

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie



Département d'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTRO-TECHNIQUE
INDUSTRIELLE

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

L'influence de l'ombrage partielle sur le système de pompage photovoltaïque

Présenté par :
BOURI BILLEL
KHORSI HICHEM

Devant le jury composé de :
Dr. YUCEF ABDELAZIZ
Pr. MILOUDI ABDELLAH
Pr. MILOUD YAHIA

Présidente
Examineur
Encadreur

Soutenu le : octobre /10/ 2021
Promotion 2020-2021

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné la vie et le courage pour terminer nos études. Nous réservons une pensée et toute particulière à nos chers parents qui nous ont toujours soutenus et guidés tout au long de nos études. Qu'ils trouvent ici, le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Nos remerciements les plus particuliers vont à notre encadreur Monsieur Pr. Miloud YAHIA pour son rôle majeur dans l'élaboration de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions pertinentes, qu'elle trouve ici notre vif témoignage de reconnaissance pour son rôle important dans l'amélioration de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, Nous tenons à remercier les membres du jury Pr.A.MILOUDI ,Dr.A.YOUCHEF qui ont accepté de juger notre travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les
protège pour leurs soutien moral et financier, pour
leurs encouragements et les sacrifices qu'ils
ontendurés.*

A

mesfrèr

es kada

imed,

A toutes familles bouriet chers

mes amis

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

Atousmescollèguesd'études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les
protège pour leurs soutien moral et financier, pour
leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont
endurés.*

*A mes
frères
madjid
amine,*

*A toutes familles khorsi et chers
mes amis*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment
A tous mes collègues d'études.*

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : le système photovoltaïque	
1.1. Introduction	4
1.2. Définition de photovoltaïque.....	4
1.3. Historique de la photovoltaïque.....	4
1.4 Cellules photovoltaïques.....	6
1.4.1. Structure de la cellule photovoltaïque.....	6
1.4.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	7
1.5. Les différentes générations des cellules solaires.....	7
1.5.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly)	8
1.5.1.1. Les cellules monocristallines	8
1.5.1.2. Les cellules poly cristallines	8
1.5.2. Deuxième génération (couches minces "thin films").....	9
1.5.2.1. Les cellule au Telluride de Cadmium(CdTe)	9
1.5.2.2. Les cellule au silicium amorphe (a-Si)	9
1.5.3. Troisième génération :(Pérovskites, multi jonction, concentration).....	10
1.5.3.1. Les Cellules Pérovskites.....	10
1.5.3.2. Les Cellules multi-jonction	10
1.5.3.3. Les Cellules à concentration.....	11
1.6. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques	11
1.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	12
1.8. Module photovoltaïque.....	13
1.9. Association des modules photovoltaïques.....	14
1.9.1. Association en série.....	14
1.9.2 Association en parallèle.....	14
1.10. Les caractéristiques électriques de modules	15
1.11. Générateur photovoltaïque.....	17

1.12. Simulation d'une cellule photovoltaïque.....	17
1.12.1. Modèle de simulation.....	17
1.12.2-Effets de l'irradiation et de la température	18
1.12.2.1. Influence de l'irradiation.....	18
1.12.2.2. Influence de la température	19
1.13. Avantages et inconvénients PV.....	19
1.14. Conclusion.....	20

Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).

2.1. Introduction.....	22
2.2. Convertisseur DC-DC.....	22
2.2.1. Hacheur élévateur (Boost).....	23
2.2.1.1 .Principe de Fonctionnement	23
2.2.1.2 .Les paramètres d'élévateur.....	25
2.3. Le point de puissance maximum (MPP).....	26
2.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	27
2.5. Les Techniques MPPT.....	28
2.5.1. La Technique Perturbation et Observation.....	28
2.6. Simulation et interprétation.....	30
2.7. Conclusion.....	34

Chapitre 03 : Modélisation et simulation de l'onduleur deux niveaux.

3.1. Introduction.....	37
3.2. Principe de l'onduleur de tension triphasé.....	38
3.3. Modulation de largeur d'impulsion.....	38
3.3.1. Techniques de la commande à MLI.....	39
3.3.1.1 Modulation sinus – triangle.....	39
3.3.1.1.2. Caractéristique de la modulation.....	39
3.3.2. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI triangulo – sinusoidal.....	40
3.3.2.1. Equations de la porteuse	40
3.3.2.2. Equations des tensions triphasées de référence.....	41
3.3.2.3 Tensions de sortie de phase de l'onduleur.....	41

3.4. Conclusion.....	44
----------------------	----

Chapitre 04 : Dimensionnement de l'installation de pompage.

4.1 Introduction.....	47
4.2. Ombrage.....	47
4.2.1 Les différents types d'ombrages.....	47
4.3. Les pompes centrifuges.....	48
4.3.1 Le principe de fonctionnement.....	48
a) L'aspiration.....	48
b) L'accélération.....	48
4.3.2. Avantages et inconvénients.....	48
4.4. <i>Modélisation de la pompe centrifuge</i>	48
4.4.1. <i>Puissance Hydraulique</i>	49
4.5. <i>Dimensionnement de l'installation de pompage</i>	49
4.5.1. La puissance crête du générateur photovoltaïque	51
4.5.2. Le nombre de modules photovoltaïques.....	51
4.6. Structure générale de la simulation.....	51
4.7. Résultats de simulation.....	52
4.8. Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Annexes.....	61
Référence bibliographie.....	74

RESUME

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications telles que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès à l'eau potable d'une part et d'autre part l'indisponibilité du réseau électrique. La solution idéale pour ces sites isolés est d'installer des générateurs photovoltaïques pour subvenir à leur besoin.

Pour qu'un générateur photovoltaïque soit plus performant en terme de puissance, une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge est indispensable.

Dans ce travail, cette adaptation est constituée d'un MPPT à base de P&O pour extraire le maximum de puissance. Le hacheur boost est utilisé pour transférer cette puissance au reste du système. Ce dernier est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir : les panneaux photovoltaïques, le hacheur boost, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge. Le système de pompage a été simulé et les relevées du débit ainsi que la puissance hydraulique ont été effectués pour une irradiance maximale (1000W/m^2) et ensuite en tenant compte de l'ombrage total afin de voir l'effet sur ce débit et la puissance hydraulique. Les résultats obtenus s'accordent parfaitement avec la théorie soit coté pompe, onduleur, hacheur boost et générateur photovoltaïque.

Mots-clés : Panneaux photovoltaïques, Energie solaire, Maximum Power Point Tracking(MPPT), Pompe centrifuge.

المخلص

استخدام الطاقة الشمسية في المواقع المعزولة لتطبيقات مختلفة مثل ضخ المياه. أن ضخ المياه يمثل أهمية أساسية لسكان البلدان النامية التنمية التي لا تصلها مياه الشرب من جهة وعدم توفر شبكة الكهرباء من جهة أخرى. الحل الأمثل لهذه المواقع المعزولة هو تركيب مولدات كهروضوئية لتلبية احتياجاتهم. لكي يكون المولد الكهروضوئي أكثر كفاءة من حيث الطاقة، فإن التكيف المناسب بين المولد الشمسي والحمل أمر ضروري.

لاستخراج الطاقة القصوى. تستخدم قطاعة التعزيز لنقل P&O القائم على MPPT في هذا العمل، يتكون هذا التكيف من هذه القوة إلى باقي النظام. يتكون الأخير من مجموعة من العناصر المتفاعلة؛ النوهي: الألواح الكهروضوئية، ومروحية التعزيز، وعاكس الجهد، والمحرك غير المتزامن ومضخة الطرد المركزي. تمت محاكاة نظام الضخ وتم إجراء قراءات التدفق وكذلك القدرة الهيدروليكية لأقصى إشعاع (1000 واط / م²) ثم أخذ التظليل الكلي في الاعتبار لمعرفة التأثير على هذا التدفق والقوة الهيدروليكية. النتائج التي تم الحصول عليها تتفق تماما مع النظرية الخاصة بالمضخة، العاكس، قاطع التعزيز، جانب المولد الكهروضوئي.

Abstract

The use of solar energy in isolated sites for different applications such as that pumping water is of primary interest to the population of developing countries development that does not have access to drinking water on the one hand and on the other hand the unavailability of the electricity network. The ideal solution for these isolated sites is to install photovoltaic generators to meet their needs.

For a photovoltaic generator to be more efficient in terms of power, an adequate adaptation between the solar generator and the load is essential.

In this work, this adaptation consists of a P&O based MPPT to extract the maximum power. The boost chopper is used to transfer this power to the rest of the system. The latter is made up of a set of interacting elements; namely: the photovoltaic panels, the boost chopper, the voltage inverter, the asynchronous motor and the centrifugal pump. The pumping system was simulated and the readings of the flow as well as the hydraulic power were carried out for a maximum irradiance (1000W / m²) and then taking into account the total shading in order to see the effect on this flow and the hydraulic power. The results obtained agree perfectly with the theory on the pump, inverter, boost chopper and photovoltaic generator side.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : le système photovoltaïque.

Fig.(1.1) : Cellule photovoltaïque.....	6
Fig. (1.2) : La structure de la cellule photovoltaïque.....	7
Fig. (1.3) : Principe de fonctionnement de cellule.....	7
Fig. (1.4) : Cellule monocristalline.....	8
Fig. (1.5) : Cellule poly cristalline.....	8
Fig. (1.6) : Cellule au Telluride de Cadmium.....	9
Fig. (1.7) : Cellule au silicium amorphe.....	9
Fig. (1.8) : Cellule Pérovskites.....	10
Fig. (1.9) : Cellule multi jonction.....	10
Fig. 1.10. Cellule à concentration.....	11
Fig. 1.11. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	12
Fig. 1.12. Modules photovoltaïques.....	13
Fig. 1.13. Association série deux modules solaires.....	14
Fig. 1.14 : Caractéristiques IV des modules en série aux conditions.....	14
Fig. 1.15. Association parallèle deux modules solaires.....	14
Fig.1.16. Caractéristiques IV des modules en parallèle aux conditions standards.....	14
Fig. 1.17. Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.....	15
Fig. 1.18. Champ photovoltaïque.....	16
Fig. 1.19. Modèle de simulation d'un générateur PV.....	17
Fig. 1.20 Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du générateur en fonction de	

l'irradiation ($T = 25^{\circ} \text{C}$).....	18
Fig. 1.21. Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du générateur en fonction de la température.....	19
Chapitre 2 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).	
Fig. 2.1. Circuit électrique de base du hacheur élévateur.....	22
Fig. 2.2. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour s_{on}	22
Fig. 2.3. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour s_{off}	23
Fig. 2.4. Tension d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.....	25
Fig. 2.5. Schéma fonctionnel à conversion photovoltaïque.....	26
Fig. 2.6. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	26
Fig. 2.7 Organigramme de l'algorithme perturbé et observé	28
Fig. 2.8. Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation	29
Fig.2.9. Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT..	30
Fig. 2.10. Les points de puissance maximale simulés par (P & O).....	30
Fig. 2.11. Puissance du générateur photovoltaïque obtenue par la technique (P& O).....	331
Fig.2.12. La variation d'irradiation.....	32
Fig.2.13. L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.....	32
Fig. 2.14. La variation de température ($^{\circ}\text{C}$).....	33
Fig. 2.15. L'évolution de la puissance PV pour une température variable.....	33
Chapitre 03 : Modélisation et simulation de l'onduleur deux niveaux.	
Figure 3.1 Structure générale de l'onduleur triphasé.....	37
Figure 3.2 M.L.I. sinus-triangle.....	38
Figure 3.3 Onduleur triphasé simplifié.....	40

Figure 3.4 Modèle MATLAB/ SIMULINK de l'onduleur à commande MLI sinus-triangle.....	42
Figure 3.5.Allure de la tension de ligne V_a	43
Figure 3.6.Allure de la tension de phase V_{an}	43

Chapitre 04 :Dimensionnement de l'installation de pompage

Figure 4.1 :(a) Pompe centrifuge accouplée MAS, (b) coupe longitudinale pompe centrifuge5.....	48
Figure 4.2 : structure générale de la simulation du système de pompage photovoltaïque.....	51
Figure 4.3.Allure de P_{pv} sans changement d'éclairement.....	52
Figure 4.4. Allure de V_{pv} sans changement d'éclairement.....	52
Figure 4.5.Allure de I_{pv} sans changement d'éclairement.....	53
Figure 4.6. Allure de P_{pv} avec changement d'éclairement.....	53
Figure 4.7. Allure de V_{pv} avec changement d'éclairement.....	54
Figure 4.8. Allure de I_{pv} avec changement d'éclairement.....	54
Figure 4.9.Allure de Tension continu V_{dc} sans changement d'éclairement.....	55
Figure 4.10. Allure de V_{dc} avec changement d'éclairement.....	55
Figure 4.11.Allure de la Vitesse sans changement d'irradiation	56
Figure 4.12.Allure de la Vitesse avec changement d'irradiation.....	56
Figure 4.13. Allure de débit de la pompe sans changement d'irradiation.....	56
Figure 4.14.Allure de débit de la pompe avec changement d'irradiation.....	57
Figure 4.15.Allure de La puissance hydraulique sanschangement d'irradiation.....	57
Figure 4.16.Allure de La puissance hydraulique avec changement d'irradiation.....	58
Figure 4.17.Allure de la HMT en fonction du temps sans changement d'irradiation.....	58
Figure 4.18.Allure de la HMT en fonction du tempsavec changement d'irradiation.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01 : le système photovoltaïque

Tableau 1.1. Rendement des différentes technologies.....	11
Tableau .1.2. Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m ²	17

Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).

Tableau 2.1. Valeurs de calcul du convertisseur élévateur(Boost).....	25
Tableau 2.2. Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m ²	29

Chapitre 03 : Modélisation et simulation de l'onduleur deux niveaux.

Tableau 3.1.Paramètres Caractéristiques du moteur asynchrone.....	43
---	----

Chapitre 04 : Dimensionnement de l'installation de pompage.

Tableau (4.1) : Irradiations mensuelles de la wilaya de Saida	49
Les tableaux montrent les résultats obtenus a)avant et b) après MPPT	51
Tableau 4.2 Variation du rapport cyclique α en fonction d'irradiante.....	55
Le tableau4.3.Résume la réponse des paramètres de la pompe selon le niveau de l'éclairement	59

NOTATIONS & SYMBOLES

P_m : Puissance maximal.

I_m : *courant maximal*.

V_m : Tension maximal.

FF : Factor de suffisance.

V_{cc} : tension court-circuit.

V_{oc} : circuit-ouvert.

R : Le rendement d'un module solaire.

G : ensoleillement en W/m^2 .

A : la surface génératrice en m^2 .

V_L : tension de la bobine en (V).

V_E : Tension d'entrée en (V).

V_S : Tension de sortie en (V).

I_L : Courant d'entrée en (A).

I_D : Le courant de la bobine (V).

I_T : le courant dans le transistor (V).

I_D : le courant dans la diode (V).

L : Inducteur (mH).

D : le rapport cyclique.

F : Fréquence de commutation en (kHz).

C : Condensateur en (μF).

R : Résistance (Ω).

m : l'indice de modulation.

r : le taux de modulation.

f_p : fréquences de la modulation (Porteuse)

f_r : Fréquences de la référence (modulante).

A_m : Amplitude de la tension de référence

A_p : Amplitude de la porteuse

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine

C_e : Couple électromagnétique (N.m).

C_r : Couple de résistant (couple de charge).

Ω_r : Vitesse rotorique de moteur (rad/s).

F : Fréquences de rotation.

K : Constant Boltzmann ($8.65.10^{-5}$ (eV/ 0K) = ($1.38.10^{-23}$ (J/0K)).

ω_s : $d\theta_s/dt$ la vitesse angulaire des axes d_q dans le repère statorique.

$\omega_r: \frac{d\theta_r}{dt}$ la vitesse angulaire des axes d_q dans le repère rotorique.

V_{ds} ; V_{qs} : les tensions statoriques .

a_0 ; a_1 ; a_2 sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

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

P_{Δ} : est la somme de pertes linéaires et singulières.

P_n : Puissance nominale de moteur (W).

η_{mp} : Rendement de groupe motopompe (%).

P_{elec} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W).

ρ : Masse volumique de l'eau (Kg/m³).

g : L'accélération de pesanteur soit 9,81 (m/s²).

Q : Débit volumique (m³/s).

Ω_n : Vitesse nominale de moteur (rad/s).

K_r : un coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s-1).

c_h : constant hydrolrique.

ρ : Masse volumique de l'eau kg/m³.

T_{pom} : Le temps de pompage pendant une journée.

V_{res} : *volumereservoir*.

E_{elec} : L'énergie électrique.

Les abréviations

HMT : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

MAS : Machine asynchrone.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

PPM : Point de Puissance Maximale

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. En effet, La consommation de ces sources possède des conséquences néfastes sur l'environnement. Par exemple l'émission de gaz à effet de serre provoquant l'augmentation de la pollution et des perturbations climatiques. Ainsi, la production électrique à partir des combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂.

Par opposition, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles ; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et l'une des plus exploitables. Elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée dans l'Algérie en raison de l'existence d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond, et elle dispose un gisement solaire le plus élevé au monde telle que la durée d'ensoleillement peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara et la moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m². Le pompage photovoltaïque est en développement et caractérisé par un coût graduellement en baisse. Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Les moteurs des pompes solaires de petite puissance (petite HMT et faible débit journalier) sont généralement en courant continu. Cependant, ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompes solaires à cause de la

diminution du coût de l'onduleur, sa simplicité, sa robustesse et son faible coût.

L'objectif de notre étude des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge qui aspire l'eau d'un puits et le refoule (stockage) dans un réservoir.

Nous avons structuré notre travail en 4 chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu théorique le système photovoltaïque où l'on présentera un modèle de la cellule photovoltaïque. Les influences des différents paramètres électriques et climatiques sur le comportement du générateur PV, y sont présentes.

Le second chapitre donne un aperçu sur, le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O).

Dans le troisième chapitre, nous présentons une Modélisation et simulation de l'onduleur deux niveaux

Dans le quatrième chapitre, le système de pompage photovoltaïque est étudié ensuite suivi par des simulations extensives.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et une proposition comme perspective pour la continuité de ce travail.

Chapitre 1 :

Le système photovoltaïque

1.1. Introduction :

La nouvelle technologie énergétique est l'un des cinq domaines du développement économique mondial qui a la force la plus décisive du 21ème siècle. L'énergie solaire est une nouvelle énergie propre, efficace et durable. Dans la nouvelle réalité, les gouvernements utiliseront les ressources en énergie solaire en tant que stratégie nationale de développement durable. La génération d'énergie photovoltaïque est sûre et fiable, sans bruit, sans pollution, moins contrainte, avec un taux de défaillance faible, un entretien facile, etc...

L'électricité peut être obtenue à partir de l'énergie photovoltaïque sans recourir à des combustibles fossiles (charbon, pétrole ou gaz naturel) ou à des réactions de fission nucléaire, et éviter la plupart des menaces associées aux techniques actuelles de production d'électricité [1].

On rappelle dans ce chapitre l'histoire de photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule PV et également ses trois générations d'évolutions technologiques. Ensuite, on décrit la modélisation de la cellule. Enfin, on présente les caractéristiques du générateur photovoltaïque en différentes conditions atmosphériques.

1.2. Définition de photovoltaïque

Le mot «photovoltaïque» se compose de deux mots : photo, un mot grec pour lumière, et voltaïque, qui définit la valeur de mesure par laquelle l'activité du champ électrique est exprimée, c'est-à-dire la différence de potentiel. Donc, la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil [2,3].

1.3. Historique de la photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (PV), a été découvert en 1839 par un physicien français, Alexandre Edmond Becquerel (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtint une tension électrique [4].

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts, mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation [5].

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la seconde guerre mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites [2].

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point [6].

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware [1].

Ainsi, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie [1].

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

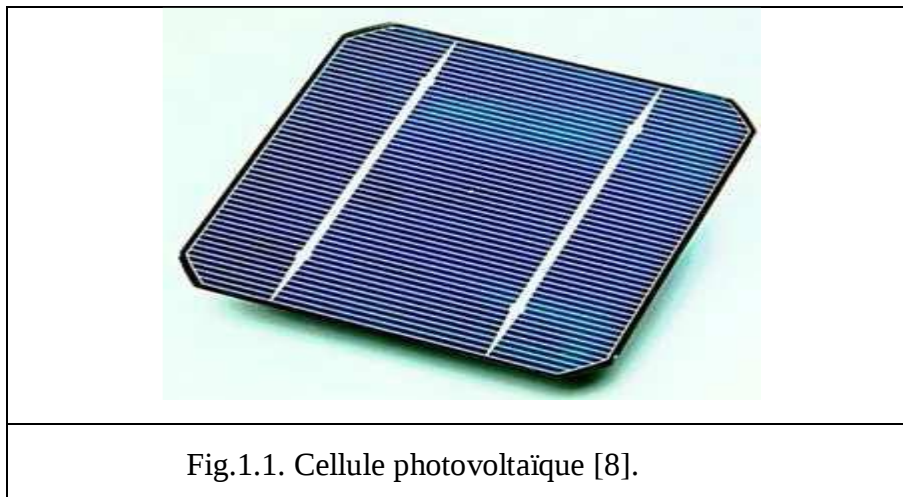
En 2002, le total des installations photovoltaïques installées dans le monde atteint 2 000 MW. Il a fallu 25 ans pour atteindre les 1 000 premiers MW et seulement 3 ans pour le doubler ; la production de cellules de silicium cristallin dépasse 100 MW par an chez Sharp Corp. (Japon). BP Solar cesse la R et D et la production de modules à couches minces a-Si et CdTe aux États-Unis, mettant ainsi fin à plus de 20 ans d'efforts [1].

En 2012, la capacité mondiale en énergie solaire a dépassé la barrière magique de 100 GWp. Entre 1999 et 2012, la capacité photovoltaïque installée a donc augmenté. En d'autres

termes, au cours des 13 dernières années, la croissance annuelle moyenne de la capacité photovoltaïque installée a été d'environ 40%. [1].

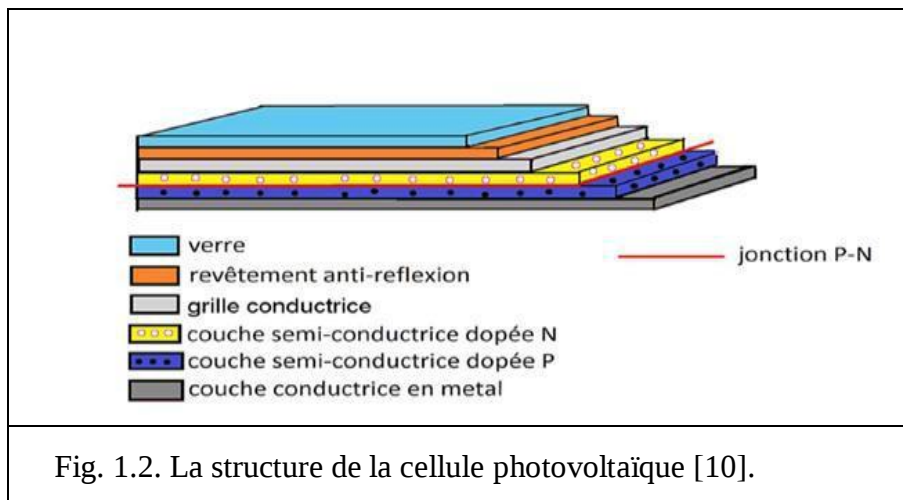
1.4. Cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [7]. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8,9].



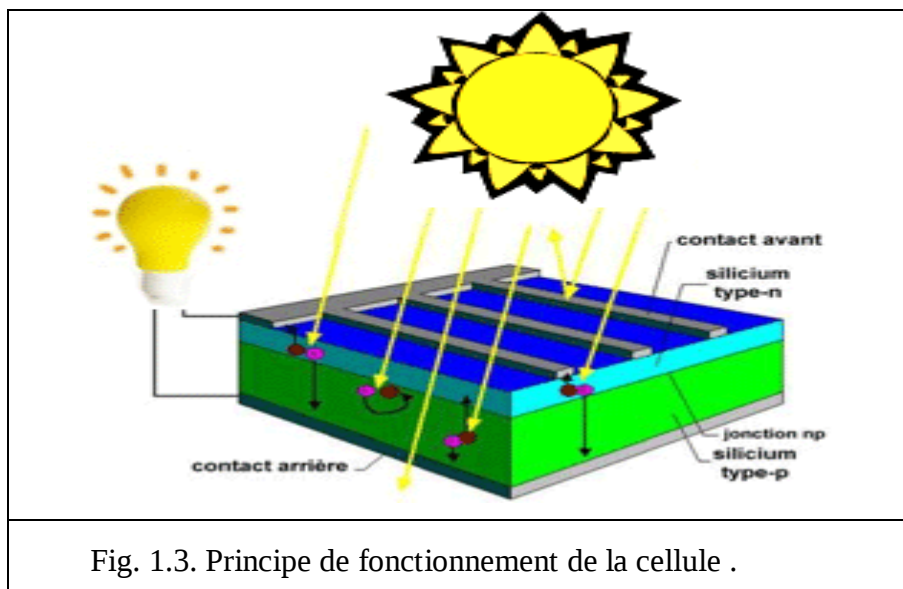
1.4.1 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négatives (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle -) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle +) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [8,10], comme le montre la figure (2.2).



1.4.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque :

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [7,10], comme le montre la figure (1.3).



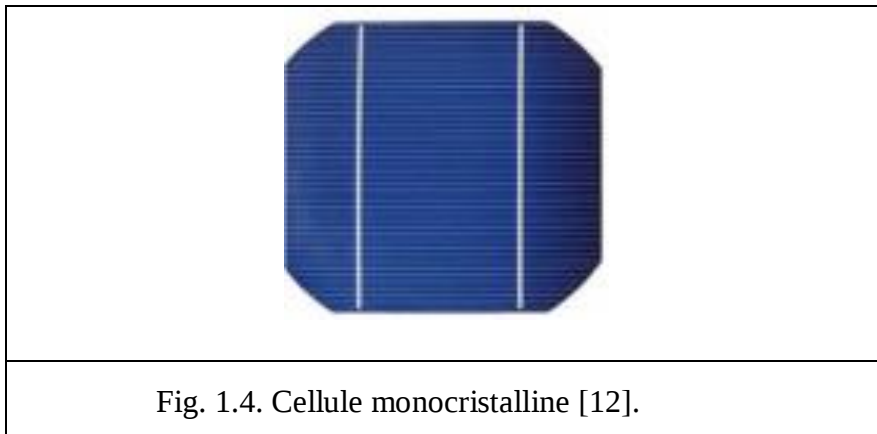
1.5. Les différentes générations des cellules solaires :

Les cellules solaires sont généralement classées en première, deuxième et troisième génération. Les cellules solaires à silicium cristallin (c-Si et mc-Si) sont acceptées en première génération, tandis que les cellules à couches minces (a-Si et CdTe) sont considérées en deuxième génération. Les cellules solaires de troisième génération sont basées sur les nanotechnologies : cellules solaires tandem, super tandem, à bande intermédiaire, etc[12].

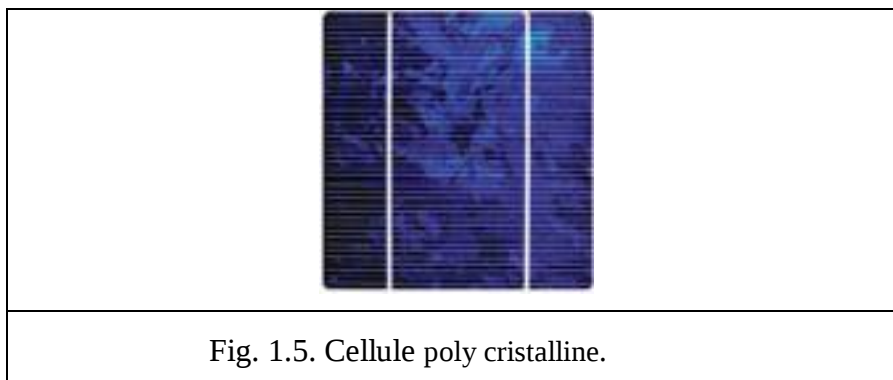
1.5.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly) :

Les cellules solaires de première génération (silicium cristallin) sont divisées en deux types : monocristallin (c-Si, SIN) et polycristallin (mc-Si, poly-Si). L'efficacité des cellules solaires monocristallines est de 15 à 18%. Le coût de ce type de cellules est de 4,5 \$ / W [12].

1.5.1.1. Les cellules monocristallines : Elles sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 16 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse [12,13]. .



1.5.1.2. Les cellules poly-cristallines : Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples et leur coût de production est moins élevée que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Durée de vie estimée 30 ans. L'efficacité des cellules solaires poly cristallines est de 12 à 15% [12,13]. .



1.5.2. Deuxième génération :(couches minces "thin films")

Les cellules solaires de deuxième génération (couches minces) sont regroupées en deux espèces: Amorphous (a-Si) et Tellurure de cadmium (CdTe) . Ces types de cellules représentent 7% du marché des cellules solaires en raison de leur faible rendement. Ces cellules structurées assez minces, dont l'épaisseur varie de 1 à 4 μm seulement, ont une efficacité de 7 à 14%. Le prix de fabrication est aussi bas que 1 \$ / W [12].

1.5.2.1. Les cellule au Telluride de Cadmium(CdTe) : L'efficacité des cellules solaires à base de tellurure de cadmium est d'environ 17%. Le prix de fabrication est nettement inférieur à celui des autres types de cellules solaires. L'Université de Californie à Riverside a utilisé deux panneaux photovoltaïques en CdTe pour produire de l'hydrogène par électrolyse en 1992. Ce système est considéré comme le premier du genre [12,13].



Fig. 1.6. Cellule au Telluride de Cadmium[12].

1.5.2.2. Les cellule au silicium amorphe (a-Si) : Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. L'efficacité des cellules solaires amorphes (a-Si) est de 8 à 10% seulement [12,13].

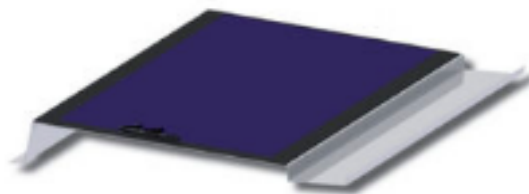
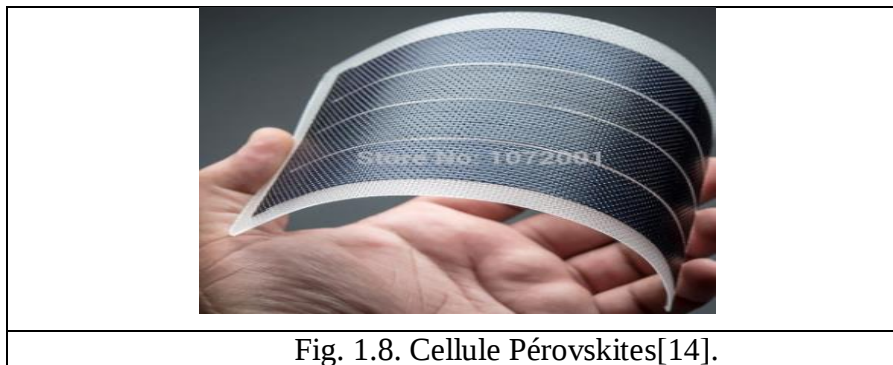


Fig. 1.7. Cellule au silicium amorphe[12].

1.5.3. Troisième génération :(Pérovskites, multijonction, concentration)

Les cellules solaires de troisième génération sont des cellules solaires basées sur la nanotechnologie (pérovskites, multi-jonction, concentration, etc.) et sont en phase de recherche et développement. Étant donné que ces types de cellules ont le potentiel d'efficacité supérieure, cela les rend très attractives et une avancée majeure est considérée si elles peuvent être fabriquées de manière rentable, [12].

1.5.3.1. Les Cellules Pérovskites : sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite. En 2016, le rendement est passé à 22,1 % ce qui en fait une alternative prometteuse ! Leur coût de production est faible. L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance aux agents extérieurs (eau, températures..) [14].



1.5.3.2. Les Cellules multi-jonction : Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces avec une base en silicium affichant un rendement de conversion de 32 % à 39 % [11,14].



1.5.3.3. Les Cellules à concentration : Le photovoltaïque à concentration est basé sur un principe simple : la lumière du soleil est concentrée plusieurs centaines de fois par un dispositif optique (miroir parabolique ou lentille de Fresnel) avant d'atteindre la cellule photovoltaïque. Et ainsi d'avoisiner des rendements cellules de l'ordre de 40%. Leur

sensibilité à la température est largement inférieure aux cellules en silicium, les rendant particulièrement efficaces en zones à fort ensoleillement [14].

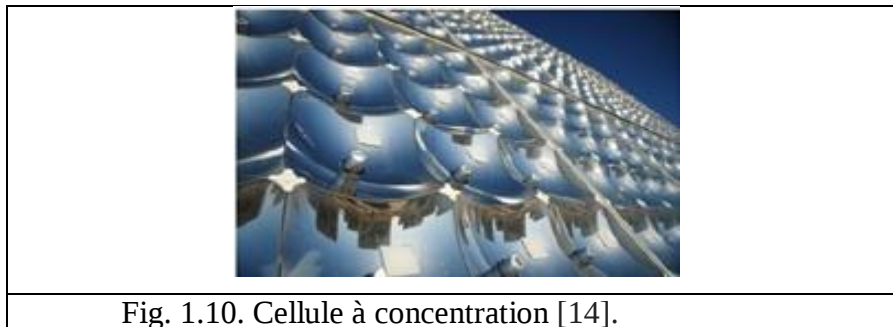


Fig. 1.10. Cellule à concentration [14].

1.6. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. [11].

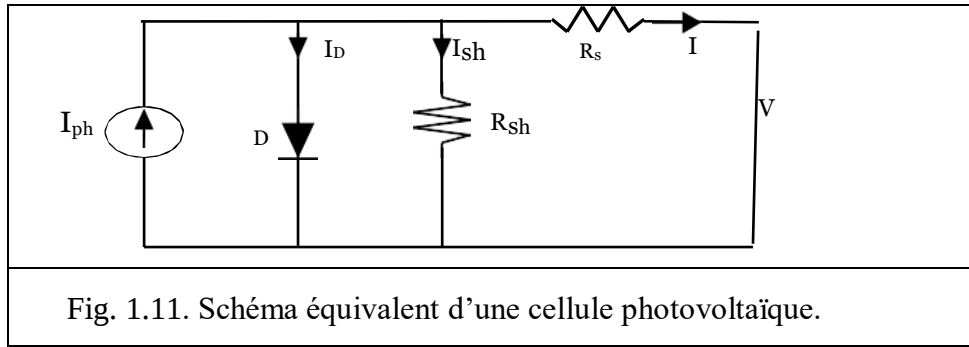
Le tableau suivant compare le rendement des différentes technologies des cellules PV.

Tableau 1.1. Rendement des différentes technologies.

Generations	Type des cellules	Rendement des cellules
Première	Siliciummonocristallines	17-20 %
	Siliciumpolycristallines	16 à 18%
Deuxième	CdTe(Tellurure de Cadmium)	15 %
	Siliciumamorphe	13,4 %
Troisième	Pérovskites	22,1 %
	Cellules à concentration	40%
	Cellules multi-jonction	32 %à 39%

1.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent de la cellule PV est illustré à la figure 1.11 Dans le diagramme ci-dessous, la cellule PV est représentée par une source de courant en parallèle avec une diode ou R_s et R_p représentent respectivement les résistances série et parallèle. Le courant et la tension de sortie de la cellule PV sont représentés par I et V [15].



Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque(I) se met sous la forme mathématique suivante [15,16] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

L'expression qui donne le courant de la diode ; il est représenté sous la forme suivante [15,16] :

$$I_d = I_o \cdot [\exp(\frac{V + R_s \cdot I}{nV_T}) - 1] \quad (1.2)$$

Où :

I_o : courant de saturation de diode.

V : tension aux bornes.

R_s : résistance en série d'un module PV,

R_{sh} : résistance shunt intrinsèque de la cellule,

V_T : tension thermique ;

n : facteur d'idéalité (1-2).

Le courant dérivé par la résistance parallèle est donc [10,17] :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

En substituant les équations (112 ; 2.3) dans l'équation (1.1), le courant I devient [10,17] :

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Où :

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (1.5)$$

q : charge d'électrons ($1.60217646 \cdot 10^{-19} \text{C}$),

K : constante de Boltzmann ($1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$),

T : condition de température de travail.

1.8. Module photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle forme un module, figure 1.12. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera [18,19].



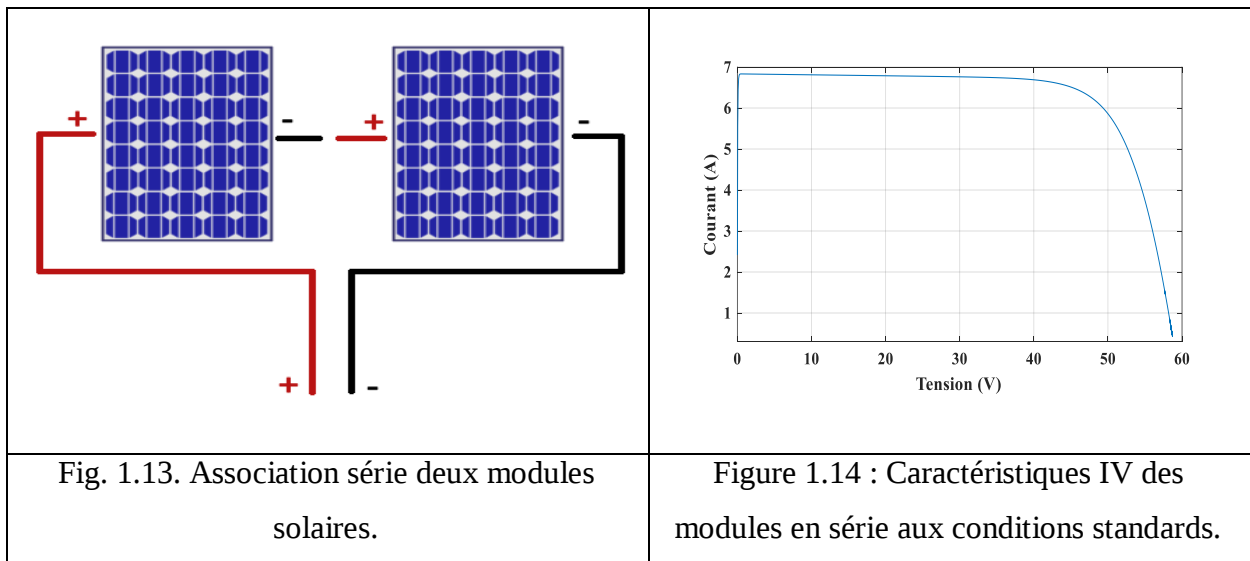
Fig. 1.12. Modules photovoltaïques

1.9. Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il est nécessaire de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'exclusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent endommager les cellules de façon permanente [7].

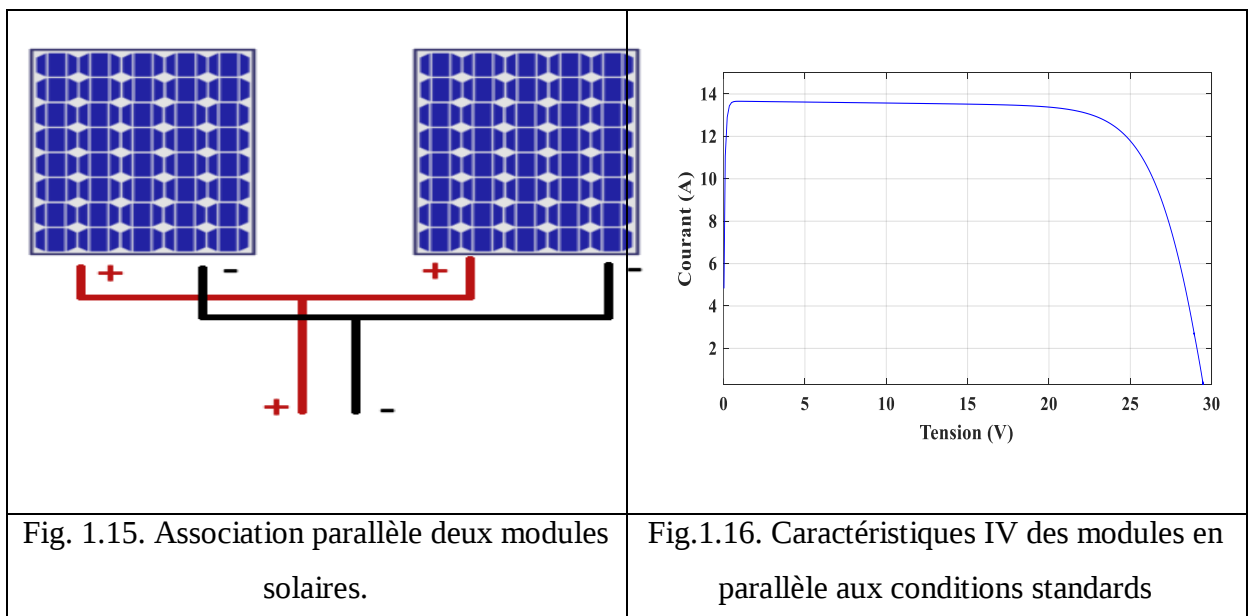
1.9.1. Association en série

L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module [18,20].



1.9.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [18,20].



1.10. Les caractéristiques électriques du module

Sous un éclairage donné, tout module photovoltaïque est caractérisé par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre le module. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [18] :

Tension de circuit ouvert (v_{co})

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant du module est nul. Il est lié à la

résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation [19].

Courant de court-circuit (i_{cc})

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes du module sont court-circuitées ($V=0$). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination du module et est relié sur la surface éclairée,[19].

Point de puissance maximale, (PPM)

Son point en anglais : maximal power point (MPP), obtenu pour une tension et un courant maximal [19] :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (1.6)$$

La figure (1.19) représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

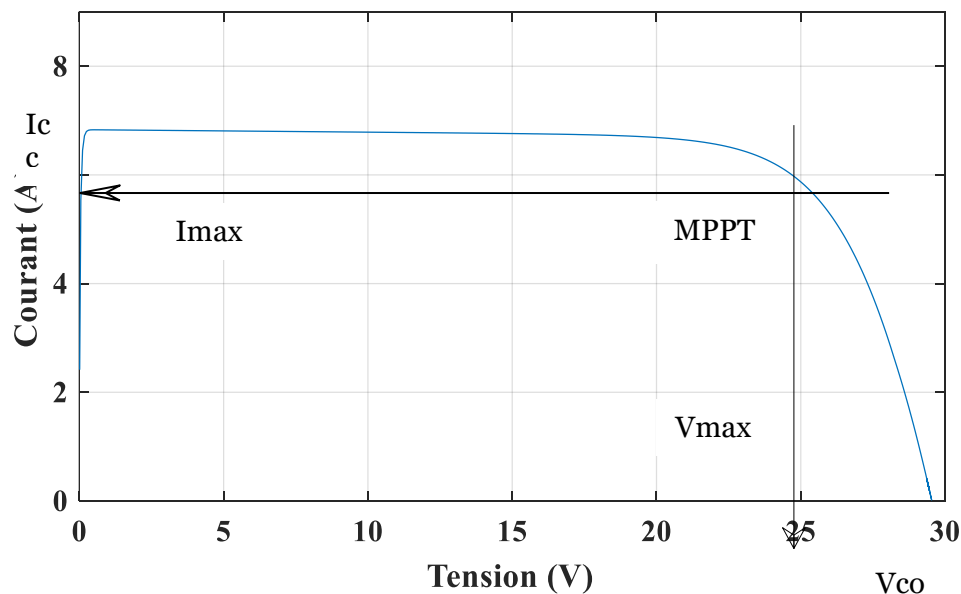


Fig. 1.17. Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.

Autres paramètres du module solaire :

Factor de suffisance, ff

Le facteur de suffisance d'un module solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances shunt dans la

cellule solaire. Pendant que le module solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter ce qui conduit à un facteur de suffisance inférieur [21].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (1.7)$$

Rendement de la cellule, η

Le rendement d'un module solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par le module à la puissance lumineuse d'incident [21].

$$\eta = \frac{P_m}{GA} \quad (1.8)$$

A est la surface génératrice en m² et G ensoleillement en W/m²

1.11. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules formés par un certain nombre de cellules photovoltaïques, connectées ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires. [21].



1.12. Simulation d'un générateur photovoltaïque :

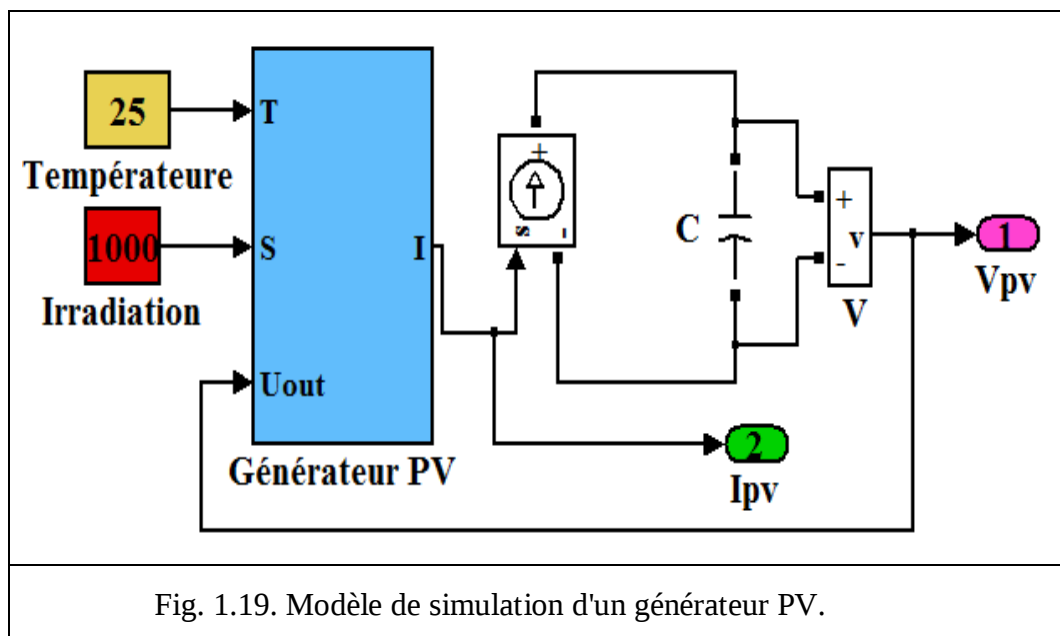
Le type de modèle PV mono-cristallin a été choisi. Il est constitué de 10 cellules d'une puissance de 190 W. Le Tableau (1.2) résume les caractéristiques de ce module PV Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

Tableau .1.2. Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards
<CST> T=25°C, G=1000W /m².

Puissance optimale	190W
Tension de circuit ouvert (V_{co})	36V
Courant de court-circuit (I_{cc})	6.7A
Tension à la puissance maximale (V_m)	30.4V
Courant à la puissance maximale (I_m)	6.25A

1.12.1. Modèle de simulation

Nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink. Le modèle comporte deux paramètres d'entrée (la température et l'ensoleillement) et deux paramètres de sortie (la tension et le courant). La figure (1.21) illustre le modèle du générateur photovoltaïque.



1.12.2-Effets de l'irradiation et de la température :

Nous allons étudier la simulation du générateur photovoltaïque qui est composé de 2 modules en parallèle et de 5 modules en série pour former un générateur PV de puissance de 1.9 Kw dans les conditions standard ($E=1000W/m^2$, $T=25^\circ c$),

L'effet des conditions météorologiques est simulé à l'aide de Matlab / Simulink. Les caractéristiques I-V et P-V pour différentes conditions d'irradiation solaire et de température sont représentées respectivement :

1.12.2.1. Influence de l'irradiation

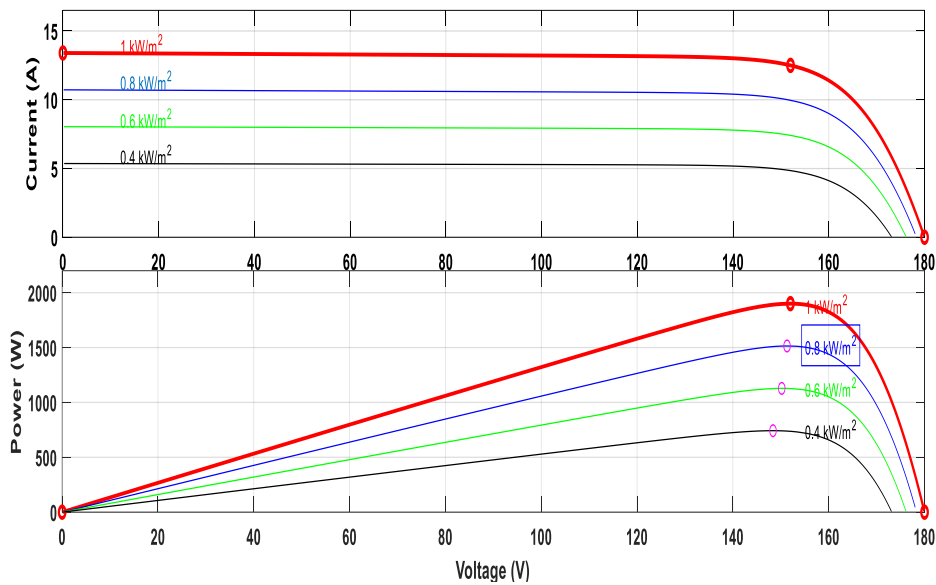


Fig. 1.20. Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du générateur en fonction de l'irradiation ($T = 25^{\circ}\text{C}$).

Le courant varie directement avec le rayonnement lumineux or la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (1.22) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

1.12.2.2. Influence de la température

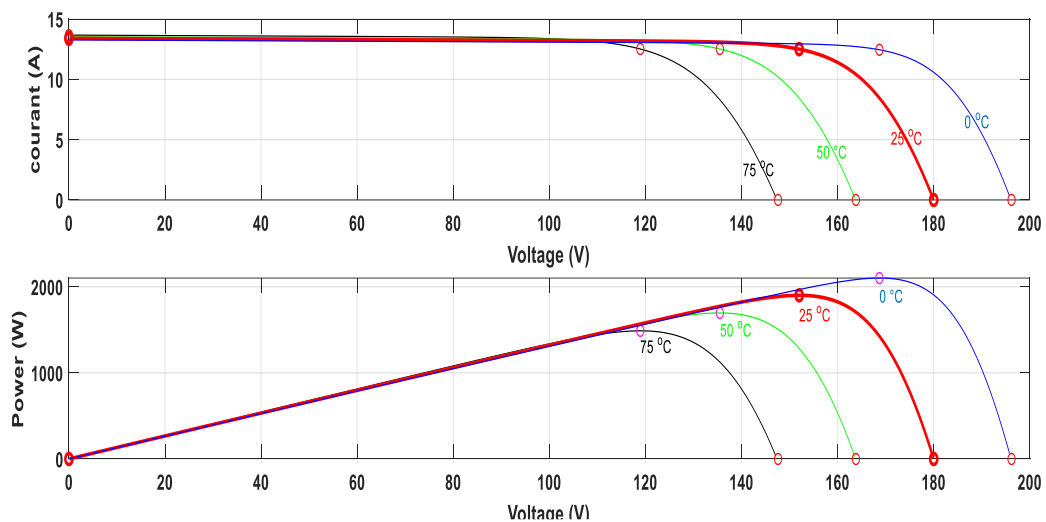


Fig. 1.21. Evolution de la caractéristique (I-V), (P-V) du générateur en fonction de la température (1000W/m^2)

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres. On remarque dans la figure (1.23) la diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi,

on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

1.13. Avantages et inconvénients PV

Les Avantages : [7,19].

- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- 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.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

Les inconvénients : [7,22]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %.
- 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 coût du générateur est accru.

1.14. Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associé à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Dans la première partie un petit rappel sur le concept et l'histoire de l'énergie photovoltaïque ainsi que le principe de la conversion photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une cellule photovoltaïque et avantages et inconvénients du système photovoltaïque.

Chapitre 2 :
**Le hacheur boost et la
technique de poursuite
MPPT
(P&O).**

2.1. Introduction :

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables.

Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPPT du générateur photovoltaïque. Les méthodes évaluées sont : Perturbé et Observé (PO), technique de conductance incrémentielle (IC) et logique floue (FLC).

Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler la méthode de poursuite du point de puissance maximale basée sur perturbe et observe (P&O) avec un convertisseur (boost). Ensuite, les résultats et discussions des simulations de la technique de poursuite seront discutées.

2.2. Convertisseur DC-DC :

Le convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit abaisseur (Buk) dans le cas contraire, il est dit élévateur (Boost). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations d'élévateur et d'abaisseur (Buck-Boost). En ce qui concerne notre travail, on considère le convertisseur élévateur "hacheur boost", [1,2].

2.2.1. Hacheur élévateur (Boost) :

Un hacheur élévateur (Boost) est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un convertisseur élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Le schéma de la figure (2.1), représente le circuit électrique de l'élévateur.

Comme le montre la figure (2.1), le convertisseur élévateur est composé de la résistance R , le transistor S et de la diode D . Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur le courant et la tension de sortie. [1, 2, 3,4].

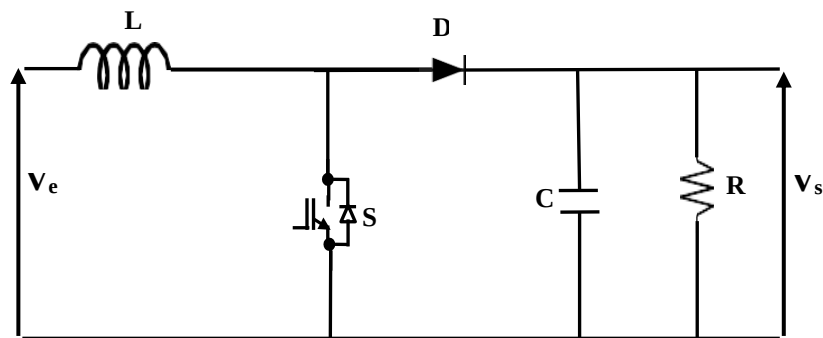


Fig. 2.1. Circuit électrique de base du hacheur élévateur.

2.2.1.1 Principe de Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases :

Phase 1 : Pour $t \in [0 \text{ à } \alpha.T]$:

Le transistor est passant et la diode D est bloquée, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Schéma équivalent :

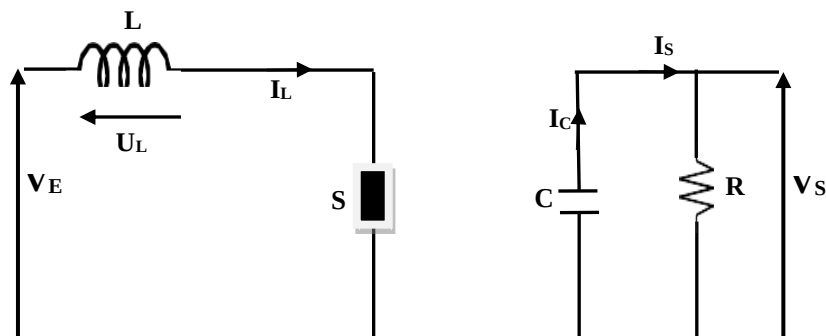


Fig. 2.2. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour S_{on} .

La tension d'entrée :

$$U_L = V_E \quad (2.1)$$

Avec

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

Le courant dans la bobine :

$$I_L(t) = \frac{V_E}{L} t + I_{\min} \quad (2.3)$$

Le courant dans la diode :

$$I_D(t) = 0 \quad (2.4)$$

Le courant dans le transistor :

$$I_S(t) = I_L(t) \quad (2.5)$$

Phase 2 : Pour $t \in [\alpha.T \text{ à } T]$:

Le transistor est bloqué et la bobine L restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante, [1, 2, 3].

Schéma équivalent :

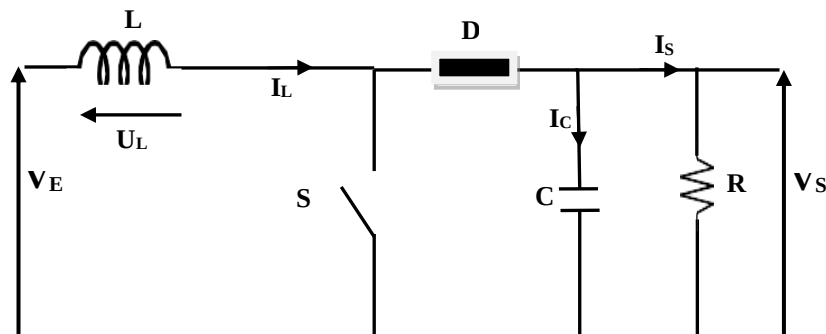


Fig. 2.3. Circuit équivalent du convertisseur boost pour T_{off} .

La tension de sortie :

$$V_S = V_E - U_L \quad (2.6)$$

$$U_L < 0 \quad (2.7)$$

En conséquence

$$V_S > V_E \quad (2.8)$$

Le courant dans la bobine :

$$I_L(t) = -\frac{V_S - V_E}{L}t + I_{\max} \quad (2.9)$$

Le courant dans la diode :

$$I_D(t) = I_L(t) \quad (2.10)$$

Le courant dans le transistor :

$$I_S(t) = 0 \quad (2.11)$$

2.2.1.2 .Les paramètres d'élévateur :

La tension de sortie (V_s) et le rapport cyclique (D) sont donnés par les équations suivantes [4] :

$$V_s = \frac{V_E}{1-D} \quad (2.12)$$

Alors,

$$D = 1 - \frac{V_E}{V_s} \quad (2.13)$$

En supposant un circuit sans perte,

$$V_E \cdot I_E = V_s \cdot I_s = \frac{I_s \cdot V_E}{1-D} \quad (2.14)$$

Le courant de sortie moyen est alors :

$$I_s = I_E(1-D) \quad (2.15)$$

Les relations des filtres d'entrée et de sortie (L) et (C) sont respectivement données par les équations suivantes [2] :

$$L = \frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (2.16)$$

$$C = \frac{D}{2 \cdot f \cdot R} \quad (2.17)$$

Par conséquent, les valeurs de conception du convertisseur élévateur sont présentées dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1. Valeurs du convertisseur élévateur(Boost).

Les parameters	Valeurs
Tension d'entrée (V_e)	152V
Tension de sortie (V_s)	420 V
Fréquence de commutation (f)	10Khz
Rapport cyclique (D)	0.64
Inducteur (L)	13.94 μH
Condensateur (C)	9.45 μF
Résistance(Ω)	3.4 Ω

La Figure (2.4), illustre les tensions d'entrée(V_e) et de sortie(V_s) du convertisseur élévateur. La tension de sortie correspondante est obtenue à partir de la tension d'entrée à un rapport cyclique.

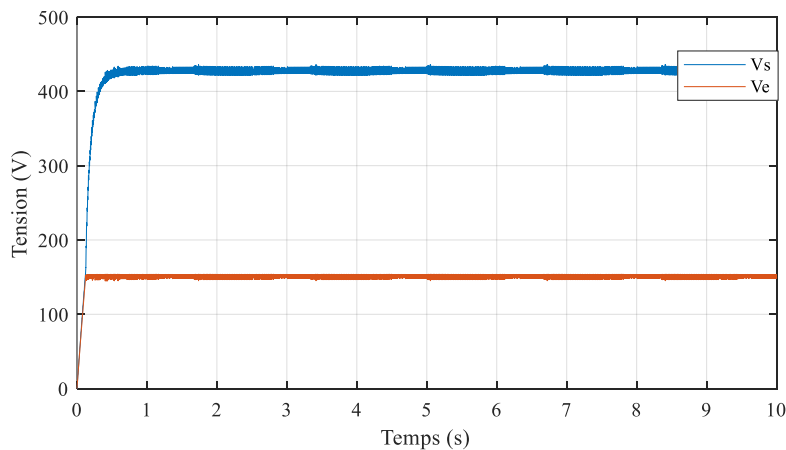


Fig. 2.4. Tension d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.

2.3. Le point de puissance maximum (MPP) :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme inclus dans les contrôleurs de charge utilisés pour extraire la puissance maximale disponible du système photovoltaïque quelles que soient les conditions météorologiques. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique (D) en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le générateur PV [5,6].

Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance tirée du générateur photovoltaïque, [4]. Le schéma fonctionnel du système est présenté à la Figure (2.5) :

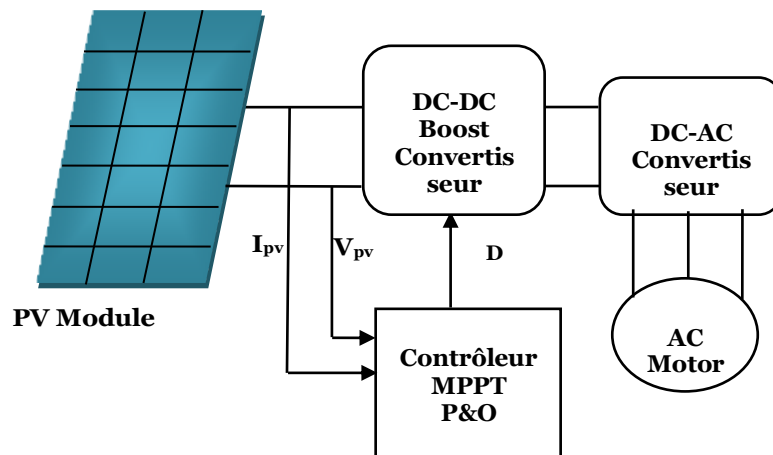


Fig. 2.5. Schéma fonctionnel à conversion photovoltaïque.

2.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela nous comparons un point de puissance actuel $P(k)$ avec un point de puissance précédent $P(k-1)$.

Si $P(k-1) = P(k)$, la dérivée est nulle, cela veut dire le point de fonctionnement est situé au maximum.

Si $P(k-1) < P(k)$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale MPPT. Si la dérivée est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale. Ainsi, au démarrage du système, la recherche de MPPT se fait progressivement, en cherchant le premier point maximum [7,8].

Le concept de base du MPPT sur une courbe PV d'un générateur photovoltaïque est illustré à la figure (2.6).

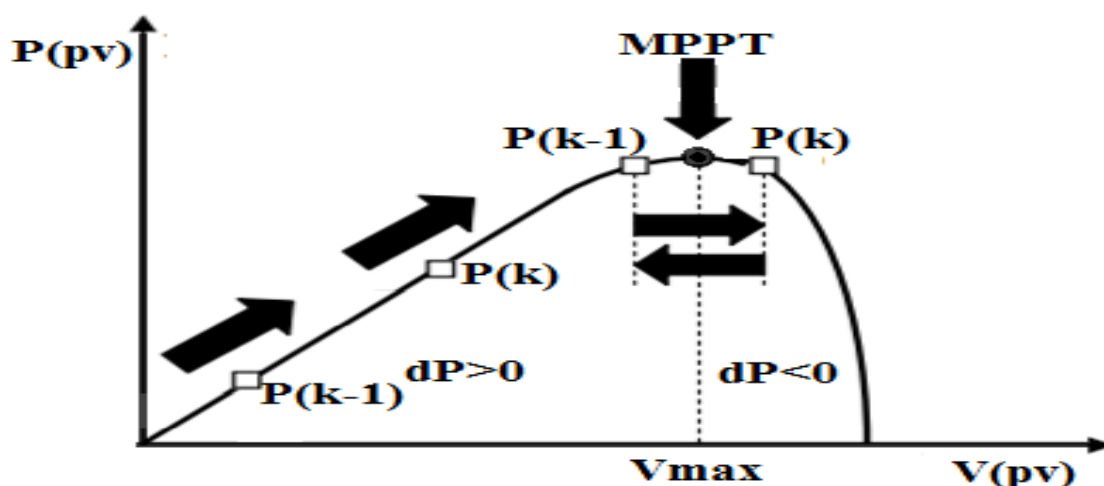


Fig. 2.6. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT 2.5. Les Techniques

MPPT :

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Les techniques sont différentes dans de nombreux aspects tels que les capteurs requis, la complexité, le coût, la portée d'efficacité, vitesse de convergence, suivi correct en cas d'irradiation ou changement de température, le matériel nécessaire à la mise en œuvre entre autres. Certaines des techniques MPPT les plus populaires sont [9,10] :

- Perturbation et observation.
- Méthode de conductance incrémentale.
- Courant de court-circuit fractionnel.
- Tension de circuit ouvert fractionnaire.
- Logique floue.
- Réseaux de neurones.

2.5.1. La Technique Perturbation et Observation :

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la méthode perturbation et observation (P&O) qui est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. Elle est basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède l'inconvénient dû aux oscillations autour du MPPT en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du MPPT lors de changement rapide des conditions climatiques. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du MPPT, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser [11].

Tout d'abord, la tension $V(K)$ et le courant $I(K)$ sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur PV est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation du cycle précédent sinon on inverse la perturbation du cycle. De même manière répété jusqu'à ce que le point maximal soit suivi, figure (2.7), [12,13].

Le modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation (P & O) est représenté à la figure (2.8).

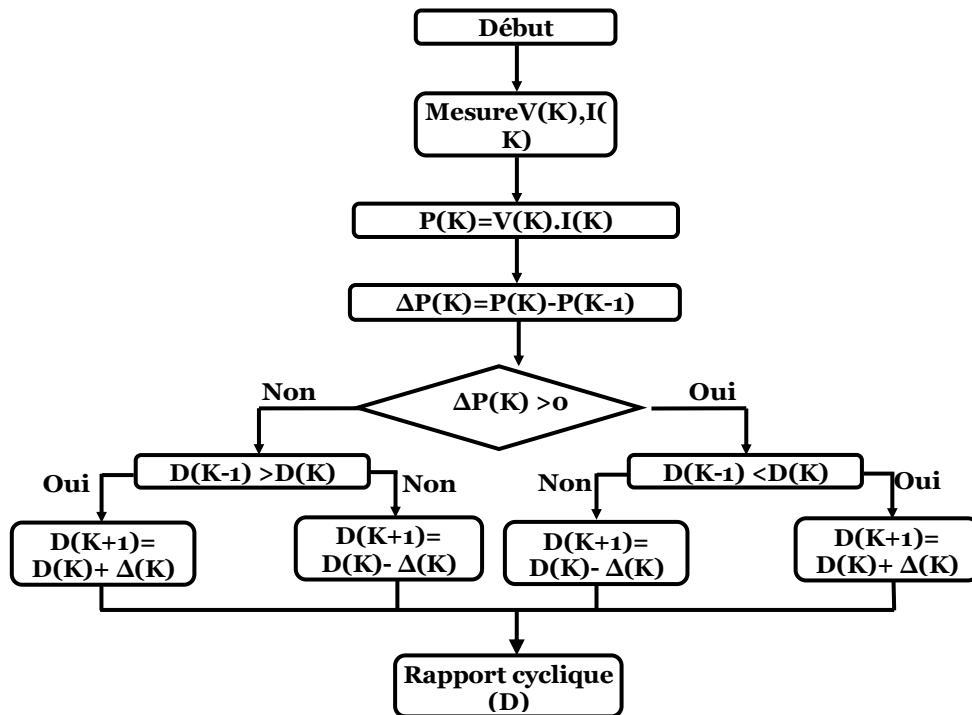


Fig. 2.7. Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

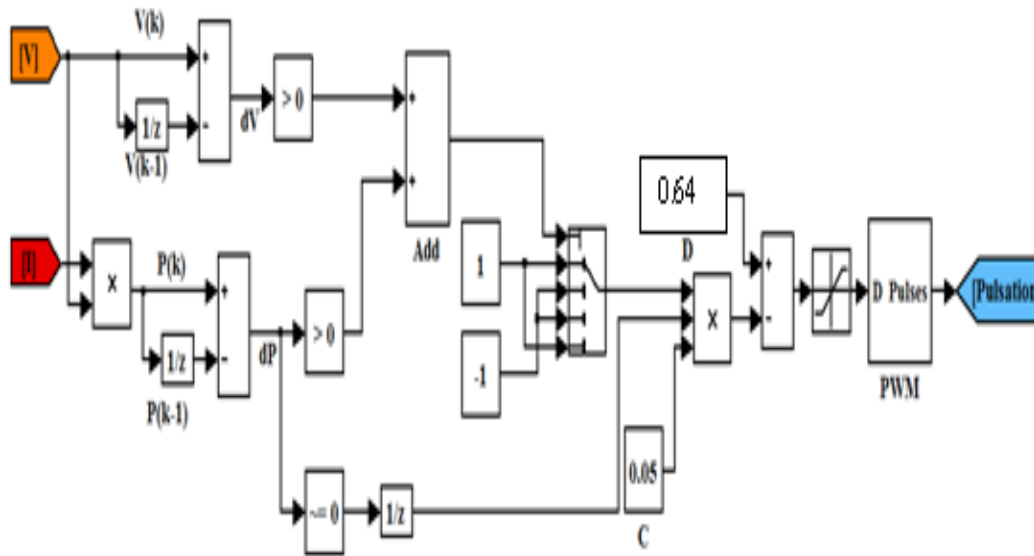


Fig 2.8. Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation.

2.6. Simulation et interprétation :

Générateur photovoltaïque :

Le type PV poly-cristallin (Dimel) a été choisi. Il est constitué de 10 cellules d'une puissance de 190 W. Le Tableau (2.2) résume les caractéristiques de ce module PV. Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2.2. Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards <CST>
T=25°C, G=1000W /m².

Puissance maximal	190W
Tension de circuit ouvert (V_{co})	36.2V
Courant de court-circuit (I_{cc})	6.7A
Tension à la puissance maximale (V_m)	30.4V
Courant à la puissance maximale (I_m)	6.25A

Le générateur photovoltaïque est constitué de 10 panneaux, 5 en série et 2 en parallèle donnant une puissance maximale de 1.93 Kw et une tension d'entrée de 152V.

La figure (2.9), montre le schéma fonctionnel du modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink,

basé sur l'algorithme MPPT de la méthode perturbation et observation. Tout d'abord, nous avons simulé notre système avant ensuite après MPPT. Les résultats sont indiqués dans le tableau 2. Il est bien clair que notre système proposé à base de P&O fonctionne parfaitement.

Ensuite, nous avons tracé la puissance en fonction de la tension avec un éclairement différent de 1000W/m^2 à 400W/m^2 tout en maintenant la température constante (25°C comme est illustré à la figure 2.10

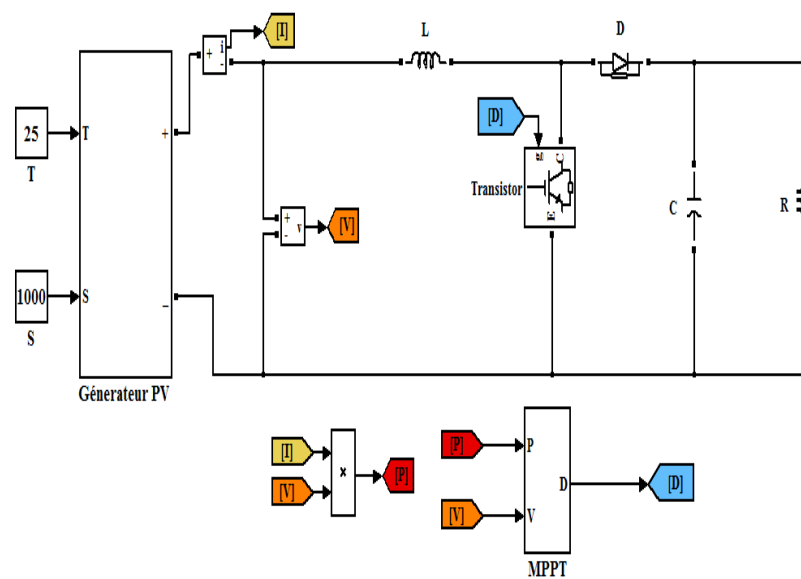


Fig.2.9. Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT.

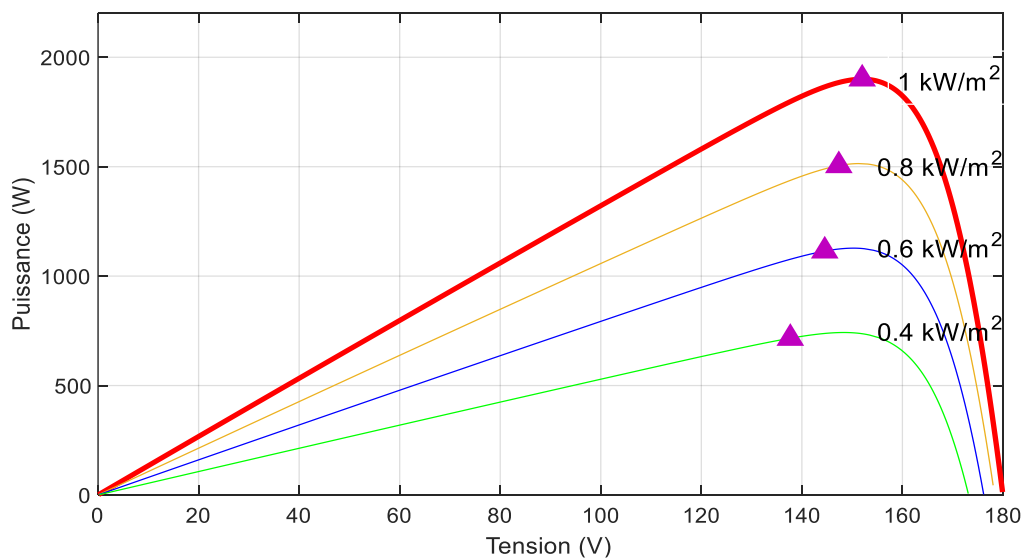


Fig 2.10. Les points de puissance maximale simulés par (P & O).

Sur la base d de la figure (2.10), nous observons que le point de puissance maximale obtenu en appliquant la technique P&O (1930watts) est atteint lorsque l'éclairement énergétique est de 1000 W/m^2 .

Cependant, avec un éclairement énergétique réduit, le point de poursuite optimal est réduit.

La figure (2.11) ci-dessous représente la variation de la puissance en fonction du temps avec la technique (P&O) sous les conditions atmosphériques standard ($1000\text{W} / \text{m}^2$, 25°C) pour tester le temps de réponse de cette technique.

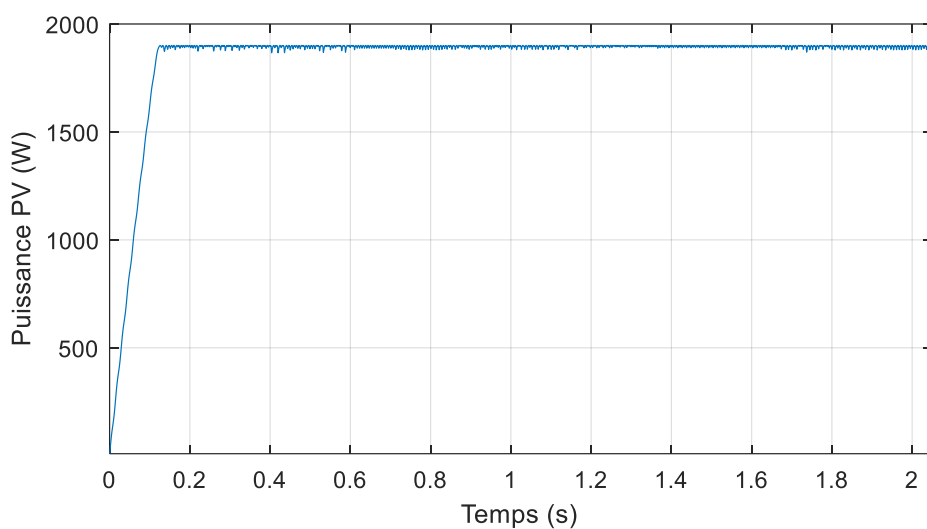


Fig. 2.11. Puissance du générateur photovoltaïque obtenue par la technique (P&O).

En régime permanent, la puissance maximale fournie par le système PV commandé par la commande (P&O) est atteinte, cela prouve l'efficacité de cet algorithme proposé.

Nous allons maintenant tester la performance de commande MPPT précédemment développée en effectuant séparément des variations sur la température et l'ensoleillement.

Dans la figure (2.12), nous apportons des variations sur l'irradiation solaire et nous supposons que la température est constante et égale à 25°C . L'irradiation de 0 à 2 seconde correspond au rayonnement ($1000 \text{ W} / \text{m}^2$), puis de 2 à 5 seconde réduite à $800 \text{ W} / \text{m}^2$ et puis de 5 à 8 seconde réduite à $600 \text{ W} / \text{m}^2$, et enfin de 8 à 10 seconde réduite à $400 \text{ W} / \text{m}^2$.

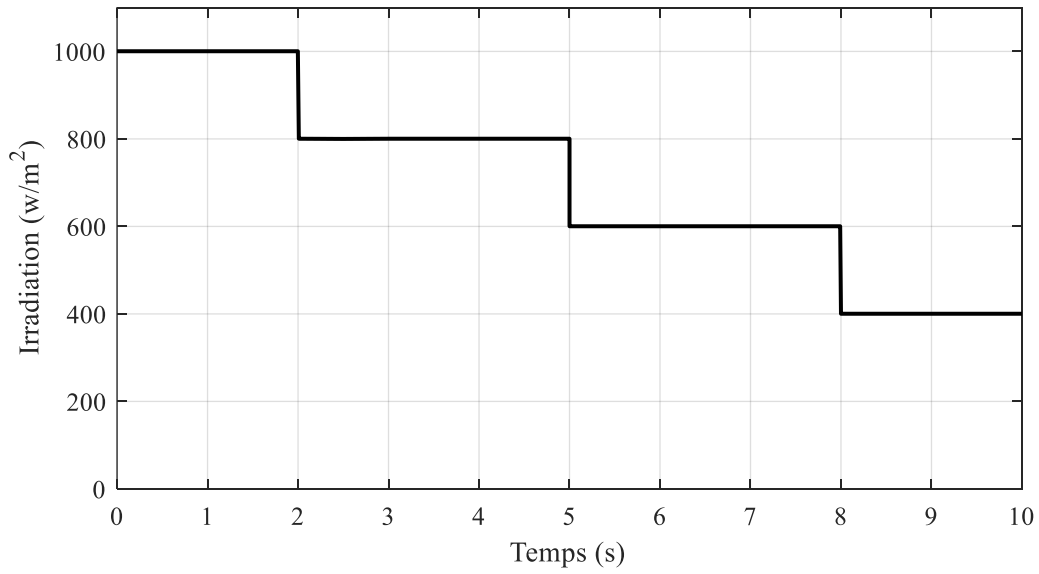


Fig.2.12. La variation de l'irradiation.

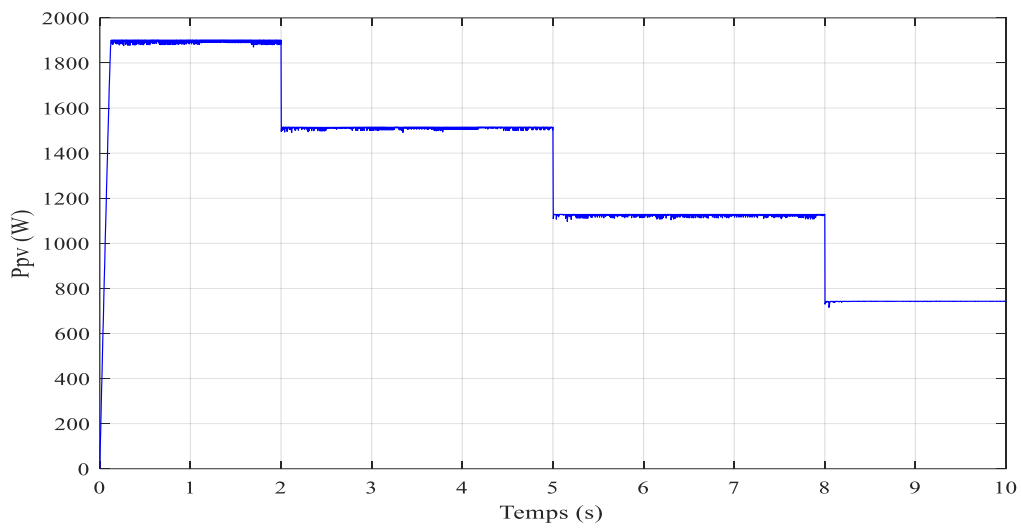


Fig.2.13. L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.

La figure (2.13) montre l'évolution de la puissance correspondante à la variation de l'irradiation.

Nous remarquons que P&O donne des résultats satisfaisants et extrait du générateur photovoltaïque une puissance maximale sous plusieurs niveaux de l'irradiation.

Dans la simulation, figure (2.14), on a varié la température entre 0s et 3.5s et entre 3.5s et 7.1s tout en gardant l'irradiation constante (1000 W /m²) pour voir le comportement de notre

commande. Notre commande MPPT à base de l'algorithme P&O a bien réagi et il y a une poursuite parfaite à ce changement de température.

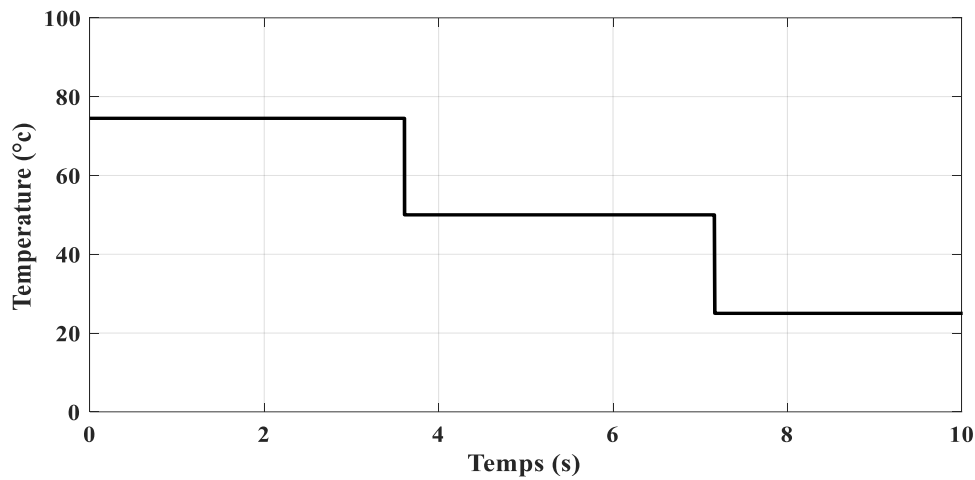


Fig. 2.14. La variation de température (C°).

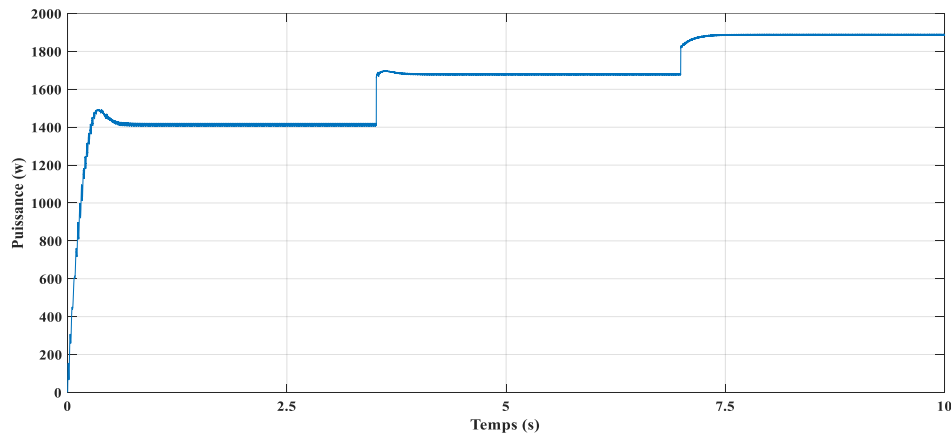


Fig. 2.15. L'évolution de la puissance PV pour une température variable.

2.7. Conclusion :

Le point de puissance maximale (MPPT) permet d'augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques en assurant les paramètres de fonctionnement du générateur dans des conditions optimales et améliorant ainsi le rendement du système photovoltaïque et par la suite la réduction des coûts.

Ce chapitre est une tentative pour étudier et discuter la technique MPPT (perturbé& observé). La technique de la suivie de la puissance maximale (MPPT) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance. La technique MPPT la plus populaire est la Perturbation et Observation suite à sa simplicité et la facilité de son implémentation pratique.

Les résultats obtenus de simulation montrent l'efficacité de la technique MPPT utilisé dans ce mémoire point de vu poursuite de la puissance maximale

Chapitre 3 :
Modélisation et simulation de
l'onduleur deux niveaux

3.1. Introduction :

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions, [1].

Pour qu'une pompe fonctionne, il faut un entraînement qui produit sa rotation. Le choix de l'entraînement de la pompe prend en considération plusieurs facteurs tels que le type de la pompe, la puissance et son application. Principalement, on rencontre deux familles des moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour l'application de pompage photovoltaïque.

- Les moteurs à courant continu.

- Les moteurs asynchrones.

Les moteurs à courant continu présentent un choix attirant à cause de leurs simplicité.

Les modules photovoltaïques produisent directement du courant continu donc on a pas besoin d'un onduleur, cependant la présence du collecteur et des balais a toujours été le point faible de la MCC. Ce commutateur mécanique limite la puissance et la vitesse et il demande beaucoup d'entretien et les balais se détériorent avec le temps, sachant que la durée de vie des balais est approximativement 1000 h pour un fonctionnement nominale.

Pour le pompage photovoltaïque, il faut un onduleur pour commander la vitesse ceci apporte un coût supplémentaire, mais l'utilisation d'un onduleur avec le moteur asynchrone conduit pratiquement aux mêmes prix qu'avec l'utilisation d'un moteur à courant continu.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux avec la stratégie de commande triangulo – sinusoïdale et qui alimente ensuite la machine asynchrone couplé à une pompe.

3.2. Principe de l'onduleur de tension triphasé :

L'onduleur triphasé est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont, [2], [3], figure 3.1.

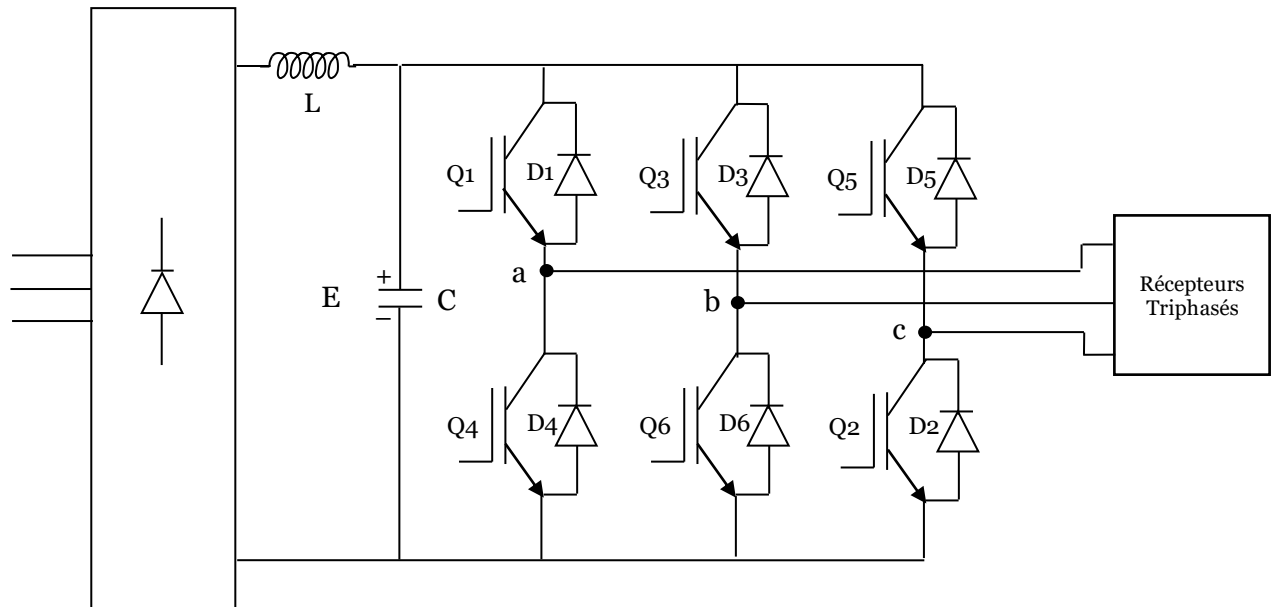


Figure 3.1 Structure générale de l'onduleur triphasé

Chacune des trois tensions composées de sortie est formée d'une onde bistable prenant les valeurs $+E$ et $-E$ mais décalées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens à la charge. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs [4].

3.3. Modulation de largeur d'impulsion :

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions **MLI** permet de reconstituer ces derniers à partir d'une source de tension continue par l'intermédiaire d'un convertisseur direct. Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement.

Dans la majorité des cas, l'onde idéale est sinusoïdale. La **MLI** permet de se rapprocher du signal désiré et de faire varier la valeur de la fondamentale de la tension de sortie. En générale, elle repousse les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences les plus élevées, ce qui facilite le filtrage [4].

3.3.1. Techniques de la commande à MLI :

Dans ce mémoire, nous avons opté pour une MLI sinus-triangle.

Cette MLI effectue la comparaison d'un signal de référence V_{ref} à une porteuse triangulaire.

3.3.1.1 Modulation sinus - triangle :

3.3.1.1.1. Principe de la technique :

La **MLI** sinus - triangle est réalisée par comparaison de la tension de la référence basse fréquence à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la référence, figure (3.2).

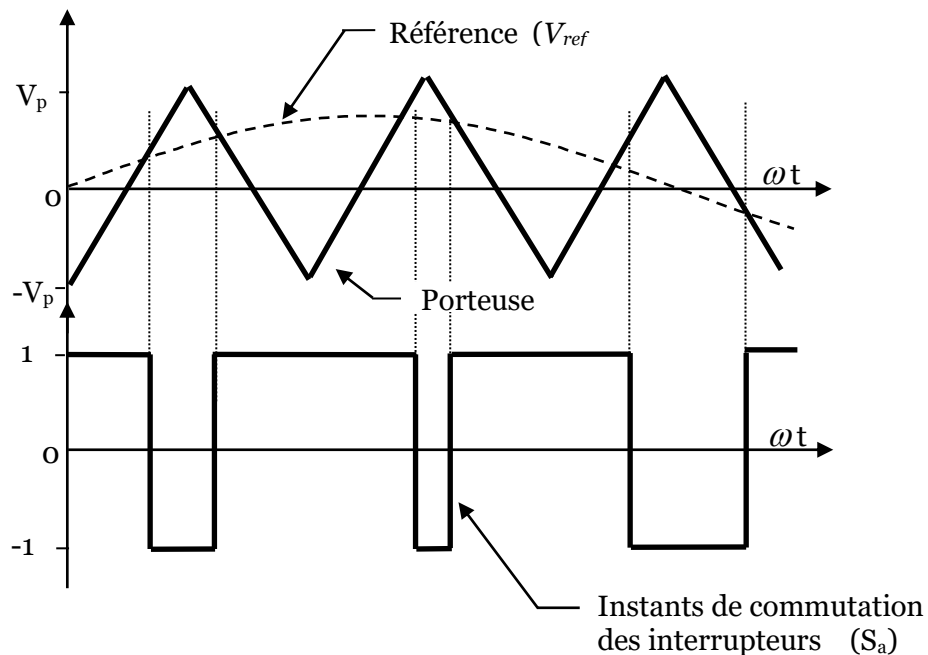


Figure 3.2 M.L.I. sinus-triangle

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f .

3.3.1.1.2. Caractéristique de la modulation :

Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande : l'indice de modulation (**m**) et le taux de modulation (**r**).

L'indice de modulation **m** est égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) et de la référence (modulante). Ce rapport découle entre un compromis, entre une bonne

neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur, [3].

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (3.1)$$

Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur de crête de la porteuse. Dans la pratique, on s'arrange toujours à avoir un taux de modulation inférieur à l'unité, de façon à éviter les ratés de commutation qui pourront entraîner des discontinuités de fonctionnement, et en particulier dans les applications à vitesse variable où l'on fait varier la fréquence et la tension.

$$r = \frac{A_m}{A_p} \quad (3.2)$$

Où :

A_m : Amplitude de la tension de référence

A_p : Amplitude de la porteuse

3.3.2. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI triangulo - sinusoidal.

La modélisation de l'onduleur est faite en supposant les hypothèses suivantes :

- Les interrupteurs sont supposés parfaits.
- La source de chaque branche impose un courant positif ou négatif non nul.
- Les tensions de sortie aux bornes de l'onduleur à **MLI** sont référencées par rapport au point fictif « 0 » de la sortie de l'onduleur figure 3.3.

3.3.2.1. Equations de la porteuse

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par deux grandeurs qui sont la fréquence f_p et la valeur de crête V_p .

On définit l'équation de la porteuse dans sa période par [5] :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p}\right) & t \in \left[0, \frac{T_p}{2}\right] \\ x_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p}\right) & t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p\right] \end{cases} \quad (3.3)$$

Où T_p est la période de la porteuse.

3.3.2.2. Equations des tensions triphasées de référence :

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r .

En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence déphasées par $\frac{2\pi}{3}$ sont données par :

$$\begin{cases} v_a = V_r \sin 2\pi f_r t \\ v_b = V_r \sin \left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_c = V_r \sin \left(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (3.4)$$

3.3.2.3 Tensions de sortie de phase de l'onduleur

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, figure 3.3 :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (3.5)$$

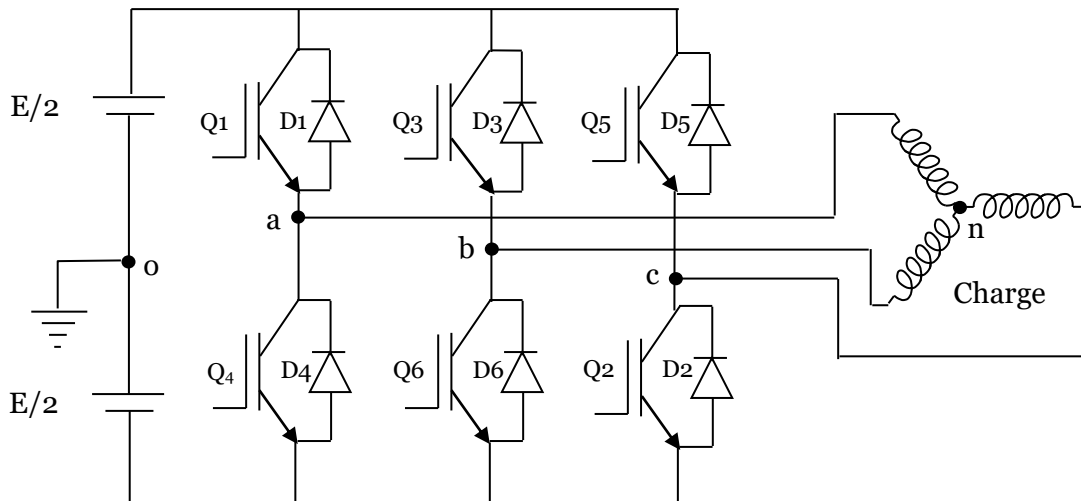


Figure 3.3 Onduleur triphasé simplifié

En faisant la somme des équations du système (3.5), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (3.6)$$

D'où :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (3.7)$$

Donc :

$$v_{on} = -1/3 (v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (3.8)$$

En substituant l'équation (3.8) dans le système (3.5), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Les états des interrupteurs (S_k) de l'onduleur commandé par MLI sont donnés par :

$$v_k \geq x(t) \Rightarrow S_k = 1 \quad \text{Si non} \quad S_k = -1 \quad (3.10)$$

($S_k = 1$, Interrupteur fermé ; $S_k = -1$ interrupteur ouvert, avec $k = a, b, c$)

Les tensions de branches v_{ko} peuvent être exprimées en fonction des états des interrupteurs « S_k » par :

$$v_{ko} = S_k \cdot E/2 \quad (3.11)$$

En remplaçant l'équation (3.11) dans l'équation (3.9), on déduit les tensions de sortie de phase de l'onduleur comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Ainsi l'équation (3.12), représente le modèle mathématique de l'onduleur.

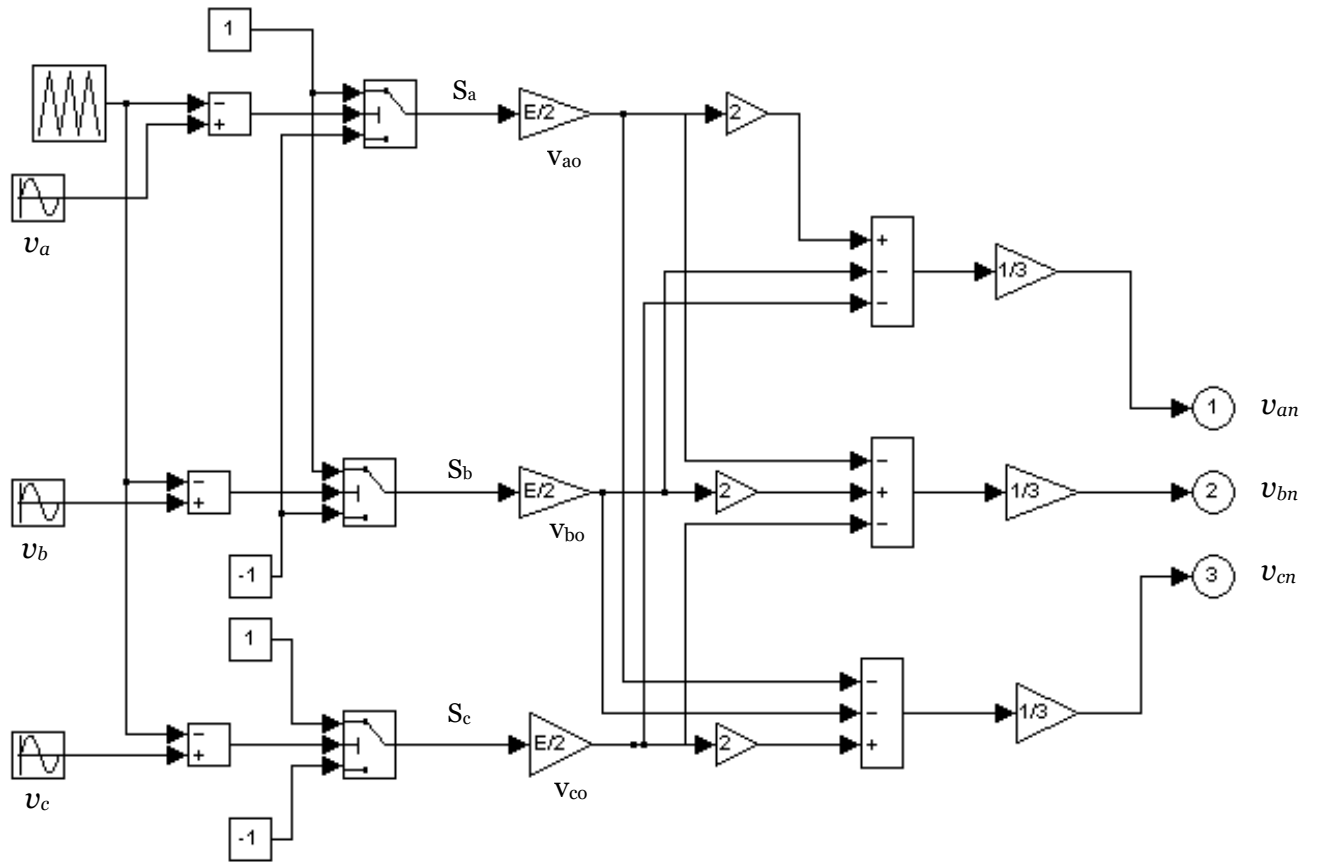


Figure 3.4 Modèle MATLAB/ SIMULINK de l'onduleur à MLI sinus- triangle.

Les figures 3.5 et 3.6 représentent respectivement le zoom de la tension de ligne et de la tension de phase. Elles sont exactement en accord avec la théorie citée précédemment.

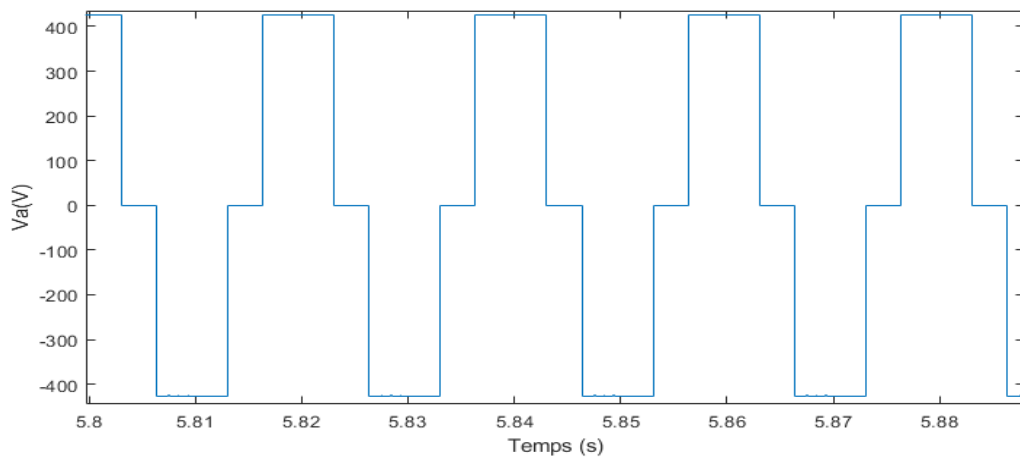


Figure 3.5 : Allure de la tension de ligne (V_{ab}).

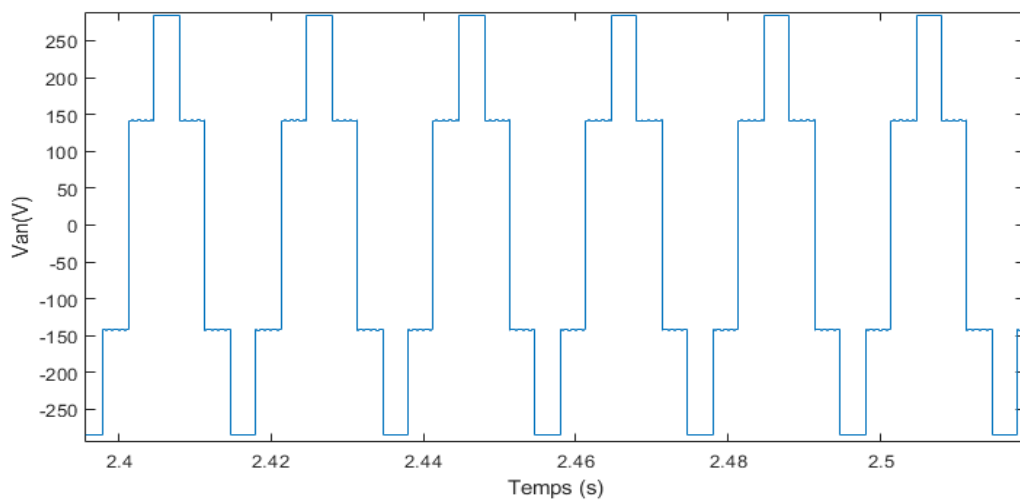


Figure 3.6 : Allure de la tension de phase (V_{an}).

La modélisation détaillée du moteur asynchrone est donnée à l'annexe et les paramètres du moteur utilisés dans la simulation sont représentés au tableau 3.1.

Tableau 3.1. Paramètres du moteur asynchrone

La puissance nominale	1.5 Kw
La vitesse nominale	1438 tr/mn
La résistance du stator	4.850Ω
Inductance du stator	0.274H
La résistance du rotor	3.805Ω
Inductance du rotor	0.274 H
La résistance mutuelle	0.258 H
Le moment d'inertie	0.031 kg.n.m^2
Le nombre de pair des pôles	2

3.4. Conclusion :

Ce chapitre présentait une revue théorique de quelques notions de base sur la commande à MLI sinus-triangle et la modélisation de l'onduleur. Dans le chapitre suivant, on va simuler le système complet du GPV au pompage photovoltaïque et on va introduire l'ombrage complet pour voir l'effet sur le débit et la puissance hydraulique.

Chapitre 4 :
Dimensionnement de
l'installation de pompage

4.1. Introduction :

Le couplage direct entre une pompe et générateur photovoltaïque présente un problème significatif au point de puissance optimale puisque l'ensellement et la température varient durant le jour. Ce problème est surmonté en utilisant la commande mppt au convertisseur statique entre le générateur et la pompe qui peut assurer la poursuite du point optimal sans interruption.

Ce chapitre est donc dédié à la simulation des différents composants d'un système de pompage d'eau photovoltaïque composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur statique boost, d'un onduleur à deux niveaux et d'une pompe couplée à un moteur à induction.

On a simulé notre système complet en tenant compte de l'ombrage total afin de voir l'effet de ce dernier point de vu débit et puissance hydraulique. L'ombrage partiel fera l'objet pour la continuité de ce travail dans le futur.

4.2. Ombrage

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) fasse de l'ombre aux panneaux solaires.

De l'ombre sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques.

4.2.1 Les différents types d'ombrages

On peut distinguer deux types d'ombrages :

- l'ombrage partiel : c'est un ombrage qui laisse passer en partie les rayons du soleil.
- l'ombrage total : on appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche cassée, saleté de toute nature, etc.).

Il faut savoir que **les cellules photovoltaïques sont montées en série. La cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules.** Ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau.

Par exemple, pour un panneau équipé d'un jeu de 3 diodes by-pass, si une ombre affecte une cellule, alors la série de cellules branchées sur la même diode by-pass est court-circuitée et le reste du panneau continu de produire.

En revanche, si les panneaux photovoltaïques sont montés en séries appelées « branches », c'est le panneau qui produit le moins qui définit la performance de la branche de panneaux.

4.3. Les pompes centrifuges :

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant au travers d'une roue à aube ou d'une hélice appelée impulseur (souvent nommée improprement turbine). C'est le type de pompe industrielle le plus commun. Par l'effet de la rotation de l'impulseur, le fluide pompé est aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement, et enfin refoulé tangentielllement[1].

4.3.1 Le principe de fonctionnement :

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

a) L'aspiration :

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage [3].

b) L'accélération :

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie.

La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [1].

4.3.2. Avantages et inconvénients :

Les pompes centrifuges forment des dispositifs robustes. À caractéristiques égales, elles présentent souvent un meilleur rendement, et un fonctionnement plus régulier, sont plus fiables et moins bruyantes que les machines alternatives. Elles sont davantage compatibles avec l'utilisation de fluides chargés de particules solides. Mais elles ne sont pas autoamorçantes.

4.4. Modélisation de la pompe centrifuge :

Les pompes sont généralement choisies selon la hauteur manométrique totale du puits (HMT).

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement : elles sont soit de type volumétrique ou bien de type centrifuge. Outre ces deux classifications, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe à aspiration et pompe à refoulement [2].



Figure 4.1 : (a) Pompe centrifuge accouplée MAS, (b) coupe longitudinale.

4.4.1. Puissance Hydraulique :

La principale caractéristique de la pompe centrifuge consiste à convertir l'énergie d'une source de mouvement (le moteur) d'abord en vitesse (ou énergie cinétique) puis en énergie de pression. Le rôle d'une pompe consiste en effet à transférer de l'énergie au liquide pompé (énergie transformée ensuite en débit et en hauteur d'élévation) selon les caractéristiques de fabrication de la pompe elle-même et en fonction des besoins spécifiques à l'installation. La puissance hydraulique fournie par la pompe est donnée par la relation :

$$P_h = \eta_{mp} \times p_{ele} = \rho \times g \times HMT \times Q \quad (4.1)$$

La pompe centrifuge oppose un couple résistant Cr :

$$Cr = K_r \times \Omega_n^2 \quad (4.2)$$

Avec K_r un coefficient de proportionnalité $[(Nm/ (rad.s^{-1})^2]$ qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{p_n}{\Omega_n^3} \quad (4.6)$$

4.5. Dimensionnement de l'installation de pompage :

Le tableau (4.1) représente l'irradiation moyenne annuelle durant toute l'année de chaque mois de la ville de Saida. Donc, l'irradiation moyenne est approximativement 5.77 kWh /m²/j.

Tableau (4.1) : Irradiations mensuelles de la wilaya de Saida

Mois	Irradiation (kWh/m ² /j).
Janvier	4.51
Fevrier	5.17
Mars	5.87
Avril	6.03
Mai	6.16
Juin	6.7
Juillet	6.74
Aout	6.80
Septembre	6.33
Octobre	5.87
Novembre	4.73
Décembre	4.41
Moyenne	5.77

Dans ce projet, le débit journalier est choisi à $Q = 14 \text{ m}^3/\text{h}$ et la HMT est estimée à 18 m. La pompe choisie a un rendement de $\eta_p = 55\%$, et celui du moteur est d'environ $\eta_{\text{mot}} = 80\%$ au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe $\eta_{\text{mp}} = 44\%$. La puissance électrique requise par la pompe est décrite par l'équation suivante [2] :

$$P_e = \frac{P_h}{\eta_{\text{mp}}} = C_h \cdot Q \cdot \text{HMT} / \eta_{\text{mp}} = \frac{2.725 \cdot 14 \cdot 18}{0.44} = 1560 \text{ W/j} \quad (4.7)$$

Avec :

P_h : Puissance hydraulique = 686.7W/j

$$C_h = g * \delta = 9.81 * \frac{1000}{3600} = 2.725,$$

C_h : Constante hydraulique,

g : pesanteur (m^2/s),

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) = 1000.

Note : 1 Wh = 3600 J

On calcule l'énergie électrique E_{el} consommée pendant le temps de pompage T_{pom} dans une journée :

-On a un réservoir de volume $V_{\text{res}} = 70 \text{ m}^3$

$$T_{pom} = V_{res} / Q = 70 / 14 = 5 \text{ heures} \quad (4.9)$$

$$E_{el} = P_e . T_{pom} = 1560 * 5 = 7800 \text{ Wh} / j \quad (4.10)$$

L'énergie produite E_p par un champ photovoltaïque est égale à :

$$E_p = \frac{E_{el}}{K} = \frac{7800}{0.7} = 11142.85 \text{ Wh} / j \quad (4.11)$$

K : un coefficient correcteur dépendant de l'incertitude météorologique, de l'inclinaison des modules solaires et du rendement global du système photovoltaïque. Sa valeur théorique est comprise entre 0.55 et 0.75 [1,2].

4.5.1. La puissance crête du générateur photovoltaïque

La puissance crête du générateur photovoltaïque dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation.

$$P_c = \frac{E_p}{I_r} = \frac{11142.85}{5.77} = 1931 \text{ W} \quad (4.12)$$

Où I_r est l'irradiation moyenne journalière estimée dans notre région à 5.77 kWh/m²/j.

4.5.2. Le nombre de modules photovoltaïques :

Le nombre total de modules photovoltaïques est calculé en rapportant de la puissance globale du champ à celle (P_{mod}) d'un seul module :

$$N = P_c / P_{mod} = 1931 / 190 = 10.16 \approx 10 \text{ modules} \quad (4.13)$$

Le générateur photovoltaïque aura donc une puissance crête de 1931W et sera composé de 10 modules de 190W, 5 séries et 2 parallèles.

4.6. Structure générale de la simulation :

La structure détaillée, figure 4.2 pour la simulation des différents composants d'un système de pompage photovoltaïque est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur statique boost, d'un onduleur à deux niveaux et d'une pompe couplée à un moteur à induction.

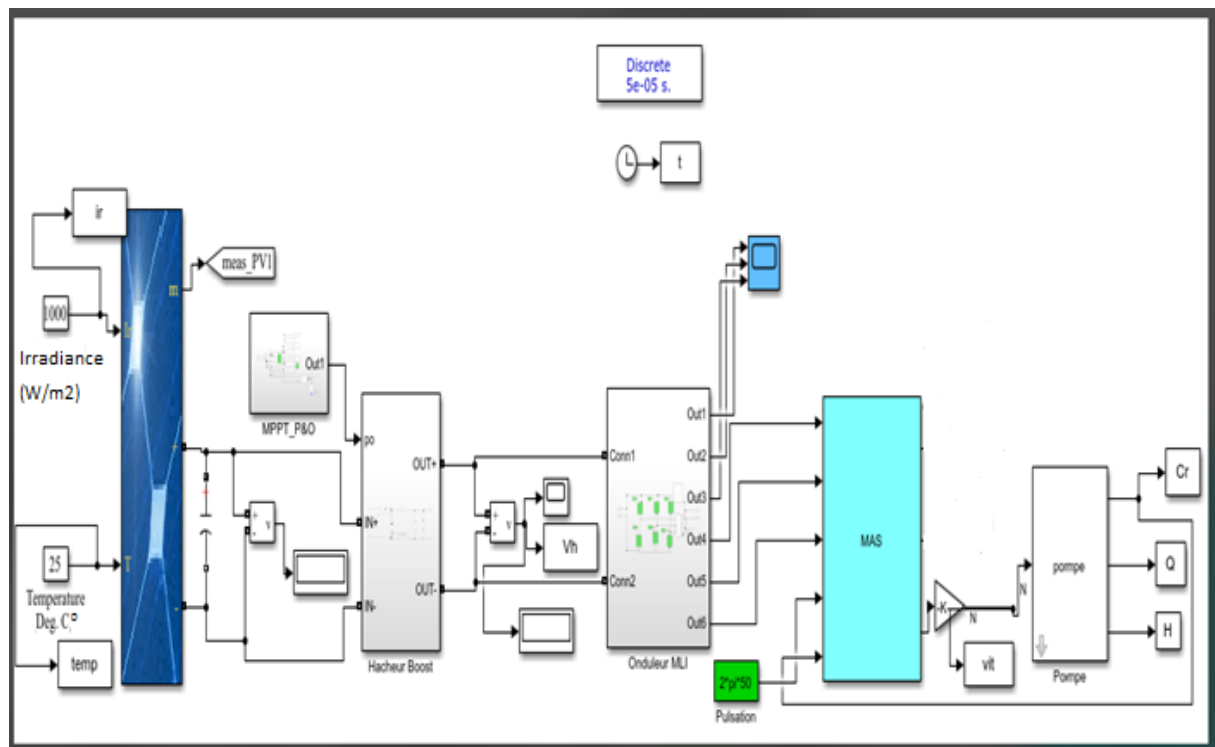


Figure 4.2 : Structure générale de la simulation du système de pompage photovoltaïque.

4.7. Résultats de simulation et interprétation :

La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK/Sim power. La pompe centrifuge est entraînée par la machine asynchrone et alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux. Le générateur photovoltaïque est composé de 10 panneaux, 5 en série et 2 en parallèle avec une puissance crête de 1931 W. On a effectué au premier lieu la simulation sans MPPT ensuite avec MPPT afin de s'assurer que notre système fonctionne correctement.

Les tableaux ci-dessous montrent les résultats obtenus avant et après MPPT et qui confirment réellement la validité de notre algorithme (P&O) proposé.

a)Tableau Avant MPTT :

<i>Irradiance(w/m²)</i>	1000	800	600	400
<i>P_{pv}(max)(W)</i>	1930	1515	1128	742

b) Tableau Après MPTT :

<i>Irradiance(w/m²)</i>	1000	800	600	400
<i>P_{pv} (W)</i>	1930	1515	1128	742

Ensuite, le reste de la simulation a été effectué afin de visualiser les grandeurs électriques du GPV à savoir : P_{PV} , V_{PV} et I_{PV} avec un éclairement fixe de 1000 W/m², par la suite on a varié le niveau de l'éclairement progressivement de 1000 à 400 W/m².

La continuité de cette simulation concernera la visualisation de la vitesse avec un éclairement fixe et varié. Enfin, nous terminons cette simulation par l'obtention des graphes de

la puissance hydraulique, le débit et la hauteur manométrique pour un éclairement fixe ensuite varié.

Les figures (4.3), (4.4) et (4.5) représentent la réponse du GPV sous un éclairement fixe à 1000W/m^2 :

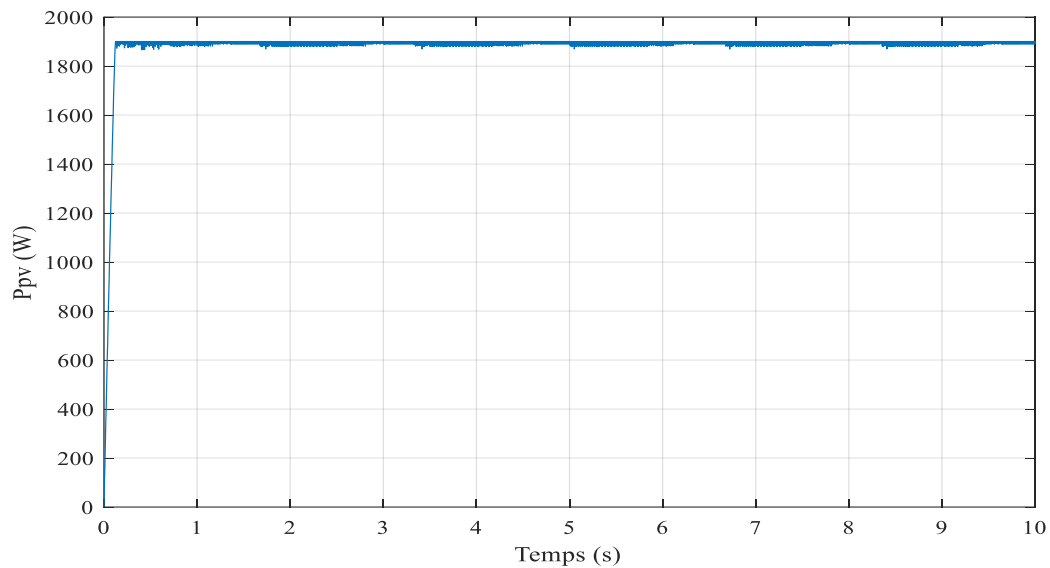


Figure 4.3 : Allure de P_{pv} sans changement d'éclairement.

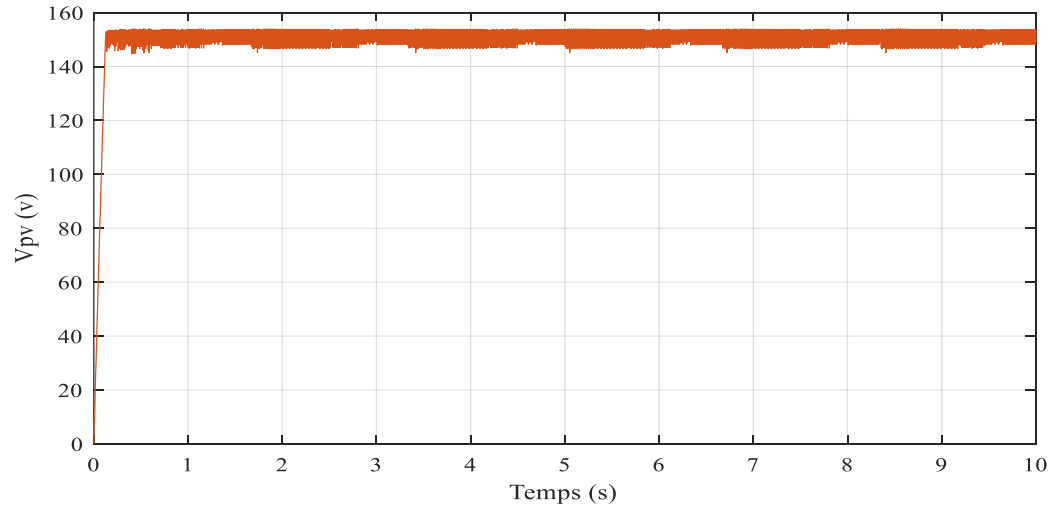


Figure 4.4 : Allure de V_{pv} sans changement d'éclairement.

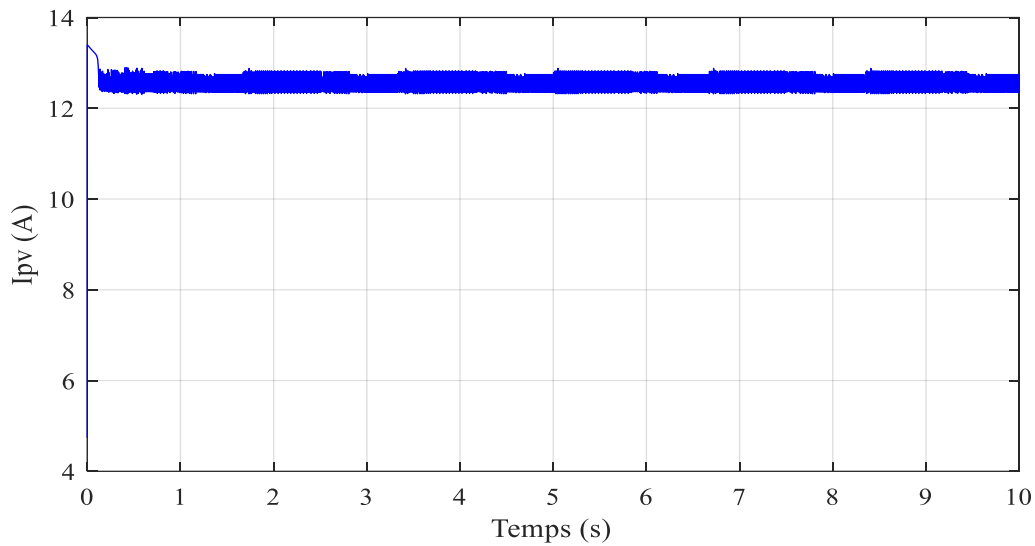


Figure 4.5 : Allure de I_p sans changement d'éclairement.

Nous remarquons d'après la figure 4.3 que la puissance est au alentour de 1930W qui a été calculée auparavant, tandis que la tension se stabilise à 152V, figure 4.4 l'équivalent de cinq panneaux en série de 30.4V chacun (tension à la puissance maximale) et le courant est approximativement à 12.50A figure 4.5, deux panneaux en série à raison de 6.25A (courant à la puissance maximale),

Pour tester la robustesse de la commande MPPT, on a varié le niveau de l'éclairement successivement 1000 - 800- 600 - 400 w/m² et on a effectué la même démarche de simulation.

Les figures ci-dessous représentent la réponse du GPV durant cette variation.

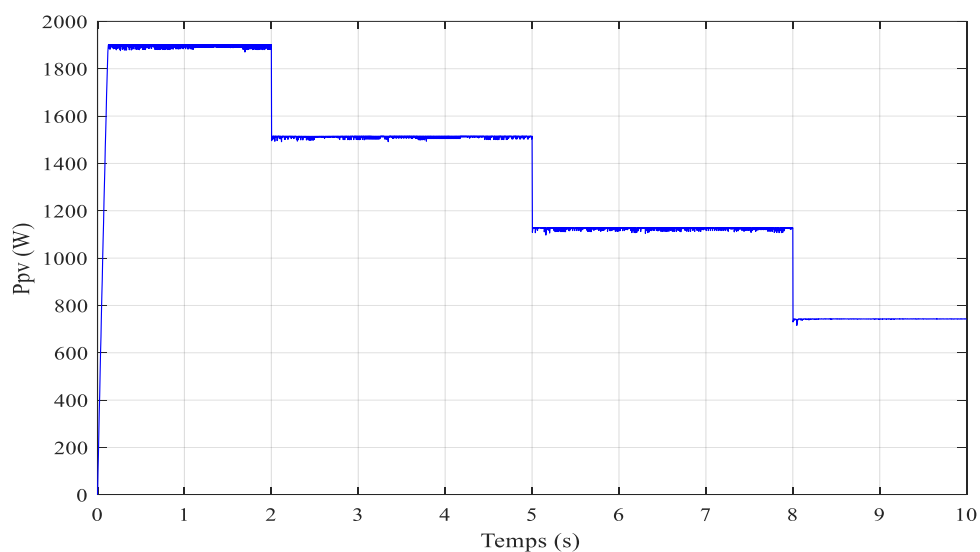


Figure 4.6 : Allure de P_{pv} avec changement d'éclairement .

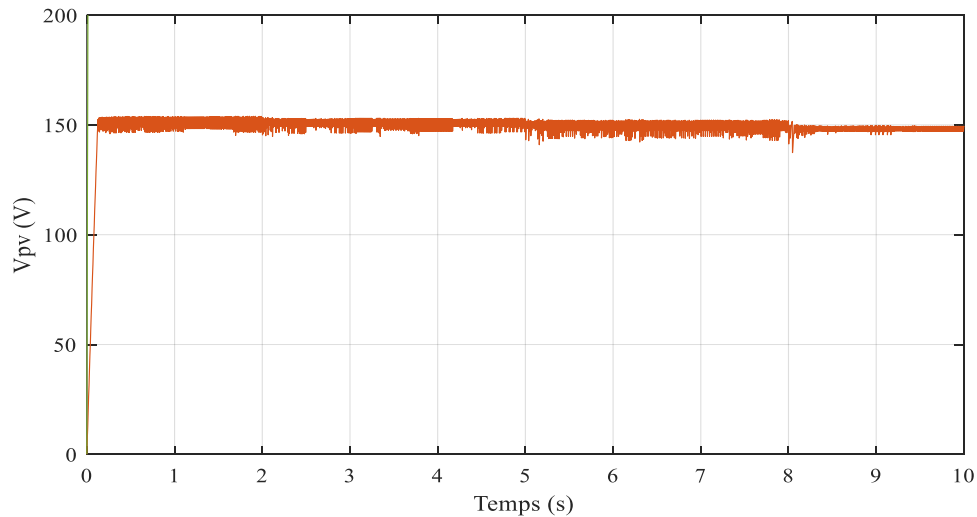


Figure 4.7 : Allure de V_{pv} avec changement d'éclairement

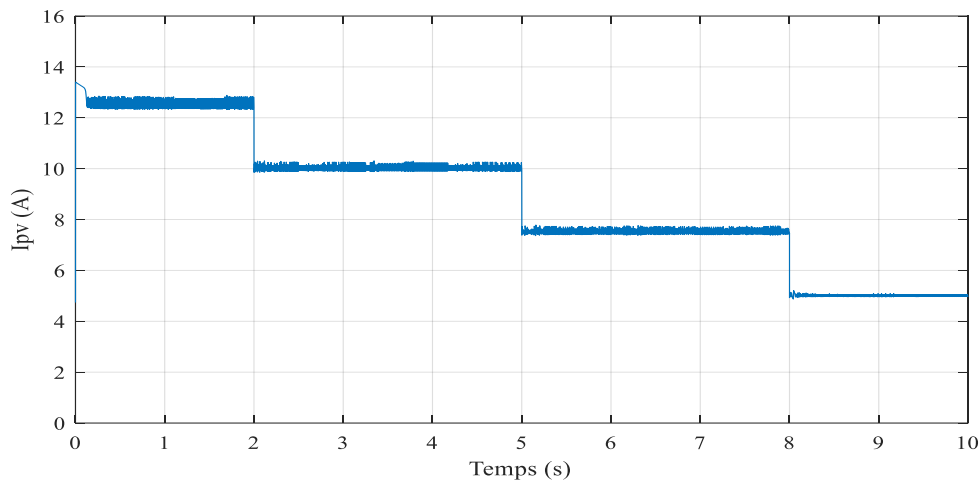


Figure 4.8 : Allure de I_{pv} avec changement d'éclairement.

D'après la figure 4.6, il est clair que la commande mppt assure parfaitement la poursuite de la valeur de la puissance maximale qui est extraite du générateur photovoltaïque. A propos de la tension figure 4.7, le changement d'éclairement a un effet négligeable tandis que le courant figure 4.8 diminue progressivement avec la diminution de l'éclairement.

Afin de visualiser la tension qui alimente l'onduleur, on a pris les deux allures de la tension de bus continu à une irradiation fixe à 1000 w/m^2 et la deuxième allure est prise après la variation de l'irradiation.

Les figures 4.9.1 et 4.10 représentent ces deux allures :

Il est tout à fait clair, que la variation de la tension d'entrée (V_{dc}) alimentant l'onduleur varie avec la variation de l'éclairement et cela est due principalement à la variation du rapport cyclique.

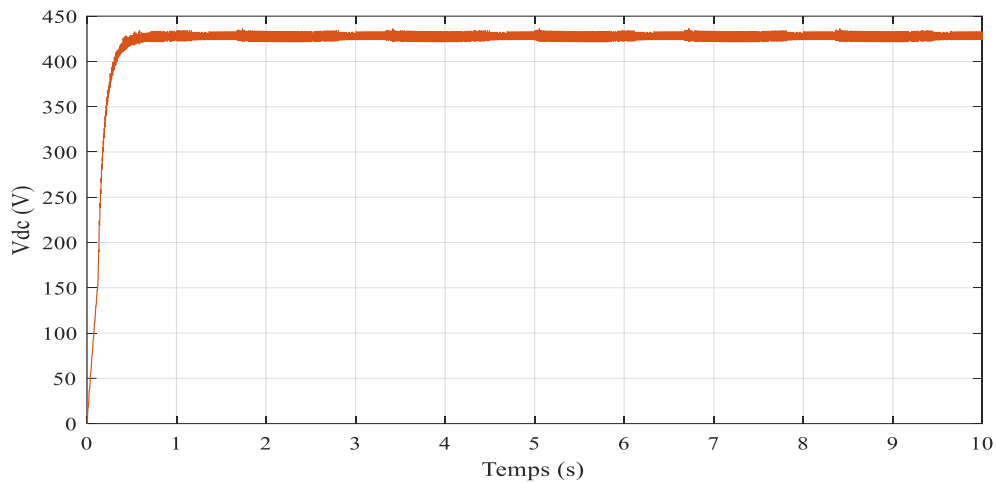


Figure 4.9 : Allure de la tension continue V_{dc} sans changement d'éclairement .

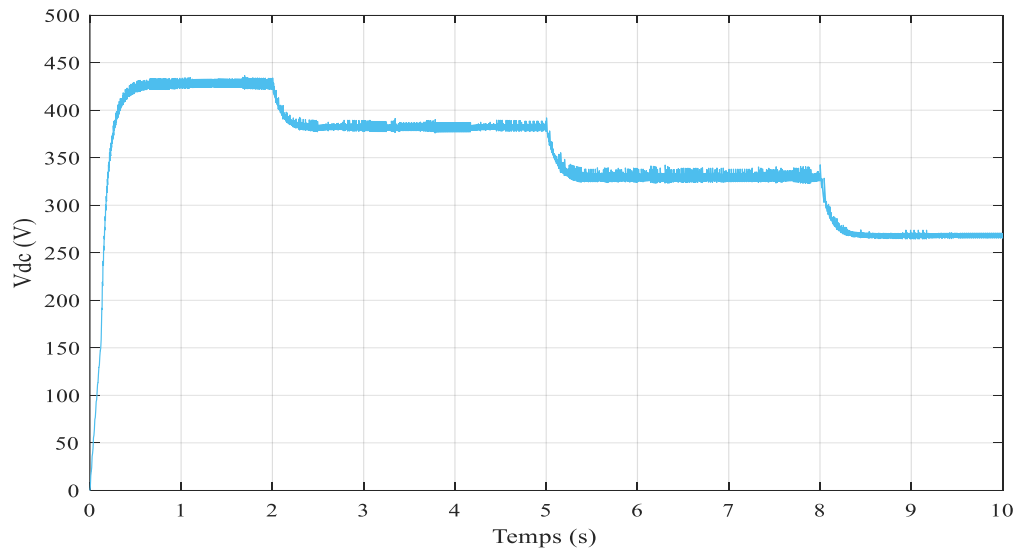


Figure 4.10 : Allure de V_{dc} avec changement d'éclairement.

En ce qui concerne la vitesse du moteur asynchrone ,on constate d'après la figure 4.11 que la vitesse atteint approximativement 1440 tr/mn avec un temps de réponse de 0.6 s quand le GPV est soumis à un niveau fixe de l'irradiation et une fois que l'irradiation diminue la vitesse à son tour diminue et plus particulièrement aux faibles irradiations, figure 4.12.

Tableau 4.2 Variation du rapport cyclique D en fonction de l'irradiance

Irradiance	1000 (w/m ²)	800 (w/m ²)	600 (w/m ²)	400 (w/m ²)
V_{PV} (V)	152	150	149	148
V_{DC} (V)	428	380	335	265
D	0.64	0.6	0.55	0.44

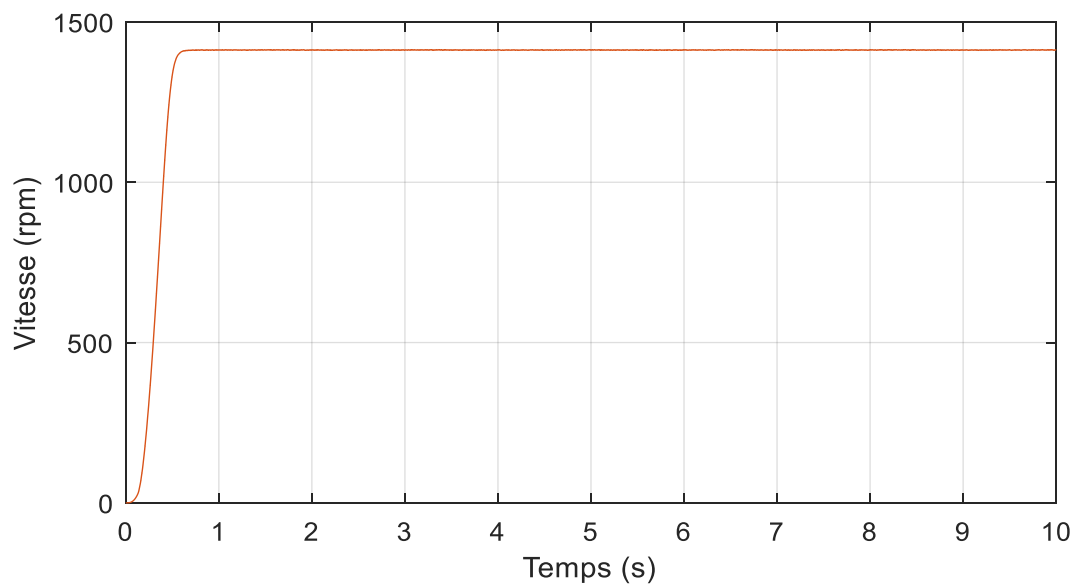


Figure 4.11 : Allure de la vitesse sans changement d'irradiation.

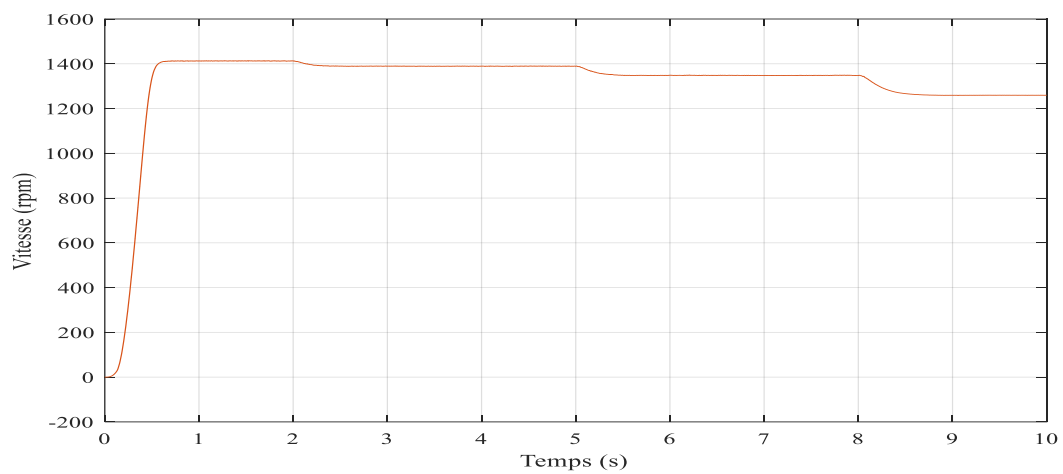


Figure 4.12 : Allure de la vitesse avec changement d'irradiation.

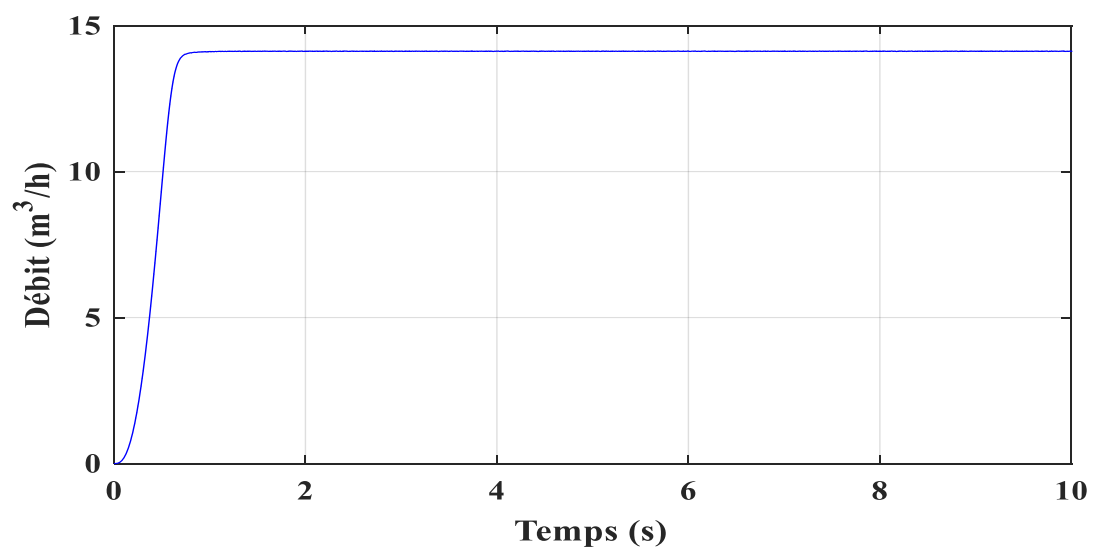


Figure 4.13 : Allure du débit de la pompe sans changement d'irradiation.

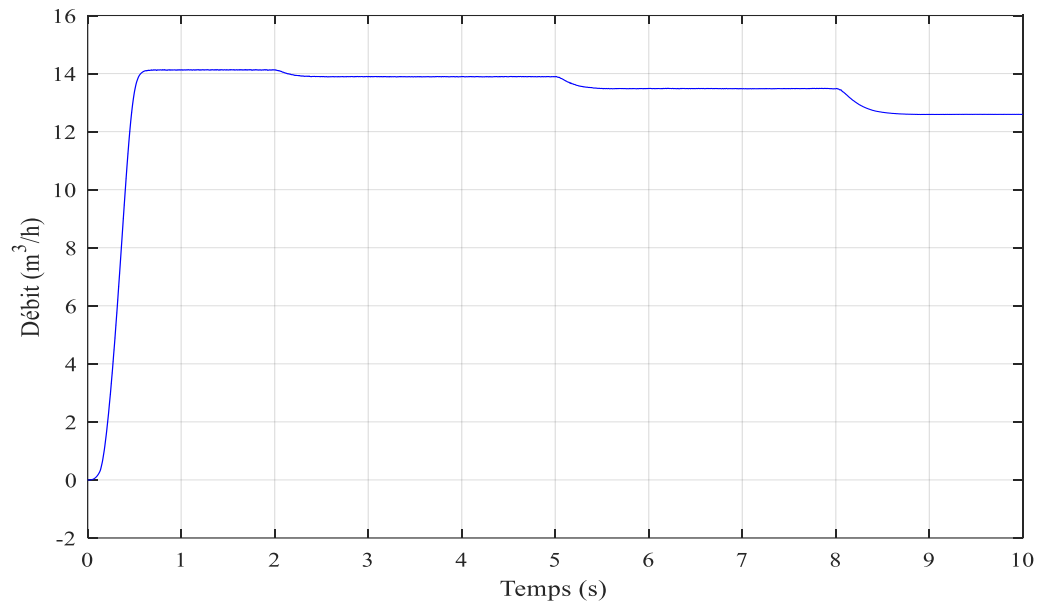


Figure 4.14 : Allure de débit de la pompe avec changement d'irradiation.

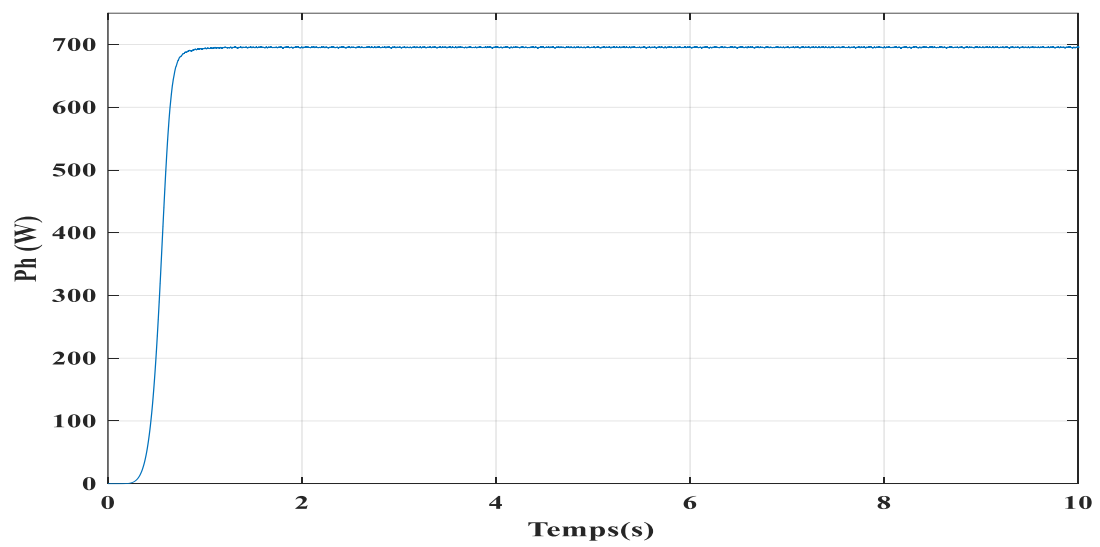


Figure 4.15 : Allure de La puissance hydraulique sanschangement d'irradiation.

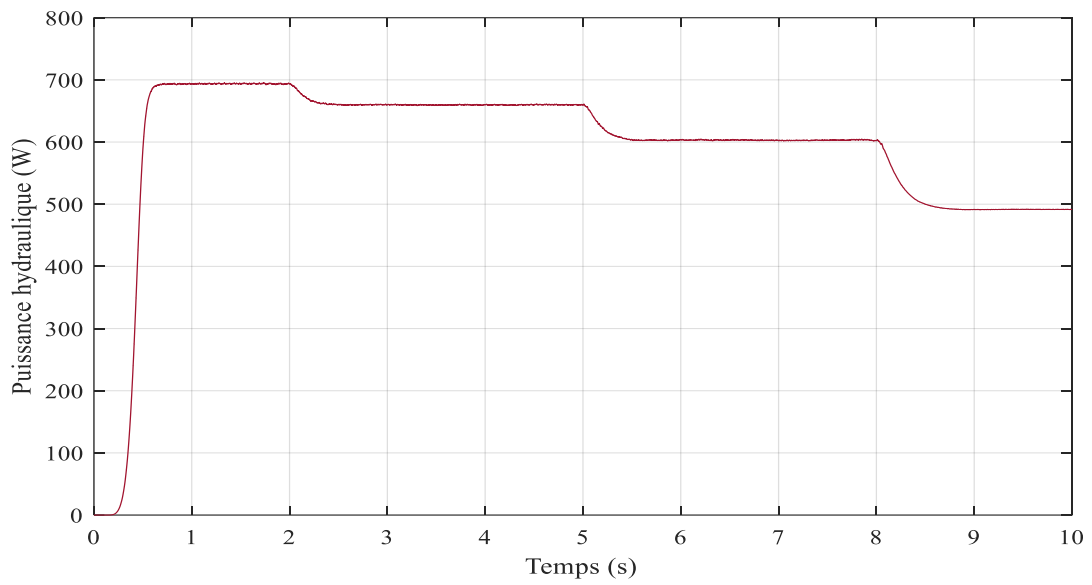


Figure 4.16 : Allure de La puissance hydraulique avec changement d'irradiation.

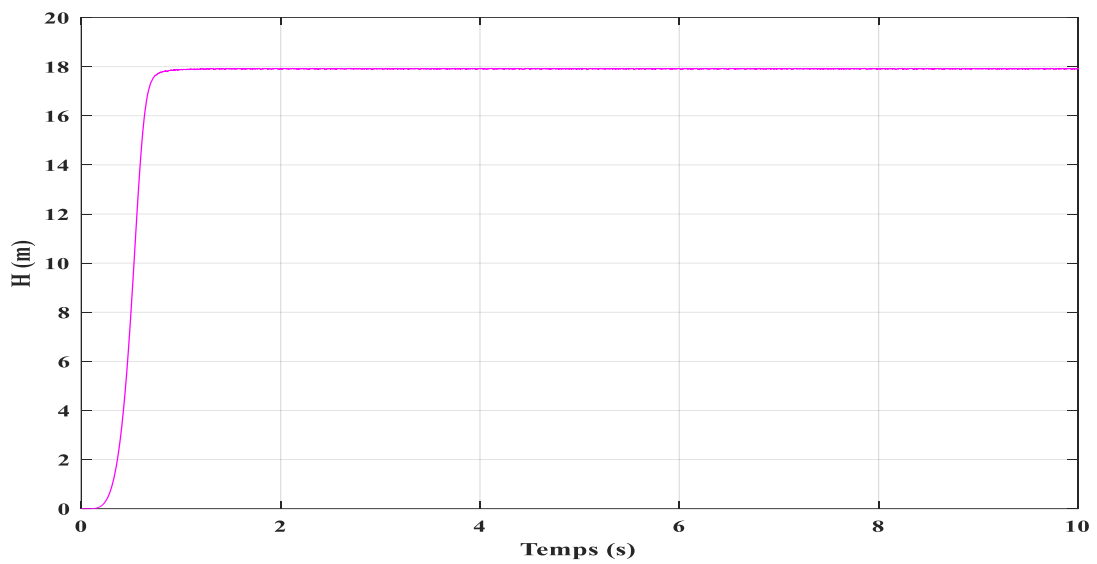


Figure 4.17 : Allure de la HMT en fonction du temps sans changement d'irradiation.

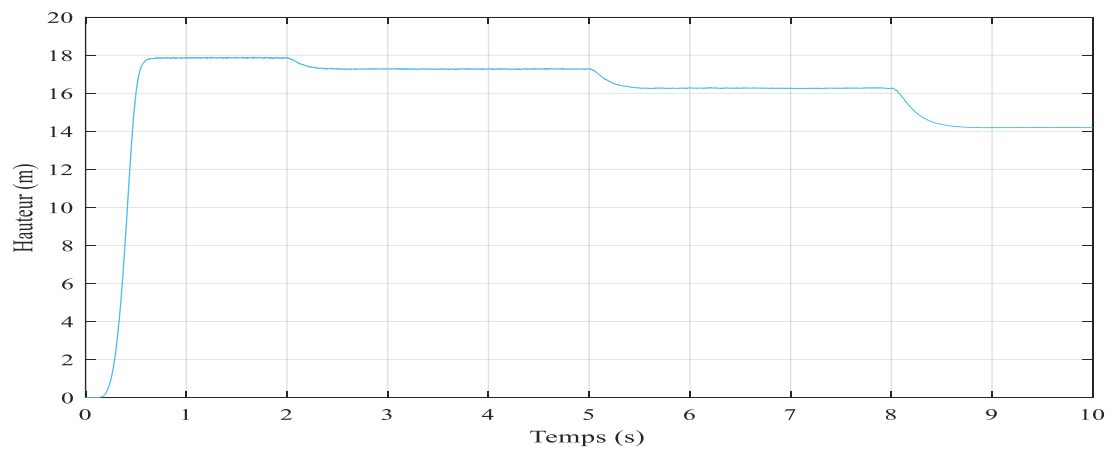


Figure 4.18 : Allure de la HMT en fonction du temps avec changement d'irradiation.

En ce qui concerne les paramètres hydrauliques de la pompe à savoir : la puissance hydraulique et le débit représentées par les figures 4.14 et 4.16 respectivement, Il est clair que le débit et la puissance hydraulique diminuent sensiblement avec la diminution de l'éclairement et on a remarqué également quand la puissance hydraulique a diminué avec la diminution de HMT, le débit est resté constant.

Il est à noter, à l'éclairement de 1000 W/m^2 , HMT à 14 m et le débit de $14 \text{ m}^3/\text{h}$, nous avons effectivement obtenu la puissance hydraulique approximative de 695 W calculée auparavant et cela évidemment justifie notre bon système basée sur l'algorithme P&O.

Le tableau 4.3. Résume la réponse des paramètres de la pompe selon le niveau de l'éclairement :

Irradiance	1000 (W/m^2)	800 (W/m^2)	600 (W/m^2)	400 (W/m^2)
$P_{\text{hyd}}(\text{W})$	695	660	604	492
$Q(\text{m}^3/\text{l})$	14.1	13.9	13.5	12.6

Pour une irradiance constante $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ et on variant uniquement la hauteur

H (m)	18	14	10	6
$P_{\text{hyd}}(\text{W})$	695	542	389	233
$Q(\text{m}^3/\text{l})$	14.1	14.1	14.1	14.1

4.8. Conclusion :

L'objectif de notre étude est la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge qui aspire l'eau pour remplir un réservoir. Nous avons présenté une prédétermination des caractéristiques par simulation du système de pompage photovoltaïque et un dimensionnement pour permettre l'acquisition des compétences pratiques pour faciliter la réalisation de ces systèmes dans ce domaine.

La puissance extraite du panneau dépend fortement de l'éclairement et la météo de la journée. Ceci influe énormément sur les caractéristiques du système de pompage.

Pour l'amélioration de la réponse du système de pompage solaire, avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT, la puissance extraite des GPVs varie pendant la journée, alors que le pompage de l'eau comme le stockage ne doit être fait que durant une période limitée de la journée. Il est nécessaire d'installer un système de gestion du pompage et de la consommation de l'eau durant les périodes les plus favorables.

Les résultats de simulation montrent la robustesse du système de pompage photovoltaïque choisi et la simplicité de la commande utilisée.

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation de notre mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème influence de l'ombrage complet sur le système de pompage photovoltaïque. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT à base de P&O pour obtenir le point de puissance maximale, un convertisseur DC/DC boost statique et un groupe motopompe. Le convertisseur est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge. Le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil.

Le premier chapitre a traité des généralités sur des différents types des panneaux photovoltaïques, le modèle de l'éclairement, l'effets des paramètres climatiques (température, éclairement) sur la sortie du panneau et le différent branchement des panneaux (série et parallèle).

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les convertisseurs statiques, d'abord les DC/DC (hacheurs) avec la modélisation mathématique et sa commande MPPT (perturbé&observé).

Le troisième chapitre a traité la modélisation et simulation de l'association onduleur-machine asynchrone.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons étudié le système de pompage photovoltaïque global avec simulation sous Matlab Simulink.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité de la commande MPPT à base de P&O choisie. On a constaté que la variation de l'irradiance (ombrage complet) sur le système de pompage est plus particulièrement aux basses irradiances, la puissance hydraulique diminue considérablement ainsi que le débit. Mais toutefois notre système a bien réagi à ces variations et les résultats de simulations sont très satisfaisants qui s'accordent parfaitement avec la théorie et les calculs établis sont bien respectés.

Comme perspective, nous souhaitons la continuité de ce travail en tenant compte de l'ombrage partiel pour atténuer les conséquences de l'ombrage complet sur les performances du générateur photovoltaïque et plus précisément sur le système de pompage photovoltaïque.

ANNEXES :

A) Modélisation de la Machine Asynchrone triphasée

1.1. Introduction

Avant toute synthèse de loi de commande, il est indispensable d'analyser le processus à contrôler, d'établir une modélisation adaptée et d'interpréter ses dynamiques propres.

La représentation des processus physiques par des modèles mathématiques est une étape très importante dans l'asservissement des systèmes. En effet, afin d'élaborer une structure de commande, il est important de disposer d'un modèle mathématique représentant de manière satisfaisante les caractéristiques du processus.

Dans notre étude, le processus à contrôler est constitué d'une machine asynchrone triphasée et de son alimentation, assurée par un ensemble de convertisseurs statiques.

Le problème de la modélisation est très important pour la conception et l'analyse des performances statiques et dynamiques du processus. La modélisation de la machine asynchrone triphasée est généralement traitée par la théorie des deux axes qui utilise la théorie de l'espace vectoriel pour le passage d'un système triphasé réel à un système biphasé fictif. Il nous faut donc, un modèle de la machine asynchrone qui permet de simuler son fonctionnement en régime transitoire et qui permet de déboucher sur une commande suivant un schéma de contrôle vectoriel indirect par orientation du flux rotorique.

1.2. Modélisation de la machine asynchrone triphasée

Parmi tous les types de machines à courant alternatif, la machine d'induction, particulièrement le type à cage d'écureuil est la plus utilisée dans l'industrie. Ces machines sont économiques, robustes, et fiables, et sont disponibles dans une gamme de faible puissance à des puissances élevées.

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Figure 1.1 représente les six enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques (a_s , b_s , c_s) à p paires de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $\frac{2\pi}{3}$.

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de

tension ou de courant à fréquence et amplitude réglable.

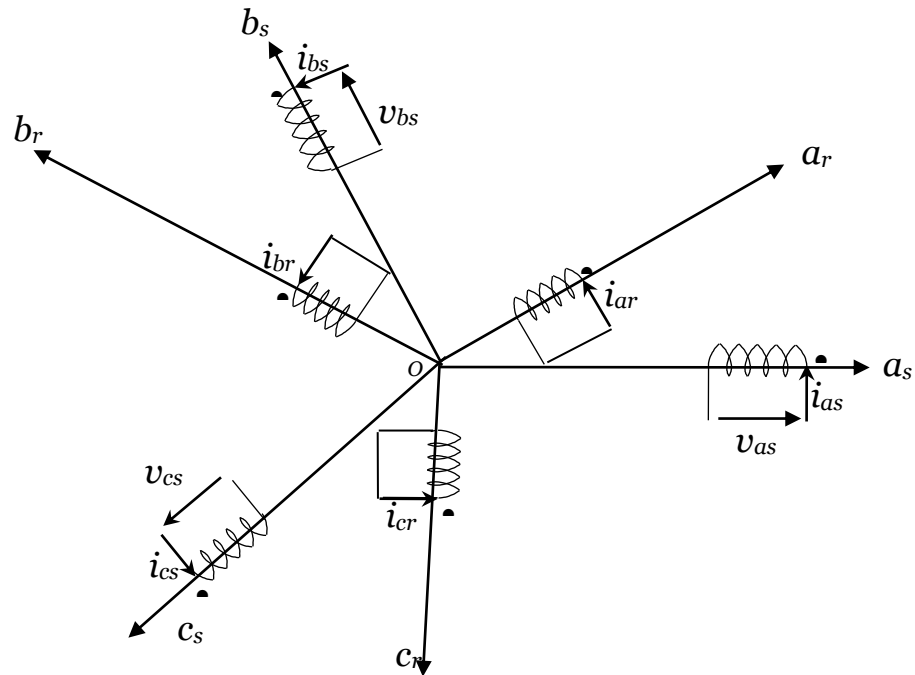


Figure 1.1 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.

La structure électrique du rotor peut-être réalisée par :

- Soit par un système d'enroulements triphasé (rotor bobiné), raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents.
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage).

Il sera admis que la deuxième structure est électriquement équivalente à la première.

1.2.1. Hypothèse de travail

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une force magnéto – motrice (f.m.m.) sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé et on néglige les pertes de fer. De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [DEL 95].

1.2.2. Mise en équations de la machine asynchrone

Le comportement dynamique de la machine asynchrone est caractérisé par trois types de grandeurs : électriques, magnétiques et mécaniques. Ce comportement peut se traduire par trois types d'équations : équations électriques, équations magnétiques et équations mécaniques. Quant aux équations mécaniques, elles seront introduites à la fin de la modélisation de la machine asynchrone.

1.2.2.1. Equations électriques

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

On déduit pour l'ensemble des phases des équations de tensions statoriques et rotoriques écrites sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = R_s [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [v_r] = R_r [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (1-2)$$

avec :

$$\begin{aligned} [v_s] &= [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^t ; [i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t ; [\phi_s] = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^t \\ [v_r] &= [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^t ; [i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t ; [\phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^t \end{aligned}$$

Les trois enroulements a_r, b_r, c_r sont en court – circuit d'où : $[v_r] = [0 \ 0 \ 0]^t$.

1.2.2.2. Equations magnétiques

Les hypothèses précédemment citées, entraînent les relations suivantes entre flux et courants, écrites également sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

Finalement :

$$[v_{abcs}] = [R_s][i_{abcs}] + (d/dt) \{ [L_s][i_{abcs}] + [M_{sr}][i_{abcr}] \} \quad (1-6)$$

$$[v_{abcr}] = [R_r][i_{abcr}] + (d/dt) \{ [M_{sr}]^t[i_{abcs}] + [L_r][i_{abcr}] \} \quad (1-7)$$

1.3 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de base faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes « d » et « q ».

Ainsi, les enroulements statoriques S_a, S_b, S_c et les enroulements rotoriques R_a, R_b et R_c sont remplacés respectivement par deux enroulements statoriques d_s, q_s et deux enroulements rotoriques d_r, q_r . La figure (1.2) permet de définir les divers référentiels et les relations spatiales qui les lient.

On désigne par :

d : axe direct.

q : axe en quadrature.

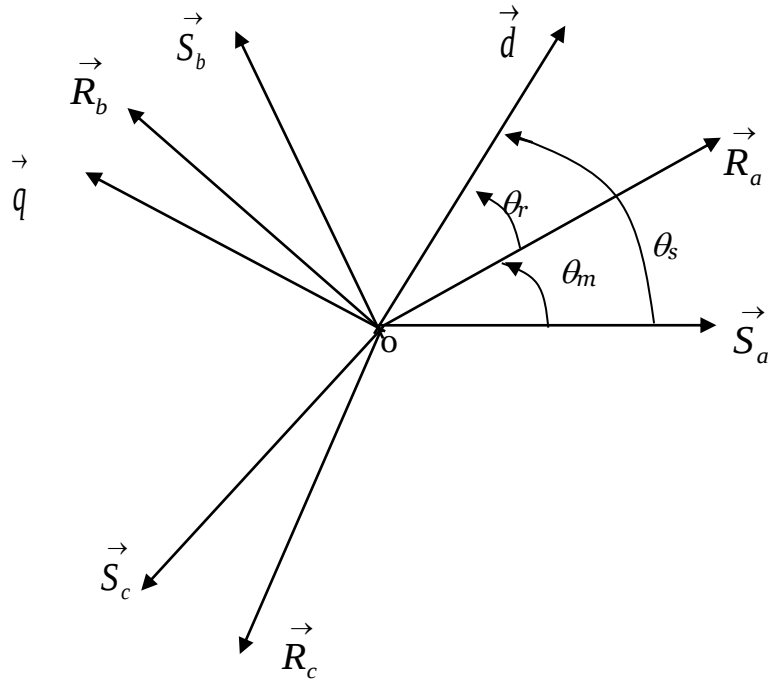


Figure 1.2 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

n

remarque sur la figure (1.2) que θ_s et θ_r sont naturellement liés à θ_m par la relation rigide :

$$\theta_m = \theta_s - \theta_r \quad (1.8)$$

et par suite :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (1.9)$$

Dans la transformée initiale de Park, on définit une matrice unique de transformation qui est la suivante :

$$P(\theta_s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Et son inverse est défini par :

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

(1.11)

La transformée de Park permet en général, le passage du système triphasé par a , b , c à un système diphasé d , q quelques soient les grandeurs électriques ou électromagnétiques (flux, courant et tension). La transformation des grandeurs statoriques ainsi est définie par :

$$[i_{dq}] = [p(\theta_s)][i_{abc}] \quad (1.12)$$

$$[v_{dq}] = [p(\theta_s)][v_{abc}] \quad (1.13)$$

$$[\phi_{dq}] = [p(\theta_s)][\phi_{abc}] \quad (1.14)$$

La matrice $[p(\theta_s)]$ représente la matrice de transformation appliquée au stator.

La transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

1.4. Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK

1.4.1. Équations des tensions

Les équations de Park statoriques et rotoriques , s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases}$$

(1.15)

avec $v_{dr} = 0$ et $v_{qr} = 0$

1.4.2. Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d,q qui dépendent des objectifs de l'application:

- a) Axes tournants à la vitesse du rotor ($\theta_r = 0$) : étude des grandeurs statoriques,
- b) Axes liés au stator ($\theta_s = 0$) : étude des grandeurs rotoriques,
- c) Axes solidaires du champ tournant : étude de la commande.

La conception du control vectoriel par orientation du flux nécessite le choix (c) et les modèles d'actions dépendent de la position du repère par rapport aux divers axes du flux.

On désigne par $\omega_s = d\theta_s / dt$, la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère statorique (S,abc) et par $\omega_r = d\theta_r / dt$, la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère rotorique (R,abc).

1.4.2.1. Dans un référentiel lié au stator

Ce référentiel est noté (α, β) , il se traduit par les conditions $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m$

D'où les équations électriques suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \left(\frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} \right) \\ v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \left(\frac{d\phi_{\beta s}}{dt} \right) \\ 0 = R_r i_{\alpha r} + \left(\frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} \right) + \omega_r \phi_{\beta r} \\ 0 = R_r i_{\beta r} + \left(\frac{d\phi_{\beta r}}{dt} \right) - \omega_r \phi_{\alpha r} \end{array} \right. \quad (1.16)$$

1.4.2.2. Dans un référentiel lié au rotor

Ce référentiel est noté (X, Y) , il se traduit par les équations :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0.$$

d'où les équations électriques :

$$\begin{cases} v_{Xs} = R_s i_{Xs} + \left(\frac{d \phi_{Xs}}{dt} \right) - \omega_m \phi_{Ys} \\ v_{Ys} = R_s i_{Ys} + \left(\frac{d \phi_{Ys}}{dt} \right) + \omega_m \phi_{Xs} \\ 0 = R_r i_{Xr} + \left(\frac{d \phi_{Xr}}{dt} \right) \\ 0 = R_r i_{Yr} + \left(\frac{d \phi_{Yr}}{dt} \right) \end{cases} \quad (1.17)$$

Ce référentiel peut être intéressant dans les problèmes de régimes transitoires ou la vitesse de rotation est considérée comme constante.

1.4.2.3. Dans un référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est noté (d, q) , il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s ; \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_m = p\Omega \quad (1.18)$$

$$\text{d'où } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m = \omega_{gl}$$

où ω_{gl} est la pulsation de glissement.

Donc, les équations électriques (1.15) s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \left(\frac{d\phi_{ds}}{dt} \right) - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \left(\frac{d\phi_{qs}}{dt} \right) + \omega_s \phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \left(\frac{d\phi_{dr}}{dt} \right) - \omega_{gl} \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \left(\frac{d\phi_{qr}}{dt} \right) + \omega_{gl} \phi_{dr} \end{cases} \quad (1.19)$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

Dans la suite de notre travail nous allons opter pour ce référentiel.

La figure (1.3) montre les différents référentiels qu'on a définis auparavant :

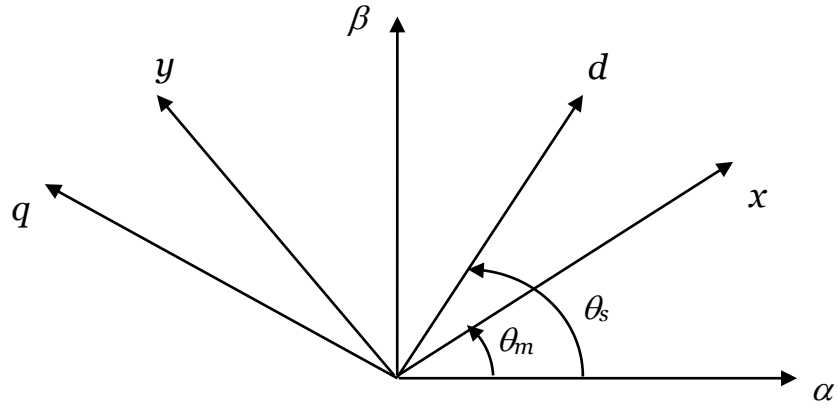


Figure 1.3 : Représentation des différents

1.4.3 Équations des flux :

Les composantes de Park des flux statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases}$$

(1.20)

Avec: $L_s = l_s - M_s$

$$L_r = l_r - M_r$$

$$M = 3/2 M_{sr}$$

En développant les flux en fonction des courants dans l'équation 1.19, on obtient les équations électriques de la machine asynchrone dans le repère d'axes d, q :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left(\frac{d}{dt} \right) & -L_s \omega_s & M \left(\frac{d}{dt} \right) & -M \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s + L_s \left(\frac{d}{dt} \right) & M \omega_s & M \left(\frac{d}{dt} \right) \\ M \left(\frac{d}{dt} \right) & -M \omega_{gl} & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt} \right) & -L_r \omega_{gl} \\ M \omega_{gl} & M \left(\frac{d}{dt} \right) & L_r \omega_{gl} & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

(1.21)

1.4.4. Représentation d'état de PARK

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = f(x, u, t) \\ Y = g(x, u, t) \end{cases}$$

(1.22)

avec :

X : Vecteur d'état.

U : Vecteur d'entrée.

Y : Vecteur de sortie.

Différentes possibilités sont offertes pour le choix du vecteur d'état. Parmi ces choix, nous citons :

$$\begin{aligned} X &= (\phi_{ds} \quad \phi_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qs})^t \\ X &= (i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr})^t \\ X &= (\phi_{ds} \quad \phi_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr})^t \\ X &= (i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr})^t \end{aligned}$$

(1.23)

Dans notre étude, nous choisissons le vecteur d'état suivant :

$$X = (i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr})^t \quad (1.24)$$

L'équation (1.21) peut s'écrire donc sous la forme suivante :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (1.25)$$

avec :

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & \omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_m \\ -\left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_m\right) & -\frac{1}{\sigma T_s} & \frac{-M}{\sigma L_s} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_m & -\frac{1}{\sigma T_r} & \omega_s - \frac{1}{\sigma} \omega_m \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_m & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad U = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\text{où} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$$

1.4.5. Couple électromagnétique

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il en résulte plusieurs expressions toutes égales (où p est le nombre de paires de pôles) en appliquant les

différents flux statoriques et rotoriques.

$$C_e = (3/2)pM(i_{dr}i_{qs} - i_{ds}i_{qr}) \quad (1.26)$$

$$C_e = (3/2)p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr}i_{qs} - \phi_{qr}i_{ds}) \quad (1.27)$$

$$C_e = (3/2)p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \quad (1.28)$$

$$C_e = (3/2)p(\phi_{qr}i_{dr} - \phi_{dr}i_{qr}) \quad (1.29)$$

$$C_e = (3/2)p \frac{M}{\sigma L_s L_r} (\phi_{dr}\phi_{qs} - \phi_{ds}\phi_{qr}) \quad (1.30)$$

C'est la première expression que nous allons utiliser pour la modélisation de la machine asynchrone et la deuxième expression sera utilisée dans la commande vectorielle.

1.4.6. Equation mécanique

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire:

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (1.31)$$

Où C_e représente le couple moteur appliqué, C_r le couple résistant, J le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes et f le coefficient de frottement. On obtient ainsi la vitesse en appliquant la transformée de Laplace :

$$\Omega = \frac{C_e - C_r}{Js + f} \quad (1.32)$$

où s représente la variable de Laplace.

Cette équation montre que le contrôle de la vitesse passe par le contrôle du couple.

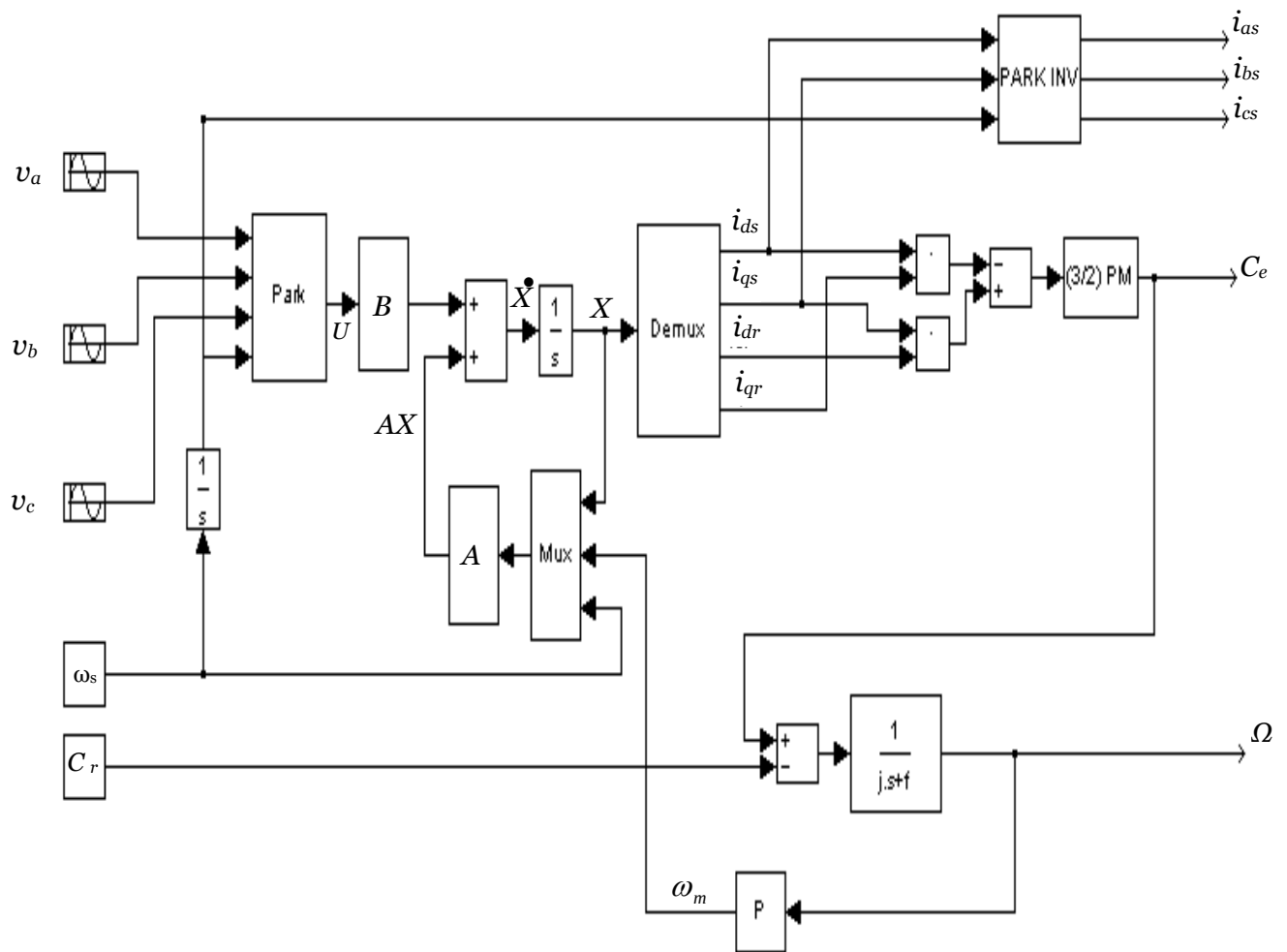


Figure 1.4 Modèle MATLAB/SIMULINK de la machine asynchrone

B) Paramètres du moteur asynchrone

La puissance nominale	1.5 Kw
La vitesse nominale	1438 tr/mn
La résistance du stator	4.850Ω
Inductance du stator	0.274H
La résistance du rotor	3.805Ω
Inductance du rotor	0.274 H
La résistance mutuelle	0.258 H
Le moment d'inertie	0.031 kg.n.m ²
Le nombre de pair des pôles	2

Bibliographie

(Chapitre 01):

- [1]: Antonio Luque, Steven Hegedus, 'Handbook of Photovoltaic Science and Engineering', ISBN 0-471-49196-9, 2003.
- [2]: Mekemeche Abdelkader, 'Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes', Rapport de thèse de doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 04/07/2017.
- [3]: Roger A. Messenger, Jerry Ventre, 'Photovoltaic Systems Engineering', second edition. This edition published in the Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [4]: Paulescu, Marius, et al, 'Weather modeling and forecasting of PV systems operation', Springer Science & Business Media, 2012.
- [5]: L.M. Fraas, 'Low-cost solar electric power', Springer International Publishing Switzerland 2014.
- [6]: David Réaux 'Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface', Rapport de thèse de doctorat, l'université Paris-sud, le 30 juin 2017.
- [7]: Zegarmansour, 'Optimisation de l'association gpv- onduleur multi niveau', rapport de thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016 / 2017.
- [8]: M. Angel Cid Pastor, 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques', Rapport de thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 29 septembre 2006.
- [9]: Abderrezek Mahfoud, 'Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement', Rapport de thèse de doctorat, L'université de Sétif 1, le 18/02/2015
- [10]: Mohamed Ansoumane Camara, 'Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs', rapport de thèse de doctorat, l'université Paris Est Créteil, 4 juillet 2011.
- [11]: Dariga Meekhun, 'Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéroboutique', rapport de thèse de doctorat, L'université de Toulouse.

- [12]: Sahin, Mustafa Ergin, and Halil İbrahim okumuş, 'Physical structure, electrical design, mathematical modeling and simulation of solar cells and modules', Turkish Journal of Electromechanics and Energy 1.1 (2016).
- [13]: Omar ibrahimElmi, 'Nouvelles structurez de cellules solaires à base de silicium : Texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion', rapport de thèse dedoctorat, L'université de Lille 1, Le30 Mars 2017.
- [14]: Bagher, Askari Mohammad, Mirzaei Mahmoud AbadiVahid, and MirhabibiMohsen, 'Typesof solar cells and application', American Journal of optics and Photonics 3.5 (2015): 94-113.
- [15]:Bellia, Habbati, RamdaniYoucef, and Moulay Fatima , 'A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB', NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics 3.1 (2014): 53-61.
- [16]:Celik, AliNaci, and Nasır Acikgoz , 'Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models', Applied energy 84.1 (2007): 1-15
- [17]: Manuel Godinho Rodrigues, Eduardo, et al, 'Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity', Energies 11.11 (2018): 2902.
- [18]: Brahamiimensouhilaepousebousmaha , 'Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires', rapport de thèse de doctorat ,L'universitédjillaliliabes de sidi-bel-abbes, En 2018.
- [19]: Mohamed Arrouf, ' Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompebranche sur un générateurphotovoltaïque', rapport de thèse de doctorat, l'universitémentouri de Constantine, le 25/12/2007.
- [20]: Jimmy Royer, Thomas Djiako,Eric Schiller et BocarSadaSy, 'Le Pompage Photovoltaïque', Publ. en collab. avec : IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA,ISBN 2-89481-006-7.
- [21]: Mohamed Djarallah, ' Contribution a l'étude des systèmesphotovoltaïquesrésidentiels couples au réseaelectrique', rapport de thèse de doctorat, l'université de Batna, le 16 / 01 /2008.
- [22]: SoltaneSoltanebelakehal, ' Conception et Commande des Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux EnergiesRenouvelables ', rapport de thèse de doctorat, l'universite de Constantine, le 10/06/ 2010.

(Chapitre2):

- [1] Muhammad Harunur Rashid, " Power Electronics : Circuits, Devices an Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersy 07632, 2004.
- [2] B.K. Bose,« Power Electronics and AC drives», Prentice-Hall, Inc. 1986, pp-402.
- [3] Séguier. G, Francis. L, and Philippe. D, 'Electronique de puissance'. Edition DUNOD.1999.
- [4]Masri. S, and Chan. P.W, 'Design and development of a dc-dc Boost converter with constant output voltage'.In Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), International Conference on (pp. 1-4).IEEE.2010.
- [5] Salas. V, Olias. E, Barrado. A, and Lazaro. A, 'Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems '.Solar energy materials and solar cells 90.11: 1555-1578. 2006.
- [6]Ayache. Z, Bendaoud. A, Slimani. H, Benazza. B, Miloudi. H, and Bentaallah. A, 'Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque par la logique floue'. International Conference on Electrical Networks (ICEN), Sidi Bel-Abbès. 2010.
- [7]Alsumiri. M. A, Jiang. L, and Tang. W. H , 'Maximum power point tracking controller for photovoltaic system using sliding mode control'. 7-3.2014. Bibliographie
- [8] Singh. S, Mathew. L, and Shimi. S. L, 'Design and simulation of intelligent control MPPT technique for PV module using MATLAB/SIMSCAPE'.Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng 2: 4554-4566.2013.
- [9] Abbes. H, Abid. H, Loukil. K, Toumi. A, and Abid. M, 'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'. Revue des Energies Renouvelables 17.3: 435-445.2014.
- [10]Tumma, A, and Balasubramanian. V.G , 'Study on using maximum power point algorithms to improve the efficiency of solar energy storage for unmanned aerial vehicles'. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication 1.8 2: 49-54.2013.
- [11]Cabal. C,' Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque'. Rapport de thèse, université de Toulouse 3-Paul Sabatier. 2008.
- [12]Faranda. R, and Leva. S, 'Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems', WSEAS transactions on power systems 3.6: 446-455.2008.
- [13]Ngan. M. S, and Tan. C. W, 'A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems.IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC) (pp. 22-27). 2011.

[14] Aouchiche. N, Cheikh. M. A, and Malek. A, 'Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation '.Revue des Energies Renouvelables 16.3: 485-498.2013.

[15]Mekhloufi .M, Dris. K, and Salem. A, 'Optimisation de la production d'un GPV par différentes techniques MPPT'.L' université Ammar Teliji Laghouat .2009.

(Chapitre3):

[1]G. Segulier, F. Labrique, R. Baussier, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », Volume 4, Technique et documentation, Lavoisier 1995.

[2] B.K. Bose, «Modern Power Electronics and AC drives », Prentice-Hall, Inc. 2002, pp.573-574.

[3]B.K. Bose, « Power Electronics and AC drives», Prentice-Hall, Inc. 1986, pp-402.

[4]R.M.Haroun Power Electronics, Circuits, Devices and Applications. Prentice Hall, Inc 1988.

[5]T.A. Sakharuk, A.M. Stanković, G. Tadmor, « Modeling of *PWM* inverter-supplied AC Drives at low switching frequencies », IEEE, Trans. Ind. Electc, Vol 49, N°.5, May 2002.

[6] : Pr.A. Meroufel, « *Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique* », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2004.

[7] Pr.A. Meroufel, « *Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique* », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2004.

(Chapitre4):

[1] M.Degla et B.Ben Ahmed, « *Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque* » ; Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.

[2] F.Bendioudi et F.Lakhdari, « *Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries* » ; Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa,

[3] F.Bendioudi et F.Lakhdari, « *Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries* » ; Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2014..

[4] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.

