionnement du système de pompage

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïque consistent à générer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques pour alimenter une pompe électrique. L'énergie électrique produite par les modules photovoltaïques est récupérée pour alimenter un moteur à courant continu ou convertie en courant alternatif grâce à un onduleur. Selon l'installation, l'énergie peut être stockée l'énergie produite, car l'installation d'un réservoir à la sortie de la pompe permet de stocker l'eau, obtenant ainsi une réserve utilisable même sans soleil. Cette technologie peut être considérée comme une alternative prometteuse aux systèmes de pompage habituels au moyen de groupes électrogènes, car elle s'inscrit dans une démarche économique et environnementale [16].

I.6.2 Différents types du système de pompage photovoltaïque

Il existe principalement deux types de systèmes de pompage photovoltaïque, chacun adapté à des besoins spécifiques :

I.6.2.1 Système de pompage avec stockage de batterie

Le système de pompage avec stockage batterie est construit comme un système solaire classique, certaines pompes, notamment les pompes de surfaces de mise sous pression de l'eau sanitaire doivent obligatoirement fonctionner sur batterie [14],[17].

I .6.2.2 Système de pompage fonctionnent au fil du soleil

Le système de pompage " au fil du soleil " représente une approche optimisée qui combine simplicité, fiabilité et rentabilité. Cette méthode utilise un principe ingénieux de stockage hydraulique plutôt que d'énergie électrique, permettant une distribution autonome et efficace de l'eau [18].

a) Système autonome

C'est un système complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur ses îles, en montage ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. La présence des batteries de stockage d'énergie est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité [23].

b) Système couplé aux réseaux basse tension

Un système *PV* raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique, c'est-à-dire le générateur *PV* injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique [21].

I .6.3 Composants essentiels du système de pompage photovoltaïque

Les performances d'un système de pompage solaire de l'eau dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température, situation géographiques,...), et des caractéristiques des équipements (rendement, durée de vie,...). Le système de pompage photovoltaïque est constitué de :

- Des panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu.
- Une unité de commande et de contrôle de puissance, constitué d'un régulateur de charge, d'une batterie et des convertisseurs (hacheur et onduleur).
- Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.
- Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité [19].

I .7 APPLICATION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie photovoltaïque une énergie renouvelable et écologique, le photovoltaïque est très prometteur car elle est disponible en tout point du globe. De plus, comparé à d'autres formes de production d'énergie (éolien, nucléaire, solaire thermique, biomasse ...), les applications du *PV* en tant que source d'énergie autonome sont aujourd'hui fortement diversifiées tels que :

L'énergie photovoltaïque a des applications très variées, allant des usages domestiques aux installations industrielles. Voici un aperçu des principales :

1. Production d'électricité pour le réseau

Les panneaux solaires peuvent injecter de l'électricité directement dans le réseau national, contribuant à la transition énergétique.

2. Électrification rurale

Dans les zones isolées, les systèmes photovoltaïques autonomes permettent d'alimenter des maisons, des écoles ou des centres de santé sans dépendre du réseau.

3. Éclairage public et signalisation

Lampadaires solaires, feux de signalisation, panneaux routiers lumineux : autant d'exemples d'utilisation efficace de l'énergie solaire.

4. Télécommunications

Les antennes relais, répéteurs radio ou stations météo utilisent souvent des panneaux solaires pour rester opérationnels en continu.

5. Agriculture et élevage

Pompage d'eau, irrigation, ventilation de serres ou alimentation d'équipements dans les fermes sont autant d'applications agricoles courantes.

6. Applications innovantes

On voit émerger des technologies comme les panneaux solaires flexibles, les tuiles photovoltaïques ou même la peinture solaire, qui ouvrent la voie à des intégrations plus esthétiques et pratiques.

I .8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

➤ **Avantages**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [24]-[29].

➤ **Inconvénients**

- La fabrication du module photovoltaïque relevé de la haute technologie et requiert des investissements d'un cout élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre 10-15% (soit entre 10 et 15 MW/Km²) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [24],[29].

I.9 ETAT DE L'ART DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Le contrôle d'un système de pompage *PV* implique, d'une part, son fonctionnement aux points de puissance maximale du *GPV* pour optimiser son efficacité, et d'autre part, l'optimisation du rendement du moteur entraînant la pompe.

De nombreux articles ont été publiés sur l'étude des méthodes pour augmenter la puissance du *GPV*. Dans ce qui, nous exposons les algorithmes *MPPT* présents dans la littérature. La littérature suggère également diverses méthodes qui cherchent à éviter le processus de modélisation minutieuse et fastidieuse basé sur les circuits de l'ensemble de l'installation. Ces approches se concentrent sur des aspects opérationnels spécifiques qui sont particulièrement intéressants, tels que le modèle est simplifié en utilisant les caractéristiques *I-V* ou *P-V*.

Le travail réalisé dans [18] met l'accent sur l'élaboration de nouvelles techniques de commande adaptative visant à optimiser la performance des panneaux solaires, en se basant sur des algorithmes avant-gardistes de recherche du point de puissance maximale (*MPPT*). Cette version de *P&O* développée permet d'extraire le courant *PV*, de fournir une commutation pertinente pour le convertisseur élévateur et d'assurer le suivi de point de puissance maximale même en cas de changement brusque de l'ensoleillement [27]. Les études exposées soulignent l'importance de perfectionner l'efficacité énergétique par le biais de l'amélioration des stratégies de commande vectorielle et l'élaboration de nouvelles structures de gestion d'énergie. Les validations expérimentales et simulées montrent une supériorité par rapport aux techniques traditionnelles, offrant ainsi des perspectives encourageantes pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques [20] est la plus utilisé, car cette technique peut contrôler l'énergie produite par le générateur photovoltaïque indépendamment de contrôler de motopompe.

Dans [28],[29] les systèmes de pompage solaire avancés intègrent deux méthodes clés de gestion : d'une part, les techniques d'intelligence artificielle qui assurent une optimisation adaptative du système selon les conditions climatiques et la demande en eau, et d'autre part, la gestion *PI* floue qui procure une plus grande robustesse face aux fluctuations de l'environnement et aux incertitudes inhérentes au système. Ces deux méthodes se conjuguent de manière efficace : les algorithmes d'intelligence artificielle optimisent l'ensemble du système en anticipant les exigences et en ajustant les réglages opérationnels, tandis que la commande *PI* floue offre une gestion spécifique du processus

de pompage en direct, ce qui est particulièrement bénéfique pour naviguer entre divers états opérationnels.

Alors que [29] montre l'efficacité des techniques d'intelligence artificielle comparativement aux méthodes classiques, en optimisant un système de pompage de l'eau entraîné par des moteurs à courant alternatif *AC* et continu *DC*.

Les systèmes initiaux étaient conçus avec des configurations élémentaires, reliant directement les panneaux photovoltaïques à la pompe [27]. Toutefois, cette forme de structure présente des contraintes concernant l'efficacité énergétique. Les architectures contemporaines incorporent des convertisseurs *DC-DC* (tels que les boost) et des convertisseurs *DC-AC* pour fournir de l'énergie à des moteurs électriques (qu'ils soient asynchrones ou à aimants permanents), ce qui facilite le suivi du point de puissance maximale (*MPPT*) et la commande vectorielle. En parallèle, des modèles mathématiques précis du générateur photovoltaïque et du moteur-pompe sont développés pour permettre la simulation, l'optimisation et la commande en temps réel. Parmi les approches de commande, les plus courantes sont :

- La commande par logique floue ou *MPPT* de type *P&O* ou *INC* pour l'extraction de la puissance maximale.
- La commande vectorielle (*FOC*) ou Direct Torque Control (*DTC*) pour le moteur.
- Des approches plus récentes incluent les techniques intelligentes comme les algorithmes génétiques, le contrôle prédictif, ou les réseaux de neurones.

Et [30], se base sur le calcul de la vitesse de référence pour un fonctionnement optimal du *GPV* ce qui assure la puissance optimale de sortie vers le moteur à induction.

I .10 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté les différents composants d'un système photovoltaïque. Aussi on a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule *PV* et le fonctionnement de cellule *PV*. Ensuite on a fait un rappel les Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.

Dans le prochain chapitre, nous allons modéliser un système photovoltaïque et les convertisseurs *DC-DC* (hacheurs) et leurs commande *MPPT* pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque soit maximale.

Chapitre II

Modélisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque

II.1 INTRODUCTION

Un système de pompage photovoltaïque est une association constituée d'un générateur photovoltaïque (*GPV*), d'un ou de deux convertisseurs statiques (onduleur et/ou hacheur), d'un moteur électrique, et d'une pompe centrifuge généralement utilisée. Afin de mener à bien l'étude du système photovoltaïque, une modélisation de chacun de ses éléments qui le constitue est exigée.

Dans ce chapitre, il sera exposé les équations et les modèles mathématiques qui seront utilisés pour modéliser le système de pompage photovoltaïque complet. Aussi un aperçu sur la théorie de la conversion photovoltaïque et le modèle du *GPV* seront présentés en premier lieu. Ensuite, le modèle électrique de la *MAS* sera présenté, dans un repère à deux axes. Pour pouvoir assimiler le comportement à celui du *MCC*, la commande à flux orienté sera adoptée et exposée. En dernier lieu, une partie concernant le principe de fonctionnement et le modèle des pompes centrifuges sera notamment présentée [29]-[34].

II.2 DESCRIPTION D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Aujourd'hui, l'industrie mondiale du photovoltaïque qui ne cesse de croître constamment, repose essentiellement sur les besoins des régions éloignées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Dans un grand nombre d'applications, le photovoltaïque est tout simplement la solution la plus rentable [29],[38]. Parmi ces applications, on peut citer les systèmes isolés alimentant des résidences éloignées, les sites éloignés de télécommunication des services publics et les systèmes de pompage de l'eau.

Au-delà des régions éloignées pour lesquelles le pompage à motricité humaine représente une solution d'exhaure satisfaisante, malgré l'effort que représente le levage d'eau, il est nécessaire de faire appel à une source d'énergie électrique. Le pompage photovoltaïque, qui permet d'obtenir des débits nettement plus importants, apparaît comme une solution raisonnable de point de vue technique et économique.

Le schéma général d'un système de pompage photovoltaïque peut être représenté par la figure (I.1).

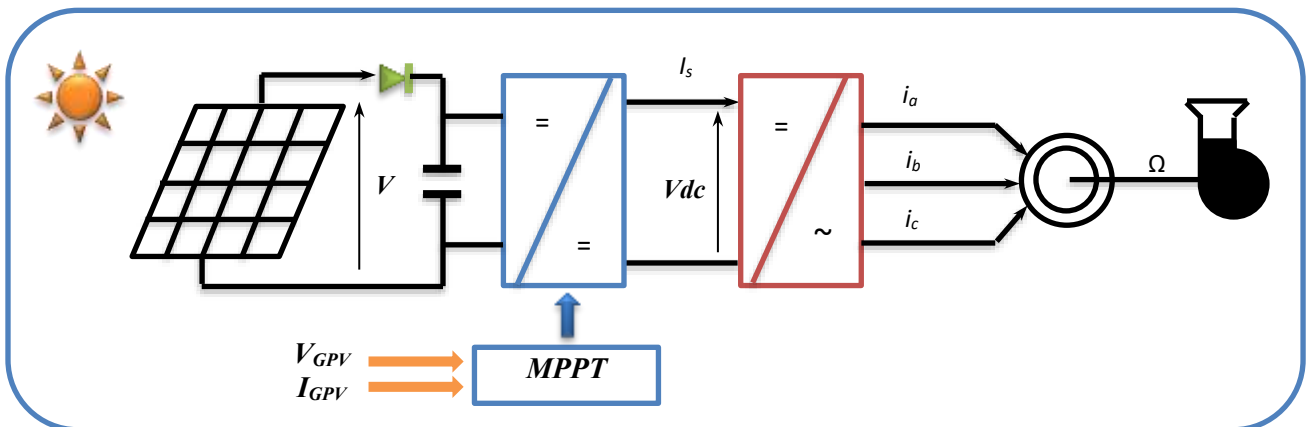


Figure. II.1 Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque [29]

Il est constitué principalement par :

- Un générateur photovoltaïque composé de modules solaires photovoltaïques, eux-mêmes constitués de cellules solaires. Le courant électrique produit, dont l'intensité varie selon l'éclairement solaire, est constant sous une faible tension.

- Un convertisseur statique d'énergie composé d'un ou deux convertisseurs de l'électronique de puissance (onduleur et/ou hacheur) permettant la transformation du courant continu en courant continu ou alternatif, nécessaire pour améliorer le rendement et la fiabilité du système photovoltaïque en adaptant la charge au *GPV*. Il permet une variation de la vitesse de la pompe en fonction de l'éclairement, et une poursuite du point à puissance maximale du *GPV*, ce qui permet d'optimiser la quantité d'eau pompée.
- Une motopompe qui comprend deux parties :
 - Un moteur électrique, immergé ou hors d'eau, à courant alternatif ou continu.
 - Une pompe hydraulique en général centrifuge et parfois volumétrique.

II.3 MODELISATION COMPLETE DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

La figure (II.2) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Ils correspondent à un générateur de courant monté en I_{ph} parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma [20].

Ces résistances ont une certaine influence sur les caractéristiques $I=f(V)$ de la cellule :

- La résistance montée en série (R_s) représente la résistance de contacte et de connexion.
- La résistance shunt (R_{sh}) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction *PN*.

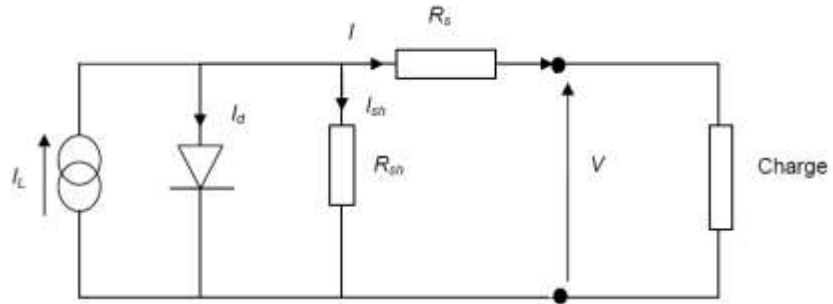


Figure II.2 Schéma équivalent électrique du module photovoltaïque à une diode

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{II.1})$$

L'expression résultante a une caractéristique courant tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{n V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

Les expressions de (I_{ph}) et de (I_{sat}) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = \left[(I_{sc} + (k_i * (T) - 298)) \right] * \frac{G}{1000} \quad (\text{II.3})$$

$$I_{sat} = \left(I_{sc} * \exp \left[\frac{V_{co}}{n V_t} \right] - 1 \right) * \left(\frac{T}{298} \right)^3 * \exp \left[\frac{q * E_g * \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{n * K} \right] \quad (\text{II.4})$$

II.3.1 CARACTERISTIQUES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les caractéristiques peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

II.3.1.1 Courant de Court-Circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du module PV est nul. Dans le cas idéal (R_{sh} infinie et R_s nulle), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.2), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc}R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc}R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme: $I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc}R_s)}{nKT} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit et alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.6})$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant générer par la cellule pratiquement ($I_{cc} = I_{ph}$).

II.3.1.2 Tension de Circuit-Ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le module photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'un module photovoltaïque) [20].

$$I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right] \frac{V}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Dans ce cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_t \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (\text{II.8})$$

II.3.1.3 Puissance de la Cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique $I(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = V \cdot I \quad (\text{II.9})$$

II.3.1.4 Puissance Maximale d'une Cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit-ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max} = V_{co} I_{cc} \quad (\text{II.10})$$

II.3.1.5 Rendement Energétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt}, V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par [20] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{inc}} \quad (\text{II.11})$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.3.1.6 Facteur de Forme

On appelle facteur de forme FF , dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fille facteur), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{max}, V_{max}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est définie par [20] :

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

II.3.2 Générateur photovoltaïque

La cellule solaire individuelle, unité de base d'un module photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [4]. Pour produire plus de puissance, les modules sont assemblés pour former un générateur relativement puissant. Les connections en série de plusieurs modules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La combinaison des deux connections permet l'adaptation du générateur photovoltaïque à la charge à alimenter pour un fonctionnement nominal.

Les paramètres du générateur photovoltaïque (avec indice G) vérifiant l'équation (II.5) sont liés à ceux d'un seul module solaire par [16],[23]:

$$\begin{aligned} I_{CCG} &= N_P I_{CC} \\ I_{0G} &= N_P I_0 \\ V_{thG} &= N_S V_{th} \\ R_{SG} &= \frac{N_S}{N_P} R_S \\ R_{PG} &= \frac{N_S}{N_P} R_P \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

Le choix de N_S et N_P sera fait selon la puissance demandée par l'ensemble actionneur-pompe et suivant les conditions atmosphériques du site en question.

II.4 CONVERTISSEUR DC-DC

Un convertisseur ou hacheur $DC-DC$ est un dispositif électronique de puissance placé entre le générateur et le récepteur, tous deux alimentés en courant continu, il permet d'ajuster la tension appliquée au récepteur ou le courant circulant dans le récepteur avec un rendement élevée et une grande flexibilité [35].

II.4.1 Modélisation du hacheur

La modélisation d'un hacheur (ou convertisseur *DC-DC*) consiste à représenter son comportement électrique et dynamique à l'aide d'équations ou de schémas, afin de prévoir son fonctionnement dans différents contextes. Un hacheur convertit une tension continue en une autre tension continue, généralement plus basse (buck), plus haute (boost), ou réversible (buck-boost). Il "hache" la tension d'entrée à l'aide d'un interrupteur (transistor de puissance), créant une tension moyenne contrôlable.

II.4.1.1 Hacheur Buck-Bosst

Le hacheur Buck-Boost est un convertisseur indirect *DC-DC* à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie de type tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cette structure de convertisseur permet de produire une tension de sortie négative à partir de tension d'entrée positive [36].

Le schéma de principe est présenté dans la figure II.3 [31]. Tandis que, l'interrupteur K est fermé pendant la durée $[0, T]$, le courant dans l'inductance croît linéairement, l'énergie est stockée. La tension est égale à V_i comme le montre la figure II.4.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_1(t) - i_L(t) \quad (\text{II.14})$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_L(t) \quad (\text{II.15})$$

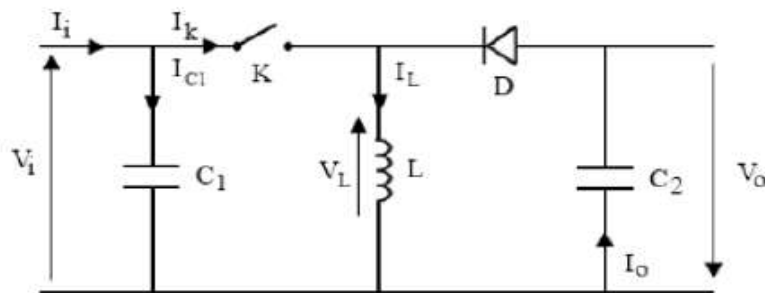


Figure II.3 Schéma électrique d'un hacheur Buck/Boost.

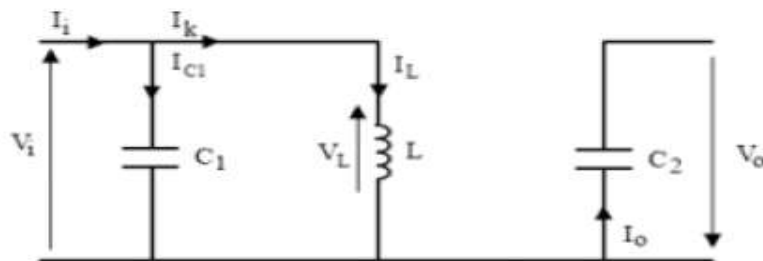


Figure II.4 Schéma électrique d'un hacheur Buck/Boost pour K fermé.

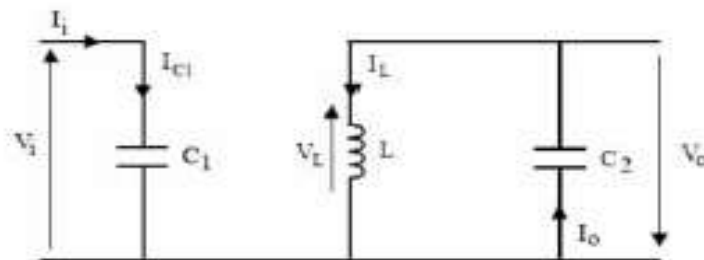


Figure II.5 Schéma électrique d'un hacheur Buck/Boost pour K ouvert.

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_L(t) \quad (\text{II.16})$$

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_o(t) - i_L(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

La relation qui assemble les tensions d'entrée/sortie est donnée comme suit :

$$V_o = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \quad (\text{II.18})$$

A partir de l'équation ci-dessus on déduire que :

Si le rapport cyclique $\alpha \geq 0.5$, le hacheur Buck-Boost fonction comme un hacheur boost.

Si le rapport cyclique $\alpha \leq 0.5$, le hacheur Buck-Boost fonction comme un hacheur buck.

II.4.2 Commande du hacheur par *MPPT* [21],[38]

La commande du système *MPPT* « Maximum Power Point Tracking » consiste en l'ajustement de convertisseur (dans notre cas un convertisseur *DC-DC*) à récupérer le maximum d'énergie produite par le phot-générateur, c'est-à-dire minimiser voire éliminer les pertes d'énergie. Le modèle de la caractéristique courant-tension est non-linéaire, avec des contraintes de températures et l'ensoleillement qui varient d'un manière aléatoire ce qui nous confronte à un problème d'optimisation non linéaire. Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

- La méthode d'ajustement de courbe.
- La méthode de circuit-ouvert de générateur
- La méthode de court-circuit
- La méthode perturbation & observation (P&O).
- La méthode d'incrément de conducteur.
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones).
- La méthode « look-up table ».

Pour notre travail on a choisi la méthode à incrémentation de conductance (*IC*).

II.4.3 Commande Incrémentation de la Conductance (*IC*)

Pour répondre aux inconvénients de la méthode P&O, une autre méthode *MPPT* dite à incrémentation de conductance (*IC*) a été développée en 1995. Cette dernière est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de la puissance du panneau est nulle au *PPM*, positive à gauche et négative à droite.

Cela se traduit par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ Au } PPM.$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ À gauche du } PPM.$$

$\frac{dP}{dV} < 0$ À droite du PPM.

L’organigramme de la méthode IC est illustré par la figure II .6 ci-après.

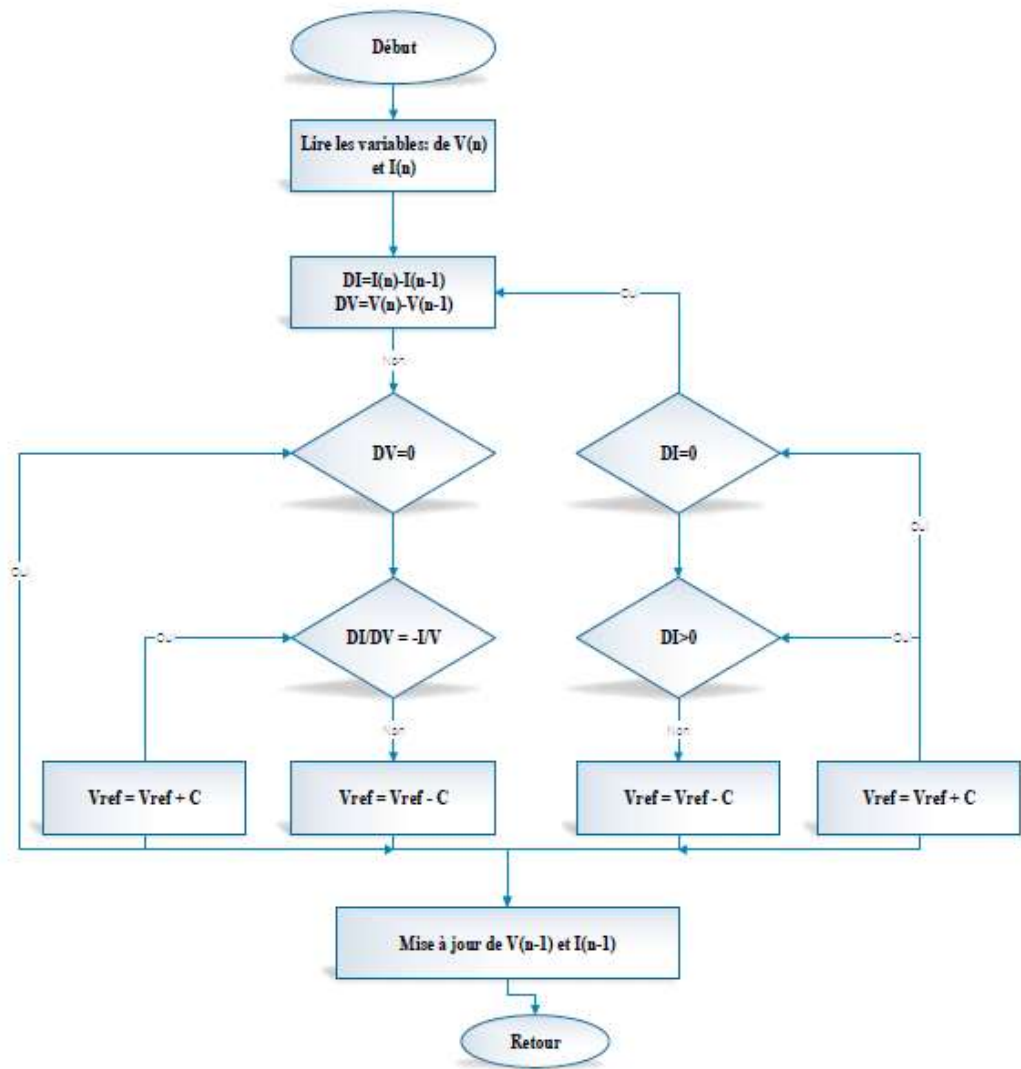


Figure II.6 Organigramme du contrôleur IC

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ sur l’incrément de la conductance dG pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Si dG est supérieur à l’opposé de la conductance $-G$, on diminue le rapport cyclique. Par contre, si dG est inférieur à $-G$, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu’à atteindre le PPM [12],[38].

II.5 CONVERTISSEUR DC-AC

L’onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion courant-alternatif. Si on dispose à l’entrée d’une tension continue, grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative.

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du l’onduleur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu’il s’agit d’une commande par Modulation de Largeur d’Impulsions (Pulse Width Modulation).

On distingue plusieurs types d’onduleur :

Selon la source :

- Onduleur de tension.

- Onduleur de courant. [42],[43],[44].

II.5.1 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension a deux niveaux

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (II .7), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposé d'être constituée de deux générateur de f.é.m.

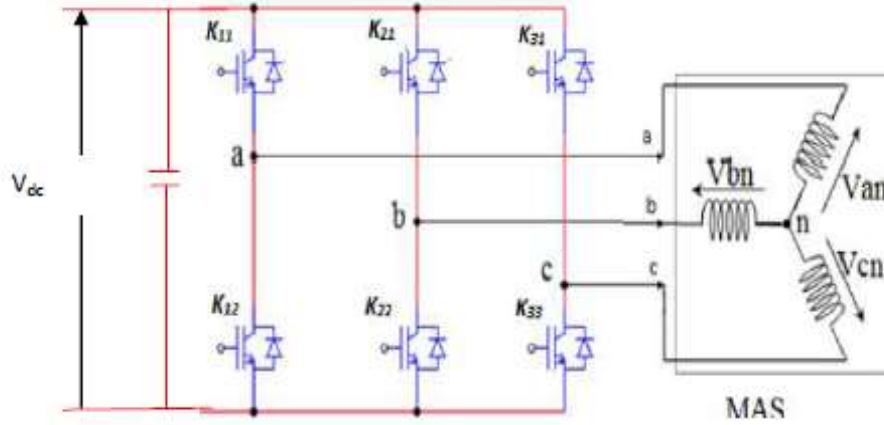


Figure II.7 Représentation de l'ensemble onduleur-MAS

L'onduleur a été modélisé à partir des grandeurs logiques si. On appelle T_i et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux) ; on a :

- Si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert.
- Si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = E(S_a - S_b) \quad (\text{II.19})$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = E(S_b - S_c) \quad (\text{II.20})$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = E(S_c - S_a) \quad (\text{II.21})$$

Les tensions V_{an} , V_{bn} et V_{cn} forment un système de tension triphasé équilibrée alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.26})$$

On a :

$$V_{an} = \frac{1}{3}E(2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II.22})$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3}E(2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II.23})$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3}E(2S_c - S_a - S_b) \quad (\text{II.24})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

II.5.2 Commande de l'onduleur par MLI à hystérésis

Le principe de cette commande consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence I_{ref} et le courant produit par l'onduleur I_a , I_b et I_c . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs.

- Malgré toutes les avantages de cette commande qu'on a cité avant mais présente certains inconvénients à savoir :
- La fréquence de commutation dépend en grande partie des paramètres de la machine et la tension de bus continu.
- La somme des trois courants n'est pas forcément nulle, ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépend de la bande d'hystérésis [22].

II.6 MODELISATION DU MOTEUR A ASYNCHRONE

Le moteur asynchrone est le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants en général, ce qui conduit à une structure simple, robuste, et facile à construire [27]-[29].

II.6.1 Modèle du MAS

La machine asynchrone triphasée et bipolaire correspond à la structure de principe représentée par la figure (II.8).

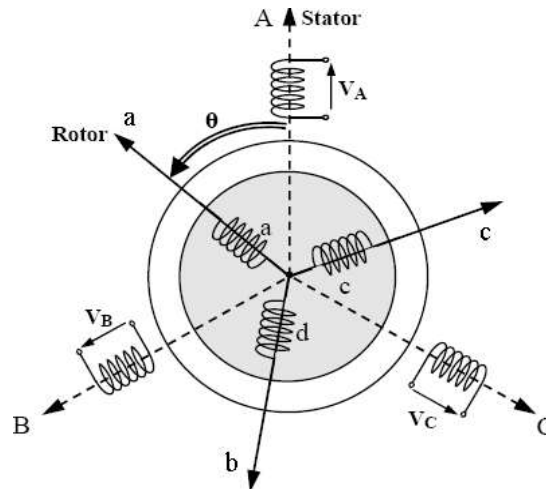


Figure II.8 Représentation de la MAS dans le système triphasé.

D'après la figure (II.8), on peut écrire les équations suivantes [27]-[29] :

- Equation des tensions au stator :

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\psi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.26})$$

- Equation des flux au stator :

$$[\psi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M][i_{ABC}] \quad (\text{II.27})$$

- Equation des tensions au rotor :

$$[V_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\psi_{ABC}]}{dt} \quad (\text{II.28})$$

- Equation des flux au rotor :

$$[\psi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [M]^T [i_{abc}] \quad (\text{II.29})$$

Les équations de la *MAS* dans le système biphasé (d,q) lié au champ tournant, sont obtenues en utilisant la transformée de Park définie par les équations suivantes :

$$[i_{sdqo}] = [A][i_{abc}] \quad (\text{II.30})$$

$$[V_{sdqo}] = [A][V_{abc}] \quad (\text{II.31})$$

$$[\psi_{sdqo}] = [A][\psi_{abc}] \quad (\text{II.32})$$

avec:

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Donc les équations de la *MAS* s'écrivent comme suit [29] :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \\ V_{rd} &= 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \psi_{rq} \\ V_{rq} &= 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \psi_{rd} \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

Il existe plusieurs façons pour choisir les variables d'état de la *MAS* dans le repère de Park. En général, le choix est fixé par l'utilisateur suivant ses besoins dans l'étude et la conception de sa commande. Dans ce qui suit, on choisira **les courants statoriques, les flux rotoriques et la vitesse mécanique** comme variables d'état $x=[i_{sd}, i_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}]$. Dans ce cas, le modèle du moteur asynchrone mis sous forme d'état est donné par [29] :

$$\begin{aligned} \frac{di_{sd}}{dt} &= \left(-\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{\sigma - 1}{\sigma T_r}\right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{1 - \sigma}{\sigma T_r M} \psi_{rd} + \frac{1 - \sigma}{M \sigma} \omega \psi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} &= -\omega_s i_{sd} + \left(-\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{\sigma - 1}{\sigma T_r}\right) i_{sq} - \frac{1 - \sigma}{M \sigma} \omega \psi_{rd} + \frac{1 - \sigma}{\sigma T_r M} \psi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} &= \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \psi_{rd} + (\omega_s - \omega) \psi_{rq} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} &= \frac{M}{T_r} i_{sq} - (\omega_s - \omega) \psi_{rd} - \frac{1}{T_r} \psi_{rq} \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J} (C_e - C_r - f_r \Omega) \end{aligned} \quad (\text{II.35})$$

avec:

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II.36})$$

II.6.2. Commande vectorielle du *MAS* par orientation de flux rotorique

La commande par orientation de flux consiste à placer le repère (d,q) tel que l'axe d coïncide avec le flux rotorique à orienter [27]-[31]. Ce qui revient à imposer la composante $\psi_{rq}=0$ et $\psi_{rd}=\psi_r$ et disposer d'une commande du couple type orthogonale telle que le cas de la *MCC*.

L'expression du couple électromagnétique peut être écrite sous la forme :

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\psi_r i_{sq}) \quad (\text{II.37})$$

L'équation (I.35) donne le nouveau modèle du module du flux rotorique :

$$T_r \frac{d\psi_r}{dt} + \psi_r = M i_{sd} \quad (\text{II.38})$$

Les équations (II.37) et (II.38) montrent qu'on peut agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par l'intermédiaire des composantes i_{sd} et i_{sq} du courant statorique, respectivement.

II.7 MODELISATION DE LA POMPE CENTRIFUGE

Dans le domaine de pompage de l'eau, les pompes les plus fréquemment utilisées sont les pompes centrifuge.

II.7.1 Définition et constitution d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge se compose de :

- Un distributeur, sorte de tubulure profilée, qui sert à conduire l'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe.
- Une roue constituée par un moyeu porté par un arbre et muni d'aubes tournant à l'intérieur de deux coquilles formant le corps de la pompe.

La théorie de fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmentée, cette augmentation provient [31]-[33] : d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique. Cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenu dans une pièce placée à l'intérieur de la roue appelée limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent.

II.7.2 Caractéristiques d'une pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge est caractérisé par une surface ayant pour équation:

$$F(H, Q, \omega) = 0 \quad (\text{II.39})$$

Ce système de représentation à trois dimensions est assez compliqué, et on préfère adopter un système à deux dimensions. On considère l'une des trois variables H , Q ou ω comme paramètre. En général, c'est la vitesse ω qui est supposée constante.

II.7.2.1 Caractéristique hauteur – débit H(Q)

La hauteur H créée par la pompe en fonction du débit Q se déduit de la caractéristique théorique HTH en lui retranchant les pertes de charge. Ces pertes ΔH se produisent par frottement contre les parois des canaux d'aspiration et de refoulement [23],[29]:

$$H = H_{Th} - \Delta H \quad (\text{II.40})$$

avec:

$$H_{th} = \frac{(\omega r_2)^2}{g} - \frac{Q\omega}{2\pi b_2 g} \cot g\beta_2 \quad (\text{II.41})$$

$$\Delta H = C_3 Q^2 \quad (\text{II.42})$$

C_3 : C'est la constante des pertes de charge.

La modification de la caractéristique $H(Q)$ pour d'autres vitesses d'entraînement s'effectue par l'utilisation des lois de similitude ci-après [23]-[33]:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{Q_n} &= \frac{\omega}{\omega_n} \\ \frac{H}{H_n} &= \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{II.43})$$

On obtient des courbes ayant comme paramètre la vitesse ω , et identifiées par l'expression suivante [9],[31]:

$$H = C_1 \omega^2 - C_2 \omega Q - C_3 Q^2 \quad (\text{II.44})$$

Les coefficients C_1 , C_2 et C_3 étant des fonctions des caractéristiques de la pompe (forme et dimensions des aubes et du diffuseur).

II.7.2.2 Caractéristique couple – vitesse $C_p(\omega)$

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant, évoluant telle que la forme quadratique de la vitesse d'entraînement ω , il est exprimé par :

$$C_p = A_p \omega^2 \quad (\text{II.45})$$

D'après les caractéristiques nominales de la pompe on peut écrire :

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

II.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation de la chaîne de pompage Photovoltaïque (Générateur photovoltaïque), convertisseurs statiques (Hacheur, L'onduleur), ainsi que le groupe moteur-pompe qui se compose d'une pompe centrifuge et un moteur asynchrone. Les équations et les modèles mathématiques regroupés dans ce chapitre seront utilisés pour mener une étude de simulation qui à pour but l'optimisation de l'association des sous-systèmes constituant le système de pompage photovoltaïque, ce qui fera l'objet des chapitres suivants.

Toutes les données et les paramètres du système de pompage photovoltaïque, utilisés pour la simulation, sont récapitulés dans l'annexe.

Chapitre III

Optimisation par MPPT du Système de Pompage Photovoltaïque

III.1 INTRODUCTION

Dans la plupart des systèmes photovoltaïque, le moteur électrique associé à un ou deux convertisseurs statiques est directement couplé au générateur photovoltaïque sans stockage d'énergie [8],[36]. L'exploitation adéquate de la puissance électrique extraite du générateur photovoltaïque alimentant le groupe actionneur-pompe nécessite une optimisation du système en question.

Le but principal de ce chapitre est l'optimisation du système de pompage photovoltaïque, par la maximisation de puissance délivrée par le *GPV*.

Afin de mener une étude comparative, on a abordé en premier lieu l'étude du système de pompage photovoltaïque avec un couplage sans optimisation, dans lequel le *MAS* est alimenté par le *GPV* via un onduleur de tension à *MLI* de courant. En second lieu, le système de pompage photovoltaïque sera optimisé en intercalant un hacheur Buck-Boost entre le *GPV* et l'onduleur de tension et le moteur électrique. Dans ce cas il sera question de déterminer le rapport cyclique de ce hacheur assurant une optimisation du système de pompage pour différents niveaux d'éclairements.

III.2 COUPLAGE DIRECT DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Le système de pompage photovoltaïque non optimisé est l'association des sous-systèmes suivants : un générateur photovoltaïque (*GPV*) couplé directement à l'onduleur de tension qui alimente moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge.

Ce système est largement utilisé car il peut ne pas inclure des batteries de stockage ni des régulateurs [8].

La structure de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique du moteur asynchrone alimenté par un *GPV* via un hacheur en cascade avec un onduleur de tension à *MLI* à hystérésis entraînant une pompe centrifuge est schématisée par la figure (III.1) :

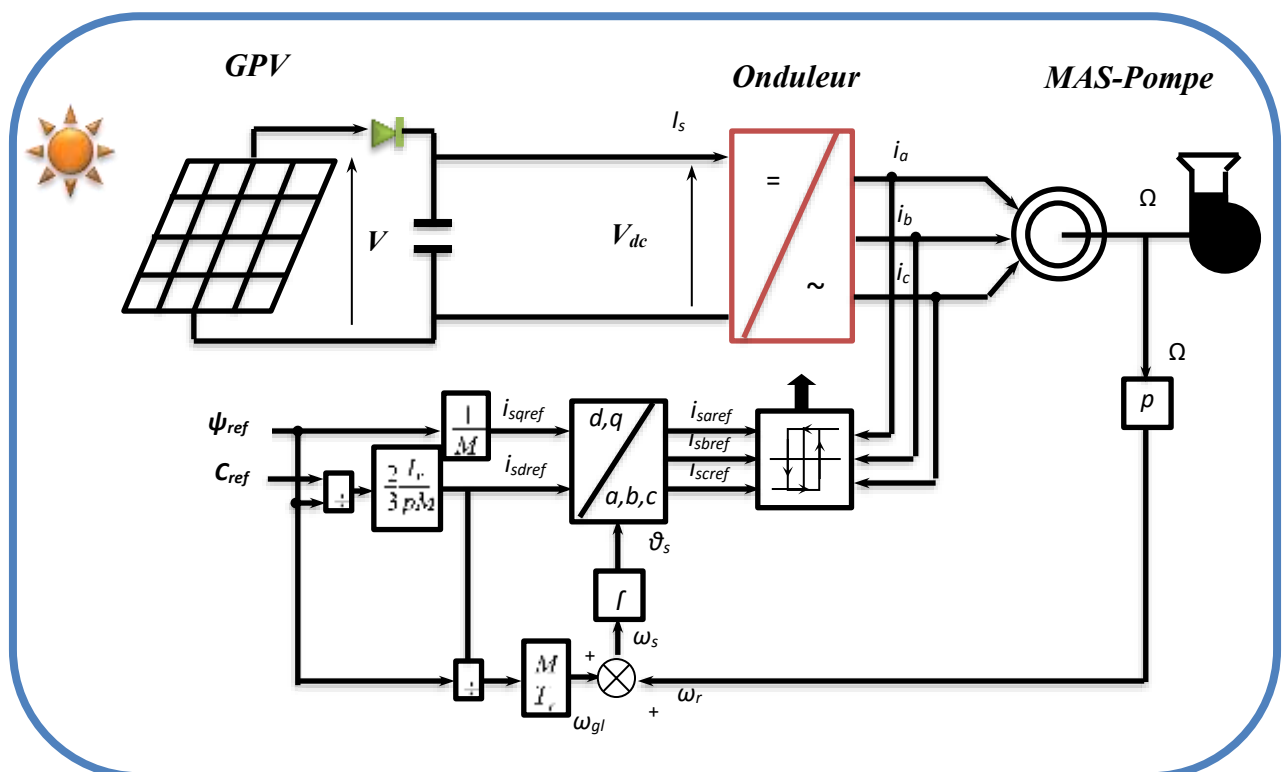


Figure III.1 Structure d'un système de pompage photovoltaïque entraîné directement par un *MAS* à flux rotorique orienté [29]

La méthode indirecte de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique élimine le besoin d'utiliser un capteur de flux mais nécessite un capteur de position ou de vitesse du rotor, car cette méthode consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux, mais seulement sa position.

Les équations donnant les valeurs de référence sont [29] :

$$i_{sdref} = \frac{1}{M} \left(\psi_{ref} + T_r \frac{d\psi_{ref}}{dt} \right)$$
$$i_{sqref} = \frac{2}{3} \frac{L_r}{pM} \frac{C_{eref}}{\psi_{ref}}$$
$$\omega_{glref} = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sqref}}{\psi_{ref}}$$

(III.1)

L'application de ces lois de commande au modèle du *MAS* donné par (II.40), associé au modèle mathématique du *GPV* (II.2), permet d'avoir les points de fonctionnement du groupe *MAS*-pompe dans le plan *I-V* du générateur photovoltaïque.

Les figures (III.2) et (III.3) illustrent les points *I(V)* et *P(V)* de la motopompe, obtenus à l'entrée de l'onduleur, pour des éclairements s'étalant de 200W/m2 à 1000W/m2.

La motopompe est bien adaptée (1000W/m², le point de dimensionnement du *GPV*), les points (*I*, *V*) et (*P*, *V*) (points '+' en bleu) s'éloignent considérablement, de ceux optimums du *GPV*, offrant des puissances électriques faibles par conséquent des vitesses faibles comme il est montré dans les figures (III.4) et (III.5).

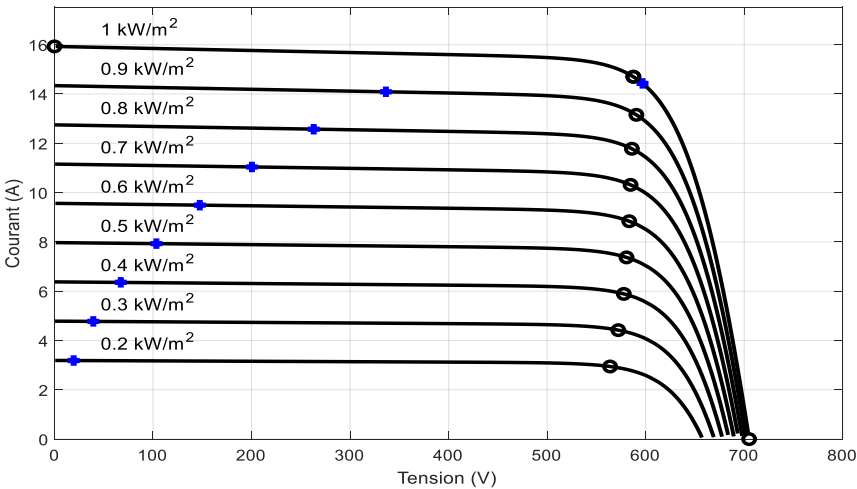


Figure III.2 Caractéristiques *I(V)* du *GPV* et points de fonctionnement en couplage direct

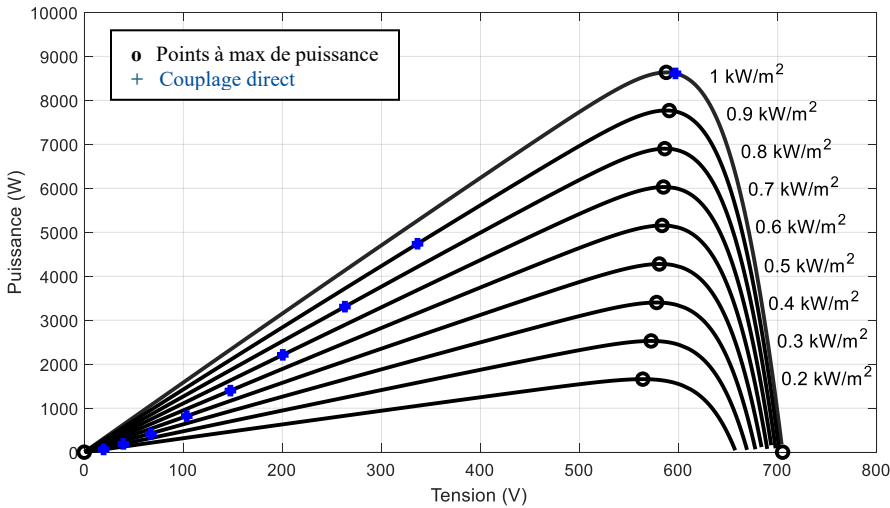


Figure III.3 Caractéristiques *P(V)* du *GPV* et points de fonctionnement en couplage direct

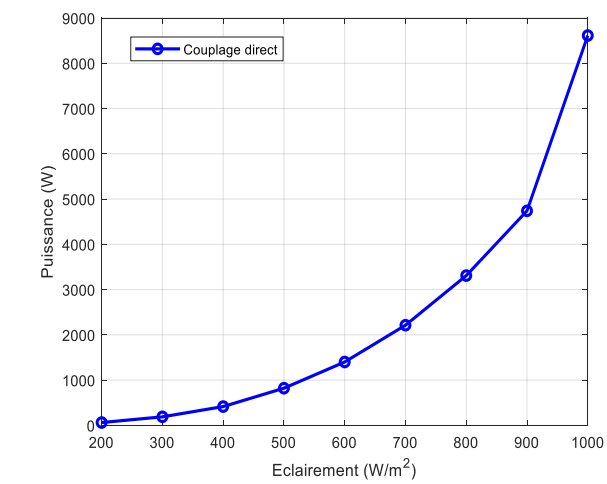


Figure III.4 Puissance en couplage direct

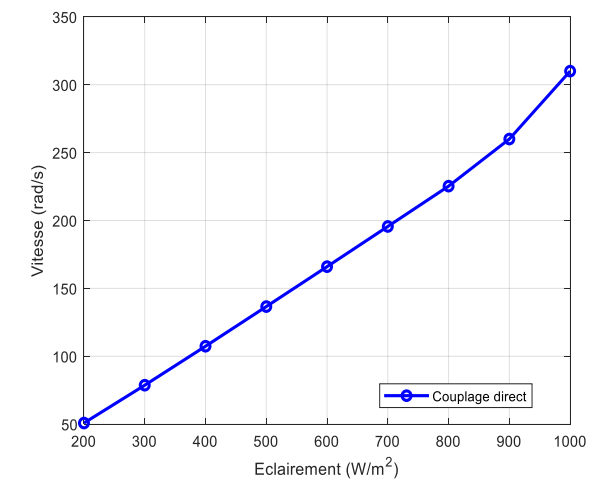


Figure III.5 Vitesse en couplage direct

III.3 COUPLAGE OPTIMISE PAR MPPT DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour exploiter le maximum de la puissance électrique délivrée par le *GPV* sur toute la plage de l’ensoleillement, et avoir des vitesses d’entraînement maximales, une adaptation de l’impédance du groupe *MAS*-pompe vue du côté du *GPV* est nécessaire. Cela est obtenu, par l’application d’une *MPPT* à l’hacheur qui consiste à faire varier le rapport cyclique en maximisant la puissance délivrée par le *GPV* pour chaque éclairement, ce qui correspond à maximiser la vitesse d’entrainement de la *MAS*-pompe. Le schéma de la simulation est donné par la figure suivante :

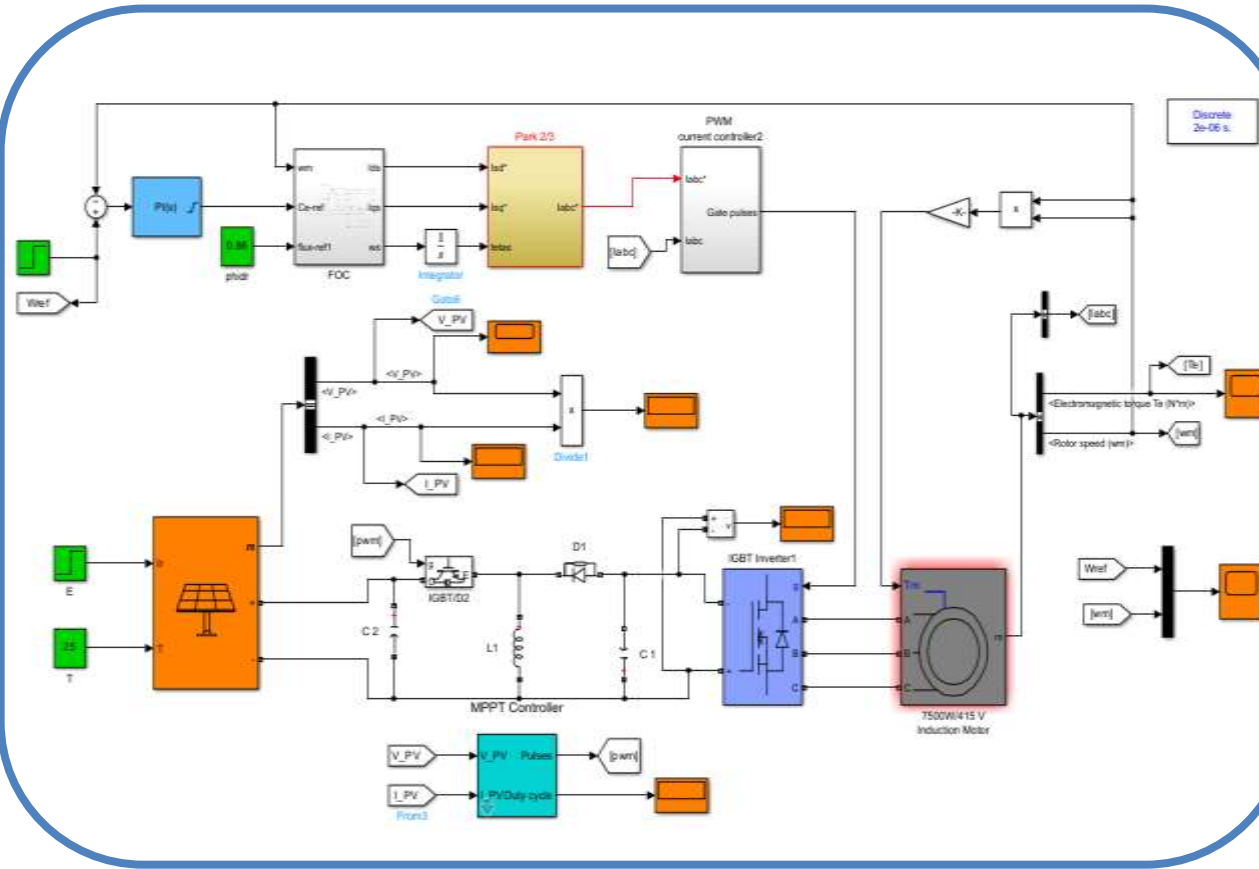


Figure III.6 Schéma de simulation du système de pompage optimisé par MPPT en boucle fermée de vitesse

Les résultats de simulation du système de pompage photovoltaïque sans et avec optimisation sont récapitulées dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 Résultats de simulation en couplage direct et avec MPPT

Couplage direct					Couplage avec MPPT				
$E(W/m^2)$	$V_{GPV}(V)$	$I_{GPV}(A)$	$P_{GPV}(W)$	$\omega(rad/s)$	$V_{GPV}(V)$	$I_{GPV}(A)$	$P_{GPV}(W)$	$\omega(rad/s)$	Alfa
1000	596.8	14.43	8613	310	588	14.69	8637.7	312	0.4201
900	336.4	14.09	4740	260	590.4	13.16	7769	300.7	0.4001
800	263.1	12.57	3309	225.3	588.6	11.72	6900	288.4	0.3802
700	200.4	11.04	2213	195.6	584.5	10.35	6029	277	0.37
600	147.5	9.49	1400	166	582.2	8.85	5154	262	0.3616
500	103.5	7.93	821	136.6	580	7.35	4279	248.4	0.3533
400	67.3	6.36	415	107.4	576.3	5.905	3403	230.3	0.3381
300	39.44	4.775	188.30	78.70	572.4	4.417	2529	208	0.3002
200	19.51	3.187	62.19	50.84	565.6	2.963	1660	179.3	0.2401

D’autre part, les figures (III.7)-(III.12) illustrent les résultats de simulations pour différents éclairements.

A partir de la caractéristique rapport cyclique (*Alfa*) de l’hacheur en fonction de l’éclairement *Alfa(E)*, on peut noter principalement que le convertisseur statique *DC-DC* est de type Buck, étant donné que la gamme de variation de *Alfa* s’étale de 0.24 à 0.42 pour une plage d’éclairement allant de 200W/m² à 1000W/m². Dans ce travail, on a opté pour un Buck-Boost.

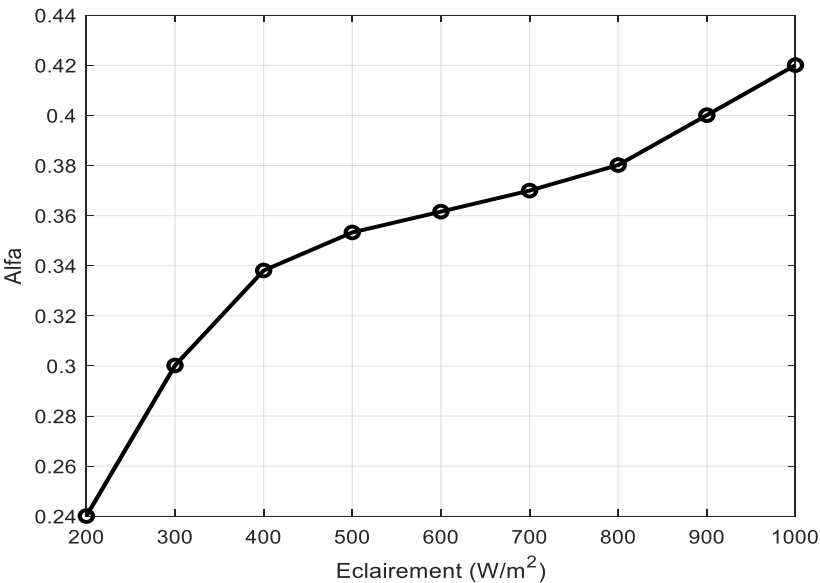


Figure III.7 Variation du rapport cyclique en fonctionne de l’éclairement

D’autre part, les caractéristiques de charge *I(V)* et de puissance *P(V)* représentées par les deux figures (III.8) et (III.9) illustrent la position des points de fonctionnement du *MAS*-pompe à puissances mécaniques maximales par rapport aux points à puissances électriques maximales du *GPV* dans les deux cas sans et avec optimisation. On remarque, un rapprochement très satisfaisant de la caractéristique de charge optimisée de celle à maximum de puissance du *GPV*, et une nette

amélioration des puissances (voir figure III.10), caractérisée par une augmentation des vitesses d'entraînement comme il est claire dans la figure (III.11).

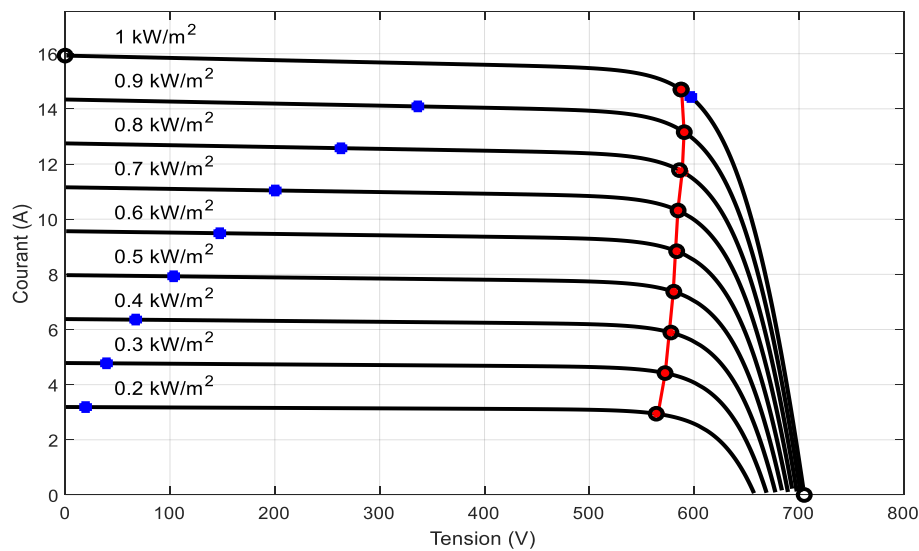


Figure III.8 Caractéristiques $I(V)$ du GPV et points de fonctionnement en couplage direct et avec $MPPT$

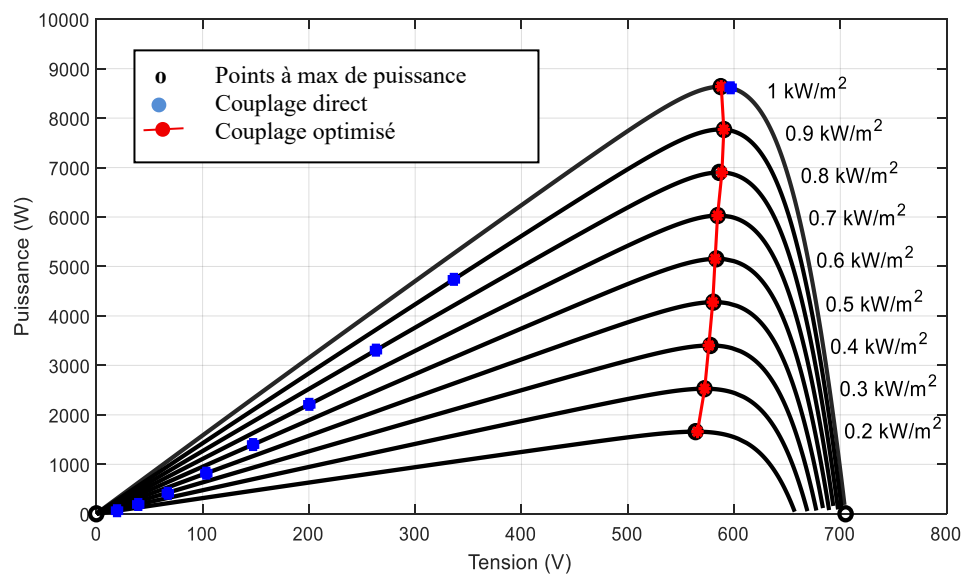


Figure III.9 Caractéristiques $P(V)$ du GPV et points de fonctionnement en couplage direct et avec $MPPT$

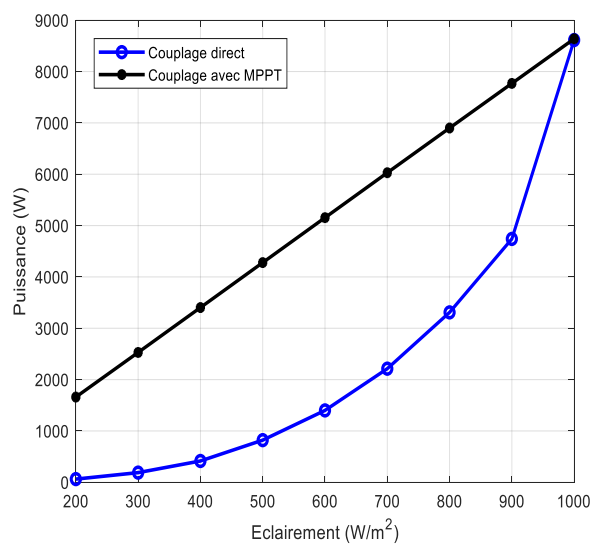


Figure III.10 Puissance en couplage direct et couplage avec $MPPT$

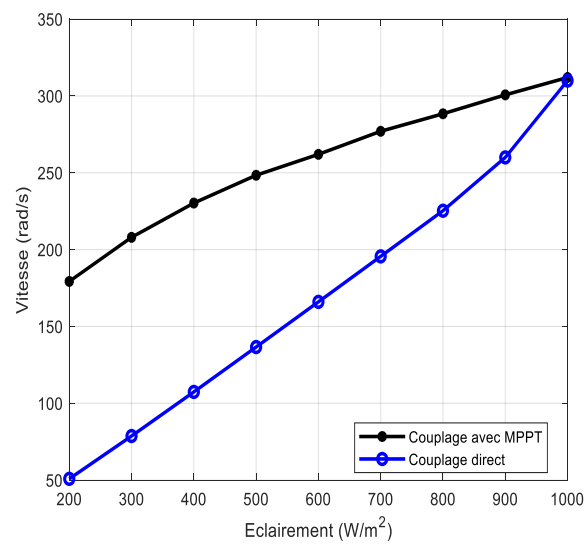


Figure III.11 Vitesse en couplage direct et couplage avec $MPPT$

III.3.1 Cas d’un démarrage du système pour un éclairement de 1000W/m²

Les résultats de simulation illustrés par les figures (III.12)-(III.19) concernent un régime transitoire de démarrage du moteur asynchrone à flux rotorique orienté entraînant le système de pompage photovoltaïque pour un éclairement de 1000W/m².

A partir de la figure (III.12) on peut remarquer que le rapport cyclique commence de 0.15, puis augmente rapidement pour se stabilise à 0.42 durant 0.8 s, cela montre la rapidité de la *MPPT* d’ajuster le *Alfa* pour atteindre le point de puissance maximale.

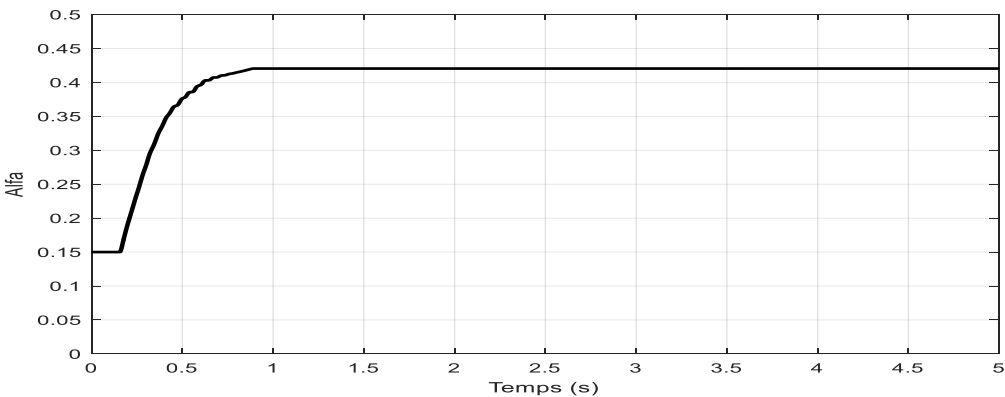


Figure III.12 Rapport cyclique de Buck-Boost à 1000 W/m²

Les courbes de tension, courant et puissance du *GPV* données par les figures (III.13), (III.14) et (III.15) montrent une phase transitoire au démarrage du système, suivie d’une stabilisation à une valeur fixe une fois le régime établi, d’une puissance de 8637.7 W qui correspond à une tension optimale de 588 V et un courant maximal de 14.69 A.

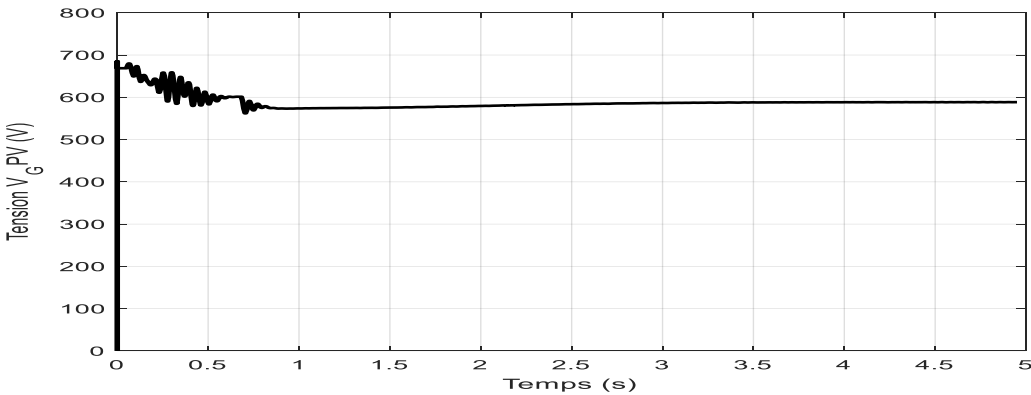


Figure III.13 Tension de *GPV* à 1000 W/m²

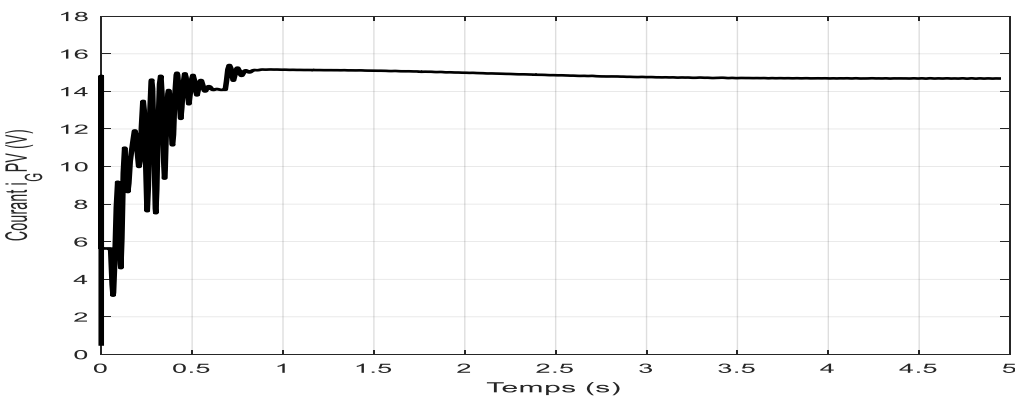


Figure III.14 Courant de GPV à 1000 W/m²

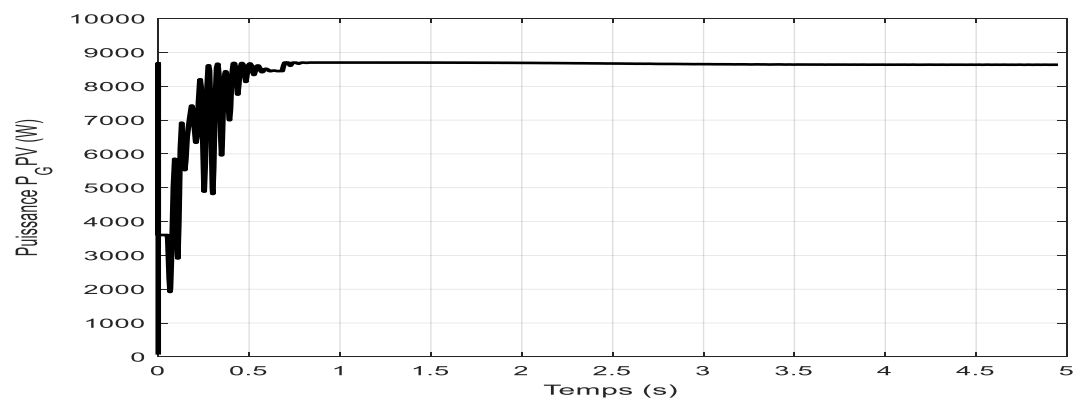


Figure III.15 Puissance de GPV à 1000 W/m²

La courbe (III.16) de la tension V_{dc} monte progressivement jusqu’à environ 475 V. On assiste ici à une régulation progressive par *MPPT* qui affine la tension pour optimiser la puissance délivrée par le *GPV*.

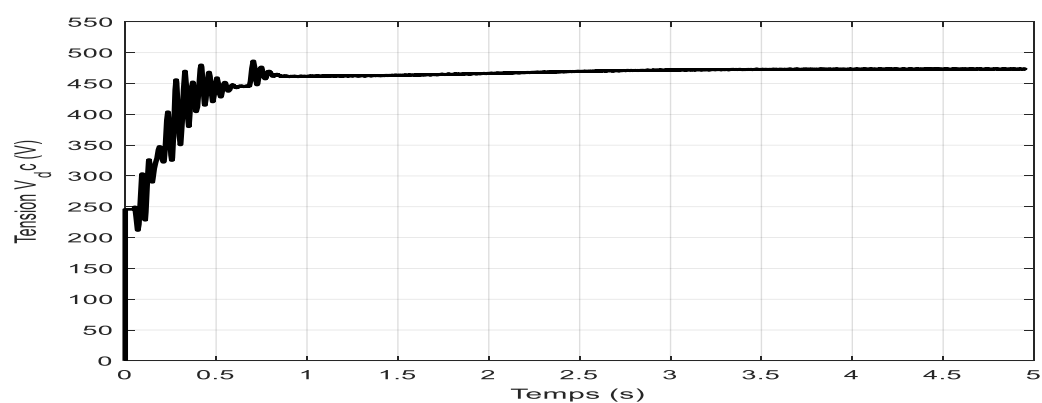


Figure III.16 Tension V_{dc} à 1000 W/m²

Le courant de phase statorique illustré par la figure (III.17) suit parfaitement le courant de référence obtenu par l’application des lois de la commande par orientation de flux rotorique au moteur asynchrone.

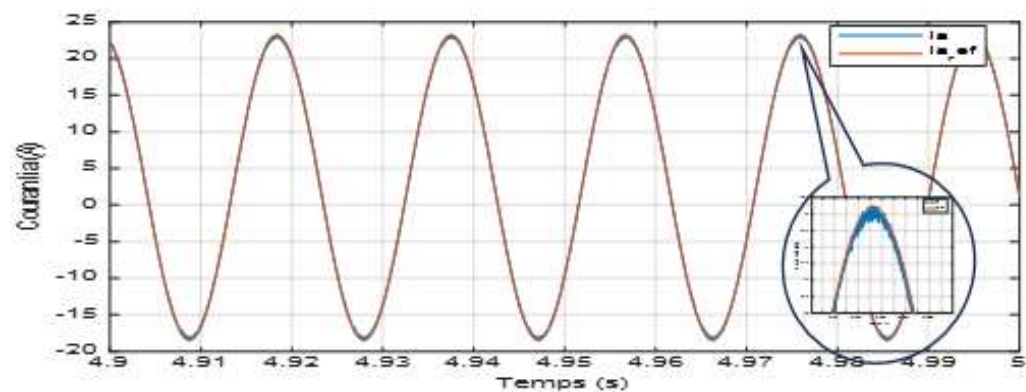


Figure III.17 Courant de phase statorique i_a et le courant de référence à 1000 W/m²

La figure (III.18) montre que la vitesse de rotation du moteur évolue progressivement jusqu’à atteindre sa valeur de référence de 312 rad/s avec un régime permanent stable, montrant une bonne réponse dynamique sans dépassement notables, cela confirme l’efficacité de la commande vectorielle et la bonne régulation.

Du côté du moteur, le couple électromagnétique reste constant comme prévu par l’algorithme de commande, ce qui correspond bien à la nature de la charge (pompe centrifuge).

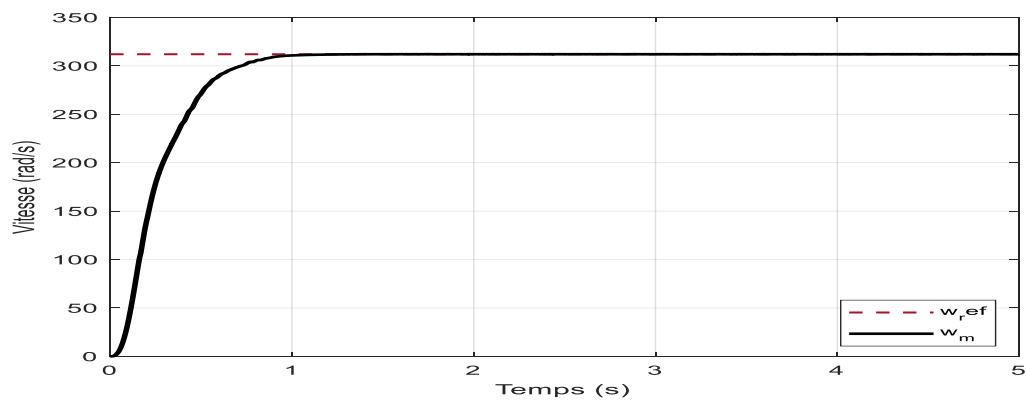


Figure III.18 Vitesse de rotation à 1000 W/m²

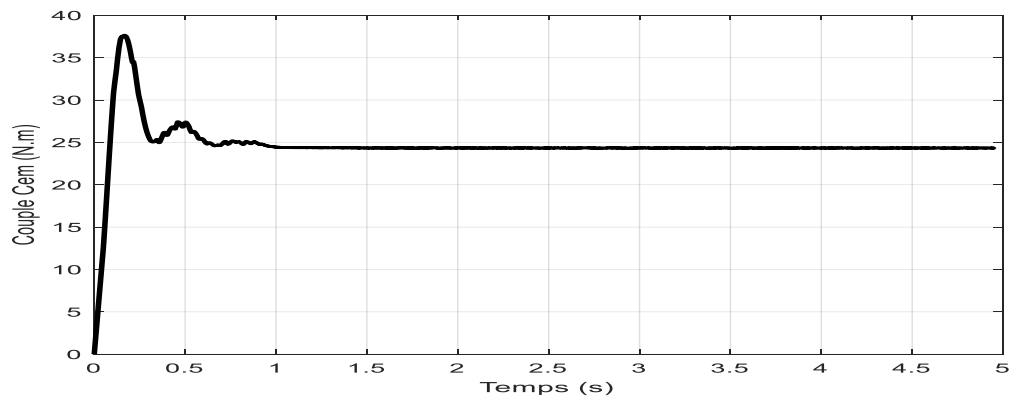


Figure III.19 Couple électromagnétique à 1000 W/m²

III.3.2 Cas d’une variation de l’éclairement de 800W/m² à 1000 W/m²

Pour tester la réactivité d’un système photovoltaïque une variation présente un changement de conditions d’éclairement a été effectuée par une augmentation brusque de l’éclairement à l’instant t=3 s, passant de 800 W/m² à 1000 W/m² comme il est montré par la figure (III.20).

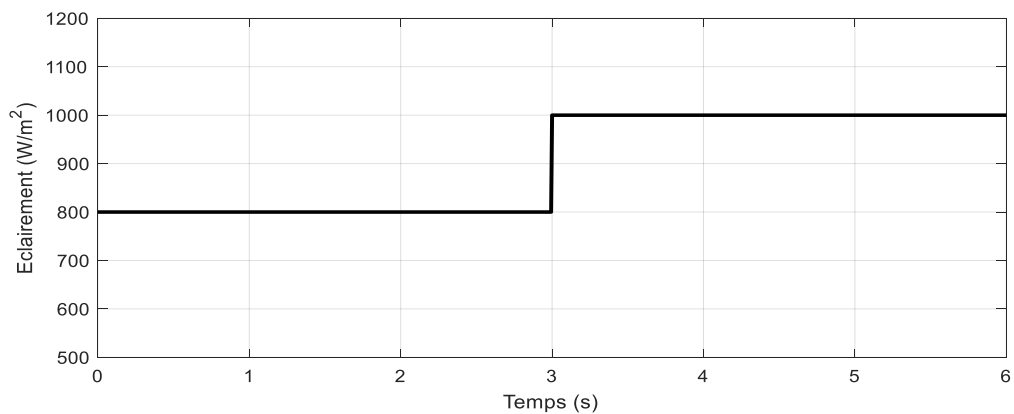


Figure III.20 Variation de l’éclairement de 800 W/m² 1000 W/m²

Le rapport cyclique *Alfa* illustré par la figure (III.21) augmente rapidement juste après la hausse de l’éclairement, atteint un pic, puis se stabilise. Cela signifie que le rapport cyclique (*PWM*) s’adapte pour ajuster la tension de sortie du convertisseur *DC-DC* en réponse à la variation de l’éclairement.

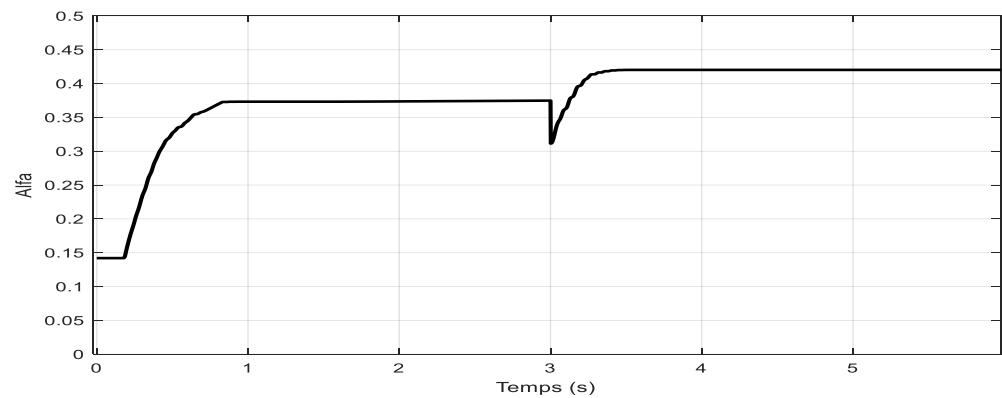


Figure III.21 Variation du rapport cyclique Alpha

On note dans la figure (III.22) une augmentation momentanée de la tension PV après l’augmentation de l’éclairement, suivie d’une stabilisation. Cela est dû à un point de fonctionnement déplacé temporairement par la variation rapide de l’éclairement, avant que le système ne se réadapte via un algorithme $MPPT$.

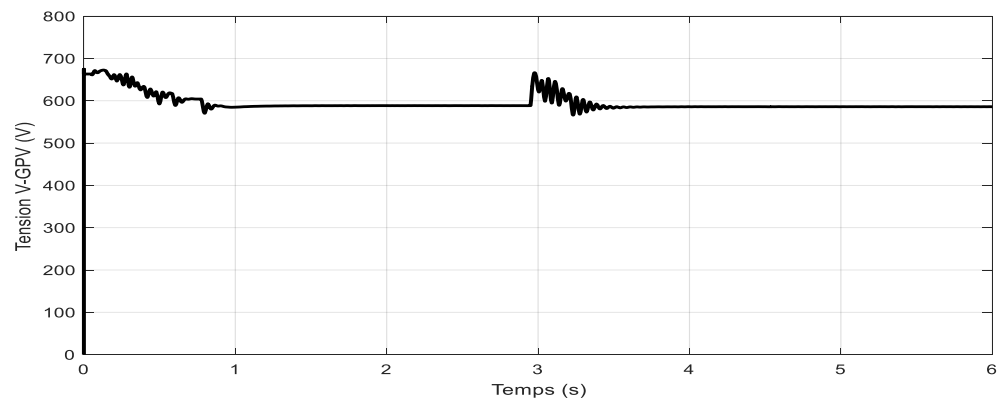


Figure III.22 Variation de tension du GPV

La tension V_{dc} (voir figure (III.23)) présente un comportement similaire à celui de la tension PV , on observe une montée rapide puis des légères fluctuations transitoires, avant stabilisation. Il s’agit de la tension de sortie d’un convertisseur $DC-DC$, qui tente de maintenir une tension continue stable malgré les perturbations.

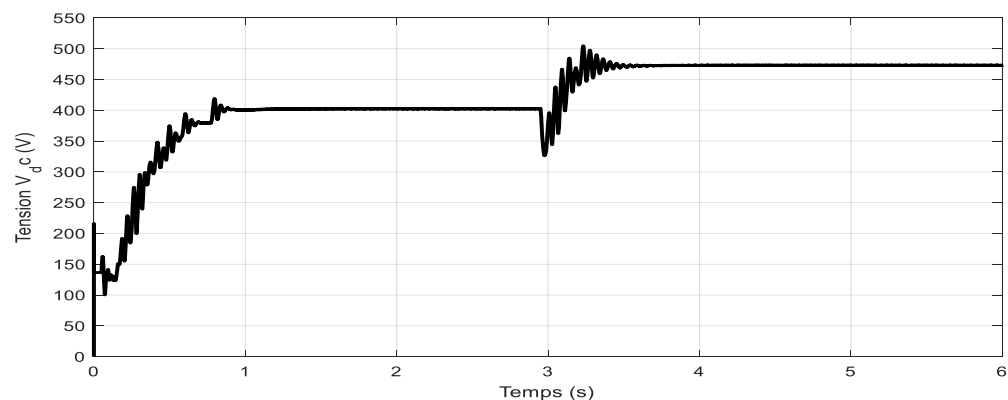


Figure III.23 Variation de tension V_{dc}

Dans la figure (III.24), la vitesse de rotation (ω_m) suit une montée rapide vers la consigne (ω_{ref}), puis se stabilise à sa valeur de référence de 288 rad/s correspondante à l’éclairement 800W/m², par la suite la vitesse de rotation augmente progressivement après la transition d’éclairement. Elle atteint une nouvelle valeur d’équilibre légèrement supérieure à la précédente de valeur de 312 rad/s,

ce qui est cohérent : plus de puissance disponible c’est-à-dire que le moteur peut entraîner la pompe à une vitesse plus élevée. Cela valide le bon fonctionnement du convertisseur *MPPT*, qui ajuste le point de fonctionnement pour exploiter au mieux le nouvel éclairement.

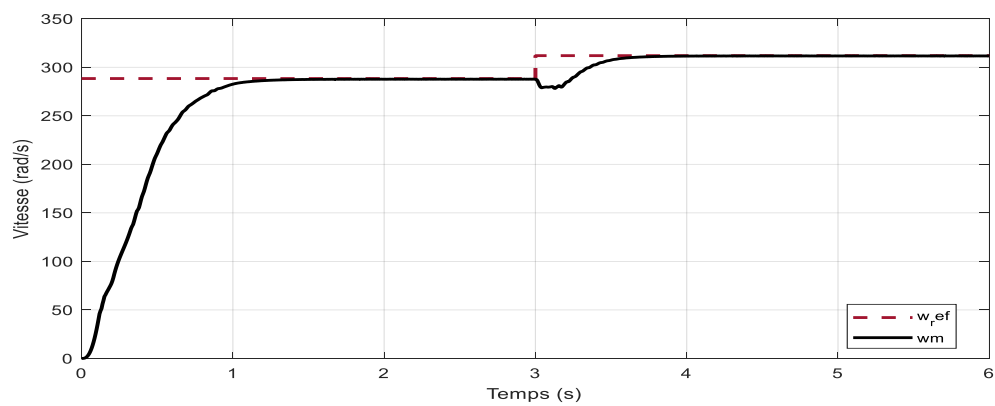


Figure III.24 Variation de la vitesse de rotation de la MAS-pompe

Le couple électromagnétique varie nettement juste après la variation d’éclairement, avec des oscillations visibles. Ces fluctuations témoignent d’un effort du système pour s’adapter à la nouvelle puissance disponible, causé par la recherche d’un nouveau point de fonctionnement optimal. Et l’ajustement dynamique du régulateur pour suivre la charge mécanique de la pompe.

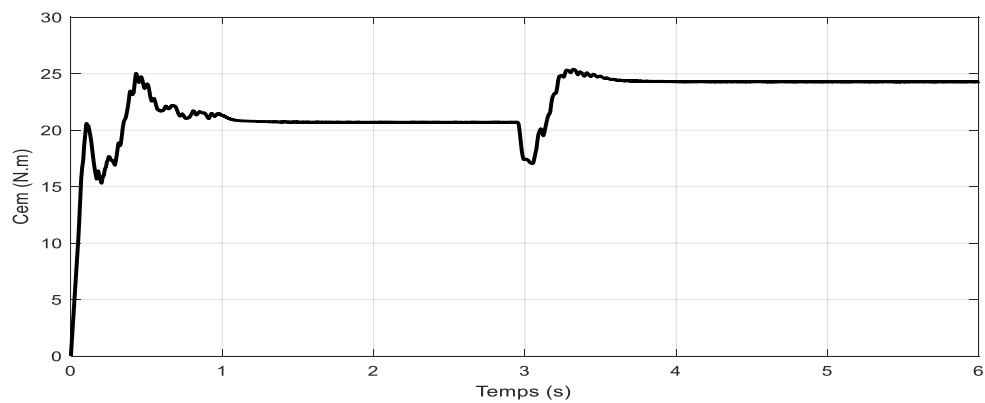


Figure III.25 Variation de couple électromagnétique

III.4 CONCLUSION

Les différentes variations d’éclairement ont démontré la capacité du convertisseur Buck-Boost à réguler efficacement la tension du bus continu et à assurer une adaptation dynamique du système aux conditions environnementales. Les grandeurs électriques et mécaniques telles que la tension, le courant, la vitesse, le couple et la puissance ont réagi de manière cohérente et stable, traduisant un comportement globalement performant. Le système montre ainsi une bonne efficacité énergétique et une stabilité satisfaisante.

Chapitre IV

Optimisation du Système de Pompage Photovoltaïque par Réseaux de Neurones

IV.1 INTRODUCTION

Le cerveau humain est un réseau de neurones biologique très complexe. Il comprend des milliards de neurones hautement interconnectés entre eux, permettant entre autres le processus de la respiration, des mouvements et de la pensée. Les scientifiques commencent juste à comprendre le fonctionnement du cerveau. On sait maintenant que toutes les fonctions neurologiques biologiques, comme la mémoire, sont emmagasinées dans les neurones et dans les interconnexions entre eux, L'apprentissage est vu comme l'établissement de nouvelles connexions entre les neurones ou dans les modifications entre ses interconnexions.

Le terme réseaux de neurones 'formels' ou 'artificiels' fait rêver certain, et fait peur à d'autres. La vérité est à la fois plus prosaïque et plus rassurante, les réseaux de neurones constituent une technique de traitement de données bien comprise et maîtrisée, ils sont utilisés pour faire des prévisions, élaborer des modèles, reconnaître des formes ou des signaux [44].

IV.2 HISTORIQUE DES RESEAUX DE NEURONES [45]

Les premiers travaux sur les neurones artificiels ont débuté au début des années 1940 et ont été mémés par McCulloh et Pitts. Ils décrivent les propriétés du système nerveux à partir de neurones idéalisés : ce sont des neurones logiques (0 ou 1). Dix années plus tard, on a constitué le premier modèle réel d'un réseau de neurones.

En 1960, le premier perceptron est créé par Rosenblatt. Puis, durant les années 1970 il y eut une remise en cause de l'intérêt des réseaux de neurones car les ordinateurs apprenaient lentement, coutaient très cher et leurs performances n'étaient pas si impressionnantes.

La disponibilité croissante de minis et microordinateurs, vers la fin des années 1970, a permis aux réseaux de neurones de prendre départ. On attribue à Hopfield (un physicien de Caltech) un rôle majeur dans cette résurrection.

IV.3 NEURONE BIOLOGIQUE

Le neurone biologique (figure (IV.1)) est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie.

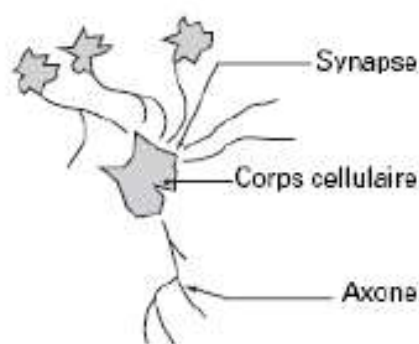


Figure IV.1 Neurone biologique.

IV.4 NEURONE ARTIFICIEL

Un neurone artificiel est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeur bornée. C'est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrée en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire (neurone) est doté d'une sortie unique, qui se ramifie pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. A chaque connexion d'entrée est associé un poids [44],[45].

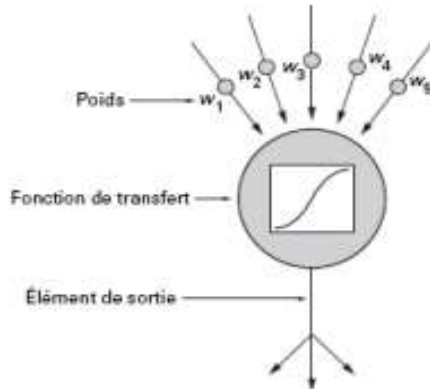


Figure IV.2 Neurone Artificiel

IV.5 RESEAUX DE NEURONES

Un neurone réalise simplement une fonction non linéaire, paramétrée, de ses variables d'entrées. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non linéaires réalisée par chacune des neurones. Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la « topologie » du modèle. Le plus souvent, cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones [45].

- Réseau multicouche.
- Réseau à connexion locales.
- Réseau à connexion récurrentes.
- Réseau à connexion complexe.

IV.5.1 Apprentissage des réseaux de neurones

On appelle apprentissage des réseaux de neurones la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée [46].

IV.5.2 Apprentissage supervisé

L'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée). Tout le problème de l'apprentissage supervisé consiste, à déterminer le vecteur des poids w d'un réseau capable de mettre ces informations en correspondance [44]-[46].

IV.5.3 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage est qualifié de non supervisé lorsque seules les valeurs d'entrées sont disponibles. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sorties qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrées similaires (de même nature).

IV.5.4 Sur-apprentissage

Les travaux expérimentaux menés sur les réseaux de neurones ont montré que, si on dépasse un certain nombre d'exemples d'entraînement, le réseau peut perdre sa capacité de généralisation, et donner ainsi des sorties non satisfaisantes pour de nouvelles entrées, c'est ce qu'on appelle le sur-apprentissage.

IV.6 ALGORITHME D'APPRENTISSAGE DE RESEAUX DE NEURONES

La phase d'apprentissage est une étape déterminante dans la conception du réseau de neurones. Pour cela, des algorithmes appropriés ont été élaborés et développés, chacun de ces algorithmes est spécifique à un type de réseau.

IV.6.1 Algorithme de rétro-propagation

Cet algorithme est appliqué au réseau de neurone de la manière suivante : le réseau est stimulé par un vecteur d'entrée. L'information se propage à travers les couches cachées. La sortie du réseau est recueillie et comparée à une réponse désirée. Ensuite les poids synaptiques sont modifiés par rétropropagation de l'erreur. Le terme rétropropagation provient du fait que l'erreur calculée en sortie est transmise en sens inverse vers l'entrée. Cet apprentissage est du type supervisé.

La quantité à minimisée, à chaque pas d'apprentissage k , est la variance de l'erreur de sortie du réseau [44].

IV.6.2 Algorithme fast back-propagation

L'un des inconvénients de l'apprentissage des réseaux de neurones sur ordinateurs, est le temps énorme que met le réseau pour converger vers une performance acceptable. Ceci a poussé les chercheurs à trouver d'autres alternatives d'algorithmes rapides et efficaces. Parmi, l'algorithme Fast Back-propagation.

Le principe d'apprentissage dans cet algorithme est identique à celui de la Back-propagation, la différence réside dans le changement de la fonction à minimiser en vue d'accélérer la convergence après la première itération.

IV.6.3 Algorithme random optimisation méthode (rom)

C'est une méthode d'optimisation basée sur des techniques aléatoires utilisée pour retrouver l'extremum d'une fonction et adaptée à l'apprentissage des réseaux de neurones.

IV.7 Optimisation du système de pompage photovoltaïque en utilisant réseaux de neurones

L'opération d'optimisation par réseau de neurones du système de pompage photovoltaïque entraîné par un *MAS* n'est établie qu'après des procédures de conception et de essais répétitives, pour trouver la configuration d'un réseau de neurones à une entrée et deux sorties, apte à apprendre le

comportement du système en question, en affectant à l'éclairement au couple (rapport cyclique du hacheur, vitesse de rotation du *MAS*) qui le correspond.

On rappelle que l'optimisation du système de pompage photovoltaïque consiste en la maximisation de la puissance délivré par le *GPV*, ce qui revient à maximiser la vitesse de l'entraînement du *MAS* pour chaque éclairement, et cela par un ajustement judicieux du rapport cyclique d'un hacheur. De ce fait, les triplets (d'entrées/sortie) constituant l'ensemble d'apprentissage du réseau de neurones sont (l'éclairement E , le rapport cyclique du hacheur /la vitesse de référence ω_{ref}). Cet ensemble d'échantillons doit être représentatif pour permettre au réseau de bien modélisé le comportement du système.

IV.7.1 Conception d'un réseau de neurones assurant un fonctionnement *MPPT*

Dans ce travail, nous avons utilisé un *RNA* pour générer automatiquement le rapport cyclique de l'hacheur pour assurer un fonctionnement en mode *MPPT* et la vitesse de référence du moteur à induction à flux rotorique orienté correspondant au point *MPP*. Tout d'abord, nous allons expliquer comment utiliser le '*nntool*' de *Matlab* pour entraîner cet *RNA* à travers les différentes étapes d'utilisation de cette interface graphique.

L'outil *nntool* de *MATLAB* est une interface graphique qui permet de créer, entraîner et tester des réseaux de neurones artificiels (*RNA*) de manière intuitive. Voici les étapes principales pour créer, entraîner et utiliser un *RNA* avec *nntool* :

1. Ouvrir l'interface *nntool*

- Lancez *MATLAB*.
- Dans la ligne de commande, tapez *nntool* et appuyez sur *Entrée*.

2. Importer les données

- Une fois l'interface ouverte, cliquez sur *Import* pour ajouter les données d'entrée (*inputs*) et de sortie (*targets*).
- Les données doivent être sous forme de matrices bien organisées.

3. Créer un réseau de neurones

- Cliquer sur *New* pour créer un nouveau réseau.
- Sélectionner le type de réseau (*Feedforward* dans notre cas).
- Spécifier le nombre de couches (2 couches cachées de **20 & 30** neurones respectivement dans notre cas) et les fonctions d'activation (*tansig* pour les couches caches et *purelin* pour la couche de sortie). Ainsi on aura créé un *RNA* nommé systématiquement '*Network1*'.

4. Configurer les paramètres d'apprentissage et entraîner le *RNA* créé

- Choisir l'algorithme d'apprentissage (*Levenberg-Marquardt* qui est choisi par défaut).
- Cliquer sur *Train* pour démarrer l'entraînement du *RNA*.
- Suivre l'évolution dans la fenêtre de performance.

5. Évaluer et tester le réseau

- Utiliser des données de test pour vérifier la précision du *RNA*.
- Adapter les paramètres d'apprentissage si nécessaire pour améliorer la précision.

6. Exporter le réseau

- Une fois satisfait des résultats, cliquer sur *Export* pour sauvegarder le réseau et l'utiliser dans d'autres simulations *MATLAB* (Dans notre cas nous avons utilisé l'instruction '*gensim*' pour générer un bloc de Simulink qui simule le *RNA* conçu précédemment).

IV.7.2 Simulation du système de pompage *PV* optimisé par réseaux de neurones

Le schéma de l'optimisation du système de pompage photovoltaïque par *RNA* est donné par la figure suivante :

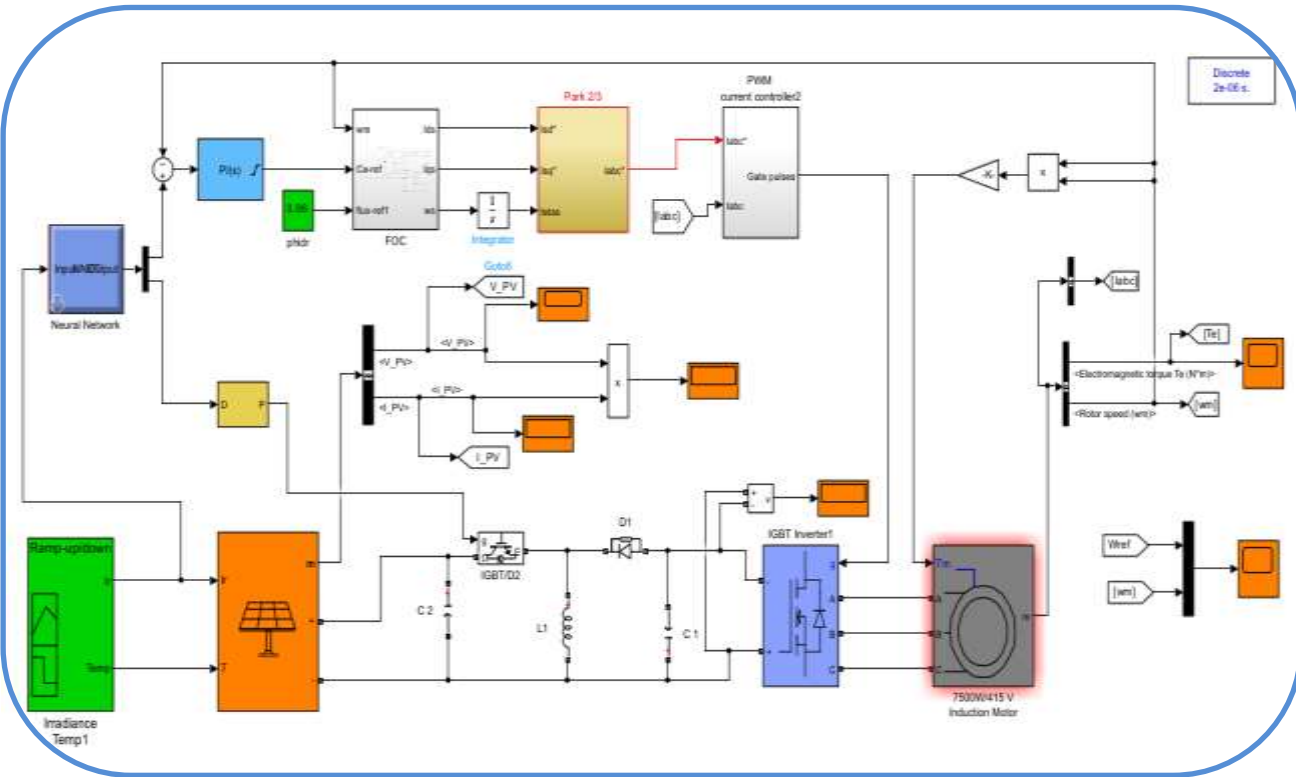


Figure IV.3 Schéma de système de pompage photovoltaïque optimisé par *RNA*

Dans ce système de commande intelligent, un réseau de neurones *RNA* est intégré afin d'améliorer la réactivité et l'adaptabilité du contrôle moteur en environnement photovoltaïque variable. Le *RNA* reçoit en entrée la valeur d'éclairement solaire instantané, un paramètre critique qui conditionne la puissance disponible générée par les panneaux photovoltaïques. À partir de cette information, le *RNA* génère simultanément deux sorties essentielles au fonctionnement du système :

- La vitesse de référence transmise au régulateur *PI*, servant de consigne pour le contrôle de la machine asynchrone.
- Le rapport cyclique (*Alfa*) destiné au hacheur *DC-DC*, permettant d'adapter dynamiquement le transfert de puissance entre le *GPV* et la charge.

Ce couplage permet au système de réagir de manière intelligente aux variations d'éclairement, en anticipant les besoins en énergie et en ajustant la commande motrice de façon proactive. Grâce à la mémoire interne du *RNA*, le modèle peut tenir compte de l'évolution temporelle de l'éclairement,

offrant ainsi une régulation plus fluide, anticipative et robuste face aux perturbations environnementales.

D’après la figure (IV.5), on peut remarquer que le *RNA* à réussi à reproduire fidèlement le comportement du régulateur classique, avec très peu d’écarts visibles. Cela confirme que le modèle neuronal est bien entraîné, capable de déterminer le rapport cyclique optimal pour différentes valeurs d’éclairement. Donc, on peut parler de concordance quasi parfaite, ce qui valide l’approche *RNA* pour remplacer ou renforcer le contrôle classique.

En outre, on remarque d’après la figure (IV.6) que les vitesses de référence issues du *RNA* suivent de très près celles de la *MPPT* pour tous les niveaux d’irradiation. Cela démontre une fois de plus que le *RNA* est également efficace pour générer une consigne de vitesse appropriée, en s’appuyant uniquement sur l’éclairement.

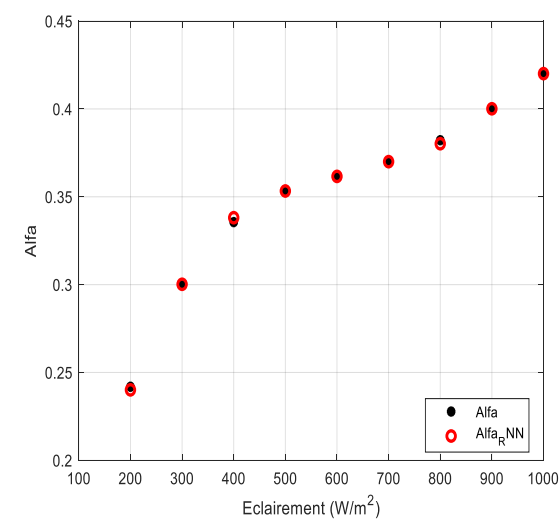


Figure IV.4 Concordance des rapports cycliques obtenus par *MPPT* et *RNA*

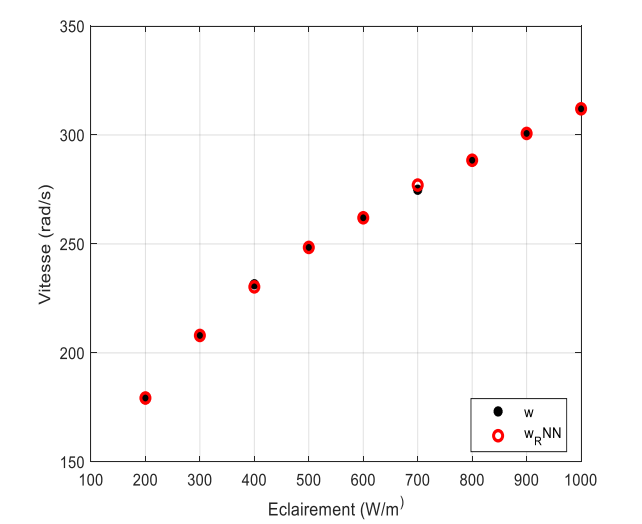


Figure IV.5 Concordance des vitesses de référence obtenues par *MPPT* et *RNA*

Le tableau IV.1 montre une excellente précision du *RNA* dans l’estimation de la vitesse de référence et du rapport cyclique, avec des erreurs relatives très faibles (inférieures à 1 % pour la vitesse et à 10⁻⁵ % pour le *Alfa*). Les valeurs estimées suivent fidèlement celles de référence pour différentes irradiances. Cela confirme la capacité du *RNA* à reproduire le comportement optimal du système sans recours à une *MPPT* classique.

Tableau IV.1 Précision du *RNA* dans l’estimation du rapport cyclique et de la vitesse de référence

<i>E</i>	1000	900	800	700	600	500	400	300	200
ω_{ref}	312	300.7	288.4	277	262	248.4	230.3	208	179.3
ω_{ref_RNA}	312	300.7	287.938	274.860	262	248.4	231.496	208	178.808
<i>Erreur de ω_{ref} %</i>	0.0000	0.0000	0.1601	0.7724	0.000	0.000	0.5194	0.0000	0.2741
<i>Alfa</i>	0.4201	0.4001	0.3802	0.37	0.3616	0.3533	0.3356	0.3002	0.2419
<i>Alfa_RNA</i>	0.4201	0.4001	0.3822	0.3693	0.3616	0.3533	0.3356	0.3002	0.2419

Erreur Alfa % (10 ⁻⁵)	0.9990	0.9990	1.0043	0.9971	0.9990	0.9990	0.9916	0.9990	1.0063
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

IV.7.3 Test de performance et de robustesse du RNA

Pour simuler des variations réelles du soleil (nuages passants, météo changeante) et pour tester la réactivité du système en présence du RNA on a effectué une variation par paliers de l'éclairement, de façon brusque, un démarrage à 1000W/m², suivi par une diminution de l'éclairement à 600 W/m² après 2 s, par la suite une ré-augmentation de l'éclairement jusqu'à 800W/m² à l'instant 4s.

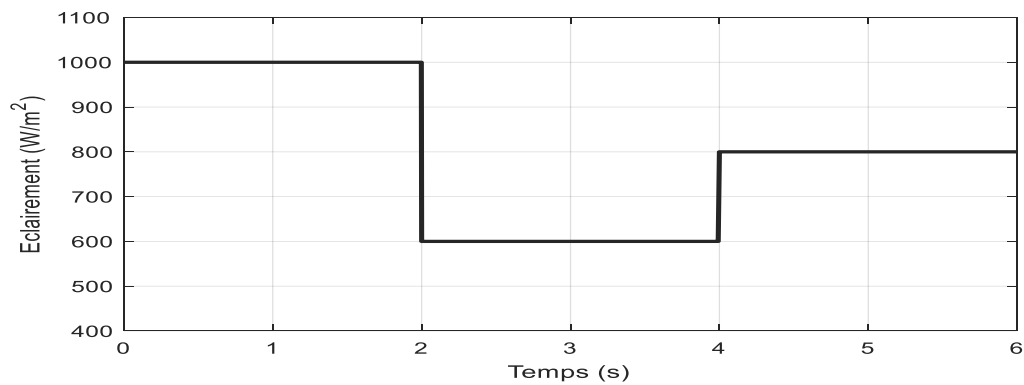


Figure IV.6 Variation de l'éclairement en fonctionne de temps

La variation du rapport cyclique en fonction de l'éclairement est représentée par la figure (IV.7). On remarque que Alfa suit parfaitement l'évolution de l'éclairement. À chaque augmentation de l'éclairement, le rapport cyclique augmente également et vis ver ça. Il prend les valeurs 0.42 ; 0.3616 ; 0.3822 pour les éclairements 1000 W/m² ; 600 W/m² ; 800 W/m² Cela montre que le convertisseur DC-DC adapte sa commande pour exploiter au mieux la puissance issue du GPV. Ce qui traduit par une augmentation de la vitesse, (figure (III.9), à chaque saut d'éclairement, traduisant une accélération de la pompe lorsque plus d'énergie devient disponible. Le système convertit donc l'augmentation de puissance solaire en une hausse effective de la vitesse mécanique qui prend les valeurs de références suivante 312 rad/s ; 262 rad/s ; 287.938 rad/s.

Les fluctuations visibles sont dues à des transitoires de réglage par MPPT.

Notons que le régulateur PI présente des transitoires courts et une bonne stabilité.

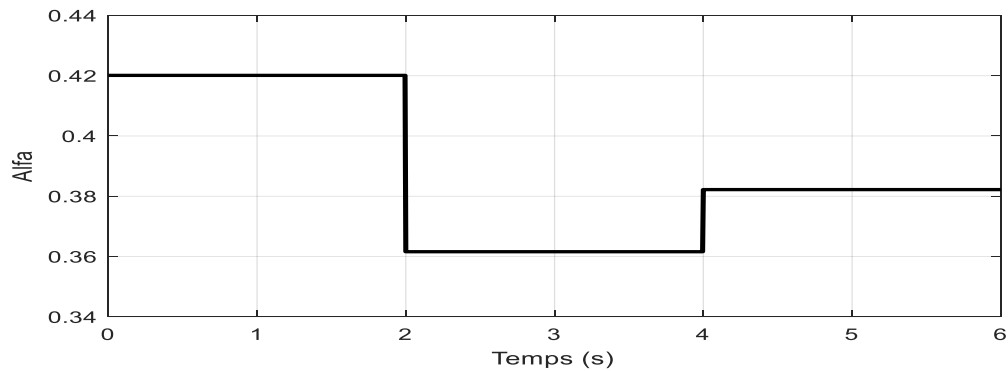


Figure IV.7 Variation de rapport cyclique

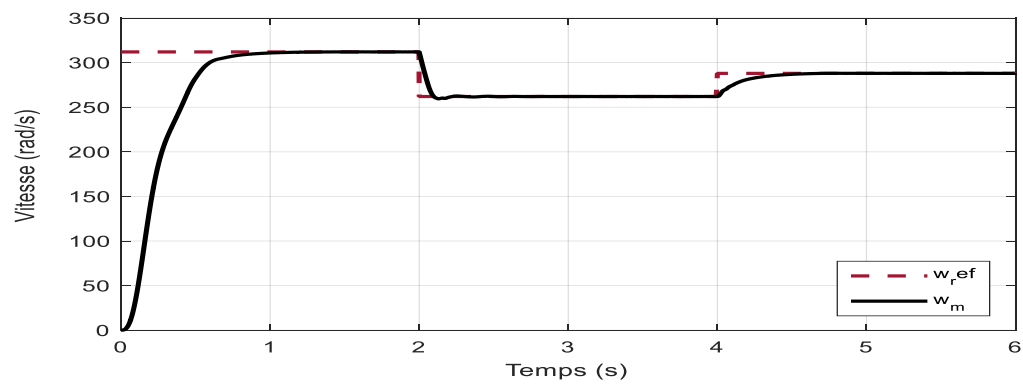


Figure IV.8 Variation de la vitesse de référence et la vitesse de rotation du MAS

Le démarrage du moteur est caractérisé par un pic initial (près de 35 Nm), suivi de fluctuations transitoires avant de se stabiliser. Durant cette phase le couple élevé est requis pour vaincre les frottements et l’inertie de la pompe. Les oscillations qui suivent traduisent des ajustements du système de commande, avant un régime permanent.

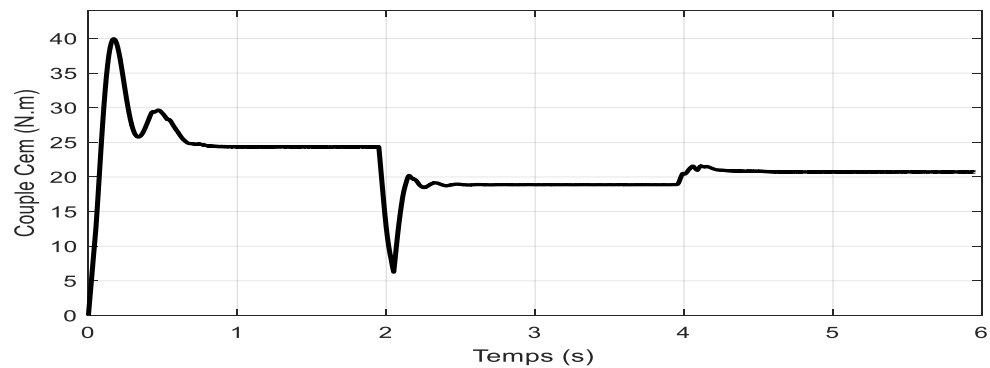


Figure IV.9 Variation de couple électromagnétique

La tension V_{GPV} illustrée par la figure (IV.11) est relativement stable, avec de très légères ondulations. Cela montre que la production photovoltaïque est bien régulée, et que le convertisseur *MPPT* parvient à maintenir une tension proche de son point de fonctionnement optimal malgré les fluctuations du couple. Alors que l’établissement de la tension V_{dc} (figure IV.12) valide la capacité du système à revenir rapidement au régime nominal démontre une bonne régulation de la tension continue.

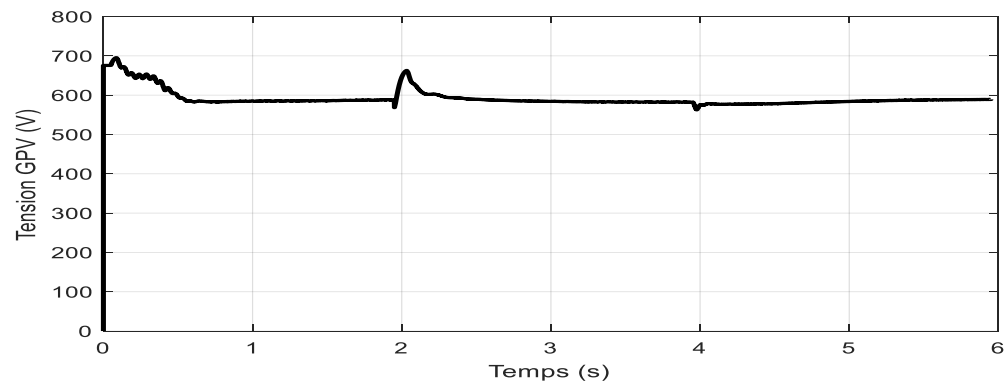


Figure IV.10 Variation de la tension de GPV

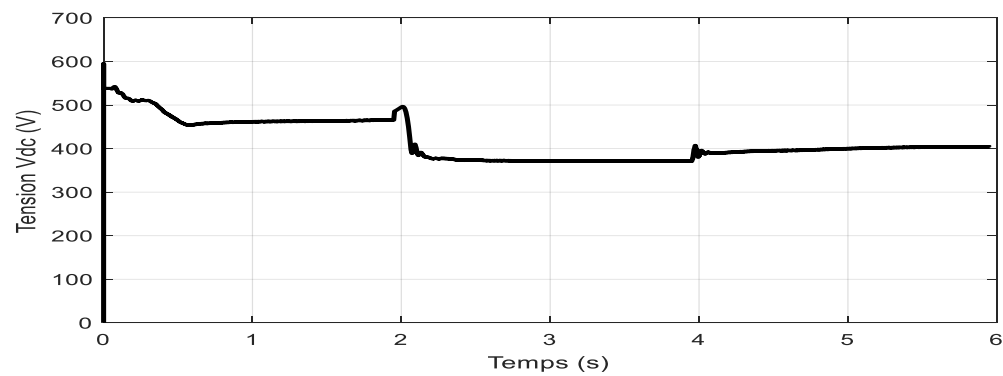


Figure IV.11 Variation de la tension V_{dc}

Pour tester la robustesse du *RNA* on a choisi des conditions environnementales différente de celles utilisées pour l’appointage du *RNA*. On a effectué une variation par paliers de l’éclairement, de façon brusque (figure (IV.13), un démarrage à 940W/m^2 , suivi par une diminution de l’éclairement à 730 W/m^2 après 2 s, par la suite une ré-augmentation de l’éclairement jusqu’à 910 W/m^2 à l’instant 4s.

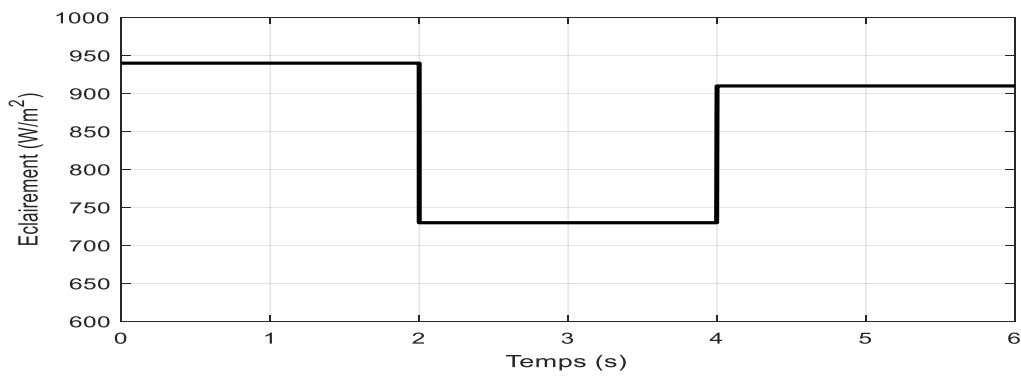


Figure IV.12 Variation de l’éclairement

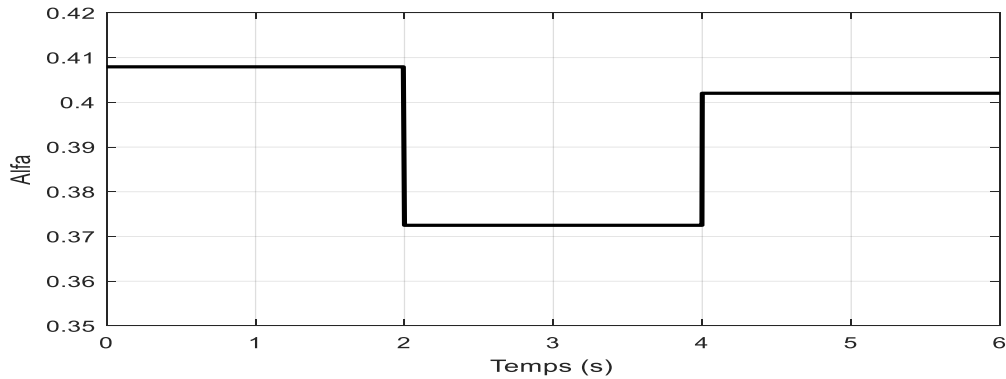


Figure IV.13 Variation de rapport cyclique

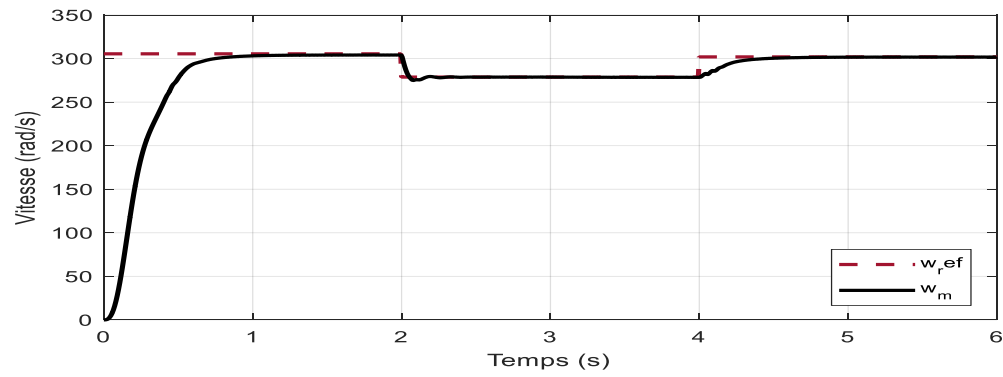


Figure IV.14 Variation de vitesse de rotation et la vitesse de référence

La Figure (IV.14) Affiche le changement du rapport cyclique (*Alfa*) sur une plage de 0 à 6 secondes. On observe une évolution en escalier avec des modifications nettes à différents intervalles.

Il prend les valeurs 0.4079 ; 0.3725 ; 0.402 pour les éclairements 940 W/m^2 ; 730 W/m^2 ; 910 W/m^2 respectivement donnant les vitesses de références suivantes respectivement 305.4 rad/s ; 278.7 rad/s ; 301.9 rad/s (voir figure (IV.15)).

Le test du bloc *RNA* a permis de vérifier sa capacité à ajuster le rapport cyclique en temps réel en fonction des variations d'éclairement, sans nécessiter du *MPPT* conventionnelle. Les résultats ont montré une bonne stabilité, une réponse rapide et une amélioration notable de l'efficacité énergétique du système.

IV.8 CONCLUSION

Les résultats de simulation ont permis de valider le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque étudié en présence du *RNA*. Les différents tests effectués ont démontrés la capacité du convertisseur *DC-DC* à réguler efficacement la tension du bus continu et à assurer une adaptation dynamique du système aux conditions environnementales. Les grandeurs électriques et mécaniques telles que la tension, le courant, la vitesse, le couple et la puissance ont réagi de manière cohérente et stable, traduisant un comportement globalement performant.

Les résultats obtenus prouvent que le *RNA* peut remplacer efficacement la logique de commande *MPPT* classique pour :

- Générer le rapport cyclique optimal (pour l'hacheur *DC-DC*)
- Déterminer la vitesse de référence (pour la commande du *MAS*)

C'est donc une solution prometteuse pour rendre les systèmes de pompage photovoltaïques plus intelligents, autonomes et adaptatifs aux variations de l'environnement.

Conclusion Générale

Ce travail de recherche a permis d'explorer et de valider une approche innovante de commande intelligente pour les systèmes de pompage photovoltaïque basés sur des moteurs asynchrones. Les résultats obtenus démontrent clairement la supériorité de la méthode proposée, combinant réseaux de neurones artificiels et commande à flux orienté, par rapport aux techniques conventionnelles de poursuite du point de puissance maximale.

Les simulations ont révélé que l'architecture intelligente de *RNA* proposé permet d'atteindre des performances remarquables à plusieurs niveaux. D'une part, elle offre une extraction optimale de l'énergie solaire grâce à la génération automatique du rapport cyclique du hacheur. D'autre part, elle assure un réglage précis de la vitesse de référence du moteur, éliminant ainsi les approximations liées aux méthodes empiriques. Le système présente en outre une robustesse accrue face aux variations d'ensoleillement, avec un temps de réponse amélioré et des oscillations réduites autour du point de fonctionnement optimal.

Sur le plan énergétique, la solution proposée permet des gains significatifs en termes d'efficacité de conversion, avec une réduction notable des pertes de puissance. La suppression de l'étage *DC-DC* dans certaines configurations contribue également à simplifier l'architecture globale tout en améliorant le rendement du système. Ces avancées techniques ouvrent des perspectives intéressantes pour le déploiement de systèmes de pompage plus performants dans les zones isolées.

Les perspectives de ce travail s'articulent autour de plusieurs axes prometteurs. Premièrement, l'extension de l'approche à d'autres types de machines électriques, comme les moteurs synchrones à aimants permanents, pourrait permettre d'atteindre des rendements encore plus élevés. Deuxièmement, l'intégration de techniques d'apprentissage en ligne permettrait au système de s'adapter en temps réel au vieillissement des composants et aux changements saisonniers. Troisièmement, la combinaison avec des algorithmes prédictifs basés sur les prévisions météorologiques pourrait optimiser le stockage et la gestion de l'énergie. Enfin, la mise en œuvre matérielle sur plateforme embarquée low-cost constituerait une étape cruciale vers la valorisation industrielle de ces travaux.

Ces développements futurs pourraient considérablement améliorer l'accès à l'eau dans les régions reculées, tout en contribuant à la transition énergétique par une utilisation plus efficace des ressources solaires. La méthodologie proposée pourrait également trouver des applications dans d'autres domaines des énergies renouvelables, confirmant ainsi le potentiel des techniques d'intelligence artificielle pour optimiser les systèmes énergétiques distribués.

Annexe

Paramètres du Système de Pompage Photovoltaïque

- **Paramètres du *GPV*** (Ablyte 5MN6C180-A0) :

$$I_{CC}=5.31 \text{ A} ; I_{OP}=4.9 \text{ A} ; V_{C0}=44.06 \text{ V} ; V_{OP}=36.72 \text{ V} ; R_S=0.367 \text{ } \Omega ; R_p=227.068 \text{ } \Omega$$

$$E_{ref}=1000 \text{ W/m}^2 ; T_{ref}=25^\circ \text{C}.$$

$$N_S=16 ; N_P=3.$$

- **Paramètres du *MAS*** [33] :

$$P_n=7500 \text{ W} ; \omega =306 \text{ rad/s} ; U_{sn}=415 \text{ V} ; I_{sn}=14.5 \text{ A}.$$

$$R_s=0.7384 \text{ } \Omega ; R_r=0.7043 \text{ } \Omega ; L_s=0.1271 \text{ H} ; L_r= 0.1271 \text{ H} ; M=0.1241 \text{ H} ;$$

$$J=0.0343 \text{ kg.m}^2 ; P=1 ; f=50 \text{ Hz}.$$

- **Paramètres de la pompe centrifuge**

La puissance nominale de la pompe est de 7200 W, et sa vitesse nominale est de 306 rad/s ; d'où la constante $A=2.5.10^{-4}$.

Bibliographies

- [1] : Meghellet, H. & Hocine, L. « *Contribution À L'étude D'un Système Photovoltaïque* » Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira (2018).
- [2] : H. Mahamat, (2012). « Contribution à l'étude d'extension du réseau hydraulique par pompage solaire : cas de la ville d'Abéché au Tchad », Mémoire de Master, Université de Yaoundé I, Cameroun.
- [3] : <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>
- [4] : M. Orgeret, Les piles Solaires, Masson, 1985.
- [5] : Hacini, M. & Naili, I. « Etude Et Commande D'un Système Solaire Photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah – Ouergla, (2022).
- [6] : Helali, K. « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative » Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou (2012).
- [7] : M. Mohand Ousaid Abdenbi et M. Zidani Zakaria « Optimisation d'un générateur photovoltaïque par réseaux de neurones artificiels – Application au pompage photovoltaïque » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique-Ecole Nationale Polytechnique, (2008).
- [8] : K. M. Della, A. Midoun, S. Feknous.(2000) « La Poursuite du Point Optimum de Fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque en utilisant les Réseaux de Neurones », International Conference on Electrotechnics, ICEL'2000, pp. 369-372, November 13-15, U.S.T.Oran"M.B", Algeria.
- [9] : Y. Djaghoul & M.S. Derradji, (2022). « Étude d'un système de pompage photovoltaïque », Université Mohamed Boudiaf – M'sila.
- [10] : <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [11] : G. Bel Hadj Ali, (2014). « Installations photovoltaïques raccordées au réseau », Tunis
- [12] : Obeidi Née Tchoketch Kebir, G. (2020) « Contribution À La Commande Et À L'optimisation De L'énergie Dans Un Système Photovoltaïque » Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique - Alger.
- [13] : Kerfouh, K. & Guendouz, N. & Ghaitaoui, T. & Ouled, A. (2021) « Commande Non Linéaire D'un Système De Pompage Photovoltaïque Installé Dans Un Site Saharien » Mémoire de Master, Université Ahmed Draia - Adrar.
- [14] : <https://www.ecosolaire.com/2017/10/10/pompage-solaire/>
- [15] : Sahour Dounia, G. (2021). « Etude Et Modélisation D'un Panneau Photovoltaïque » Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 - Guelma.
- [16] : Hacini, M. & Naili, I. (2022) « Etude Et Commande D'un Système Solaire Photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouergla.
- [17] : <https://www.ecosolaire.com/2017/10/10/pompage-solaire/>
- [18] : Mehdi, O. (2017). « Analyse , conception Et Optimisation Des Systèmes De Commande Relative Aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba.
- [19] : S. Souheyb et M. Belhadj, (2019) « Étude et réalisation d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de fin d'études, École Supérieure de Technologie de Tlemcen, Algérie.

- [20] : Azouagh, L. & Zidi, D. & Dahmani, M. (2013). « Etude D'un Système De Pompage Photovoltaïque », Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou.
- [21] : B. Mouedden et M. Haddouchi,(, 2024). « Conception et simulation de la commande MPPT dans le cas d'un hacheur Boost et Z-Source », Mémoire de Master, Université Ain Temouchent-Belhadj Bouchaib], Département d'Electronique et des Télécommunications, Algérie.
- [22] : Meflah, A. (2011). « Modélisation Et Commande D'une Chaîne De Pompage Photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen.
- [23] : H. Barka, B. Mekkaoui et A. Rahmani,(2022) « Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib – Aïn Témouchent, Département de Génie Électrique, Algérie.
- [24] : <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/aerovoltaique/panneau-solaire-hybride>
- [25] : D. Louifi et R. Kechacha, (2021). « Étude et conception d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, Université de Mila, Département de Génie Électrique, Algérie.
- [26] : S. Feltane et S. Bouklab, (2021). « Étude et simulation d'un système photovoltaïque, Mémoire de Master, Université de Jijel, Département Électrotechnique, Algérie, 2021.
- [27] : Meflah, A. (2011). « Modélisation Et Commande D'une Chaîne De Pompage Photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen.
- [28] : A. Benatallah et K. Said, (2020). « Modélisation et commande d'un système de pompage à l'aide de techniques d'intelligence artificielle, Mémoire de Master, Université de Médéa, Département de Génie Électrique, Algérie.
- [29] : K. Benlarbi, (2001). « Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraîné par différentes machines électriques : MAS, MSAP et MCC », Thèse de Magistère (commande électrique), université de Batna.
- [30] : M. N. Mansouri, N. Ghanmi, and M. F. Mimouni, (2008). « Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal », Revue des énergies renouvelables, vol. 11, no. 1, pp. 1–17, 2008.
- [31] : M. Bouzegane, F. Gaouaoui, (2018). « Alimentation d'un moteur à courant continu par A une source photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.
- [32] : S. Feltane et S. Bouklab, (2021). « Étude et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Jijel, Département Électrotechnique.
- [33] : S. Shukla et B.Singh, (2018). « Single Stage PV Array Fed Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Drive for Water Pumping», IEEE Transactions on Industry Applications.
- [34] : O.A. Mekkaoui et A. M. Mamem, (2021). « Étude comparative des différentes commandes MPPT d'un hacheur Boost alimenté par un panneau photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, Département de Génie Électrique et Électronique (GEE), Algérie.
- [35] : E. Lorenz et al: « Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems. », report of the Universidad Politécnica de Madrid., 2000.

- [36] : Akihiro OI, (2005). « Design and simulation of photovoltaic water pumping system», Master Thesis California Polytechnic State University.
- [37] : M.D. Boudehouche, M. Ouennoughi, (2016) « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire de Master, Université Abderahmane Mira de Bejaïa.
- [38] : Belkaid Abdelhakim, (2018). « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif.
- [39] : Litim Ahlam et Abid Zouleykha, (2017). « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Fin d'Etudes.
- [40] : Tati Fethallah et Ben Lamoudi Oussama, (2018). « Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue », Mémoire master académique, université Kasdi Merbah Ouargla.
- [41] : G. Séguier et R. Bausière, « les convertisseurs de l'électronique de puissance », la conversion continu-alternatif Tome 4, deuxième édition, Lavoisier Tec II doc.
- [42] : F. Labrique et G. Séguier, (1995) « La conversion Continu-Alternatif », Technique et Documentation, Paris.
- [43] : Benbrahim Amel, (2009). « Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse de Magistère à université de Batna.
- [44] : Mohand Ousaid, A. & Ziadi, Z. (2008). « Optimisation D'un Générateur Photovoltaïques Par Réseaux De Neurones Artificiels : Application Au Pompage Photovoltaïques », École Nationale Polytechnique - Alger.
- [45] : G.B. Gardon F. Bardran S. thiria et L. Herault, (2002). « Réseaux de Neurones Méthodologie et Application », Eyrolles, 2ème édition, Marsat, France.
- [46] : F. Sorin L. Broussard et P. Roblin. « Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones », Technique de l'ingénieur, S7582.