



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA

جامعة باجي مختار – عنابة

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Electrotechnique Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : électrotechnique

Spécialité : commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Étude d'un système d'irrigation alimenté par générateur PV avec stockage de l'énergie

Présenté par : *HASHAS Yacine*

GUERFA Abderraouf

Encadrant : *Dr. SOLTANI Fatma*

MCA

Université Badji Mokhtar-

ANNABA

Jury de Soutenance :

Pr. OURICI Amel

Dr. CHINE Abdelghani

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Madame SOLTANI Fatma**, encadreuse de ce mémoire, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien tout au long de ce travail. Son encadrement bienveillant et rigoureux a grandement contribué à l'aboutissement de ce projet, et nous lui en sommes sincèrement reconnaissants.*

Nos remerciements les plus chaleureux vont également à nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience, leurs prières et leur soutien constant, qui ont été une source essentielle de motivation et de force.

Nous remercions tout particulièrement nos frères et sœurs, dont les paroles, les écrits, les encouragements et le soutien moral ont guidé nos réflexions et nous ont poussés à persévérer.

Nos pensées reconnaissantes s'adressent également à tous nos collègues de la promotion, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont apporté aide, conseil, motivation ou amitié sincère. À toutes et à tous, nous exprimons notre profonde reconnaissance, notre respect et notre gratitude.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un amour profond et éternel : à celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoir, a ma source d'amour et de tous les sentiments fragiles, a celle qui m'a encouragé les jours pour finir mes études et réaliser mes rêves, A celle qui m'a bénie par ses prières ma très chère mère Nafisa.

A celui qui a sacrifié sa vie pour notre confort et bien-être, mon support, mon guide dans cette vie mon père nour eddine.

A mes joies, mes yeux, mes perles, mes soutiens dans ce monde mes sœurs Sara et rayne .

A toute personne que j'aime

HASHAS Yacine

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un amour profond et éternel : à celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoir, a ma source d'amour et de tous les sentiments fragiles, a celle qui m'a encouragé les jours pour finir mes études et réaliser mes rêves, A celle qui m'a bénie par ses prières ma très chère mère meriem.

A celui qui a sacrifié sa vie pour notre confort et bien-être, mon support, mon guide dans cette vie mon père zinedinne.

A mes joies, mes yeux, mes perles, mes soutiens dans ce monde mes sœurs soumia et khaoula.

A toute personne que j'aime

GUERFA Abderraouf

Sommaire

REMERCIEMENTS	1
DEDICACE.....	2
Sommaire.....	4
Liste des figures et tableaux	8
Résumé	10
ملخص.....	10
Abstract	11
Introduction générale	13
I.1 Introduction	15
I.2 Définition de l'énergie renouvelable.....	15
I.3 Les différents types de l'énergie renouvelable.....	16
I.3.1 Énergie éolienne	16
I.3.2 Les énergies marines	16
I.3.3 Énergie géothermique :	17
I.3.4 Énergie photovoltaïque	18
I.4 Avantages et inconvénients comme source d'énergie électrique.....	19
I.4.1 Avantage.....	19
I.4.2 Inconvénients	19
I.6 Conclusion :.....	20
II.1. Introduction	22
II.2. Le gisement solaire en Algérie :	22
II.3. Énergie solaire et Effet photovoltaïque :	23
II.4. Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur :	24
II.5. La cellule photovoltaïque :	25
Définition :	25
II.6. Les différents types de cellules :	25
II.6.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	25
a) Avantages :	25

b) Inconvénients :	25
II.6.2. La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin	26
a) Avantages :	26
b) Inconvénients :	26
II.6.3. La cellule au silicium amorphe	26
a) Avantages :	26
b) Inconvénients :	26
II.6.4. La cellule photovoltaïque tandem	27
a) Avantage :	27
b) Inconvénient :	27
II.6.5. La cellule en couche mince de tellurure de cadmium	27
II.6.6. La cellule photovoltaïque multi-jonction	27
II.7. La structure d'une cellule photovoltaïque :	27
II.8. Description de la cellule :	28
II.9. Principe de fonctionnement:	28
II.10. Module solaire photovoltaïque :	29
II.11. Association de cellules PV :	29
II.11.1. Association série :	29
II.11.2. Association en parallèle :	30
II.11.3. Association en série/parallèle :	31
III.1 Introduction	33
III.1 Modalisation de cellule photovoltaïque :	33
III.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque	35
III.2.1 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque	35
III.2.2 Simulation	35
III.3 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement constante	36
III.4 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable	38
III.4.1 L'influence de l'éclairement	38
III.4.2 L'influence de la température	39
III.4.3 L'influence de la résistance série R_s et parallèle R_p	41
III.5 Convertisseur (DC/DC) :	41

III.5.1	Convertisseur Boost	41
III.5.2	Modélisation de l'hacheur Boost :	42
III.6	La méthode de Perturbation et Observation (P&O) :	43
III.6.1	Principe de la commande P&O :	43
III.7	Simulation :	44
III.7.1	schéma de simulation du panneau photovoltaïque mini d'une commande MPPT :	44
III.7.2	Discussions des résultats de la simulation :	47
III.8	Conclusion	48
IV.1	Introduction :	50
IV.2	Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :	50
IV.2.1	Bus continues (DC bus) :	50
IV.2.2	Gestionnaire de puissance (PMS) :	51
III.1.1	Choix de moteur asynchrone :	51
III.1.1	Choix de la batterie :	51
III.2	Définition de l'onduleur :	52
III.3	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	52
III.4	Modélisation de l'onduleur triphasé :	53
III.5	Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)	54
III.6	Commande MLI sinus – triangle	55
III.7	Avantages de la commande MLI :	55
III.8	Modélisation de la Machine asynchrone :	55
III.8.1	. Introduction :	55
III.9	Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique :	55
III.10	Mise en équations de la machine asynchrone :	56
III.10.1	Equations électriques	56
III.10.2	Équations magnétiques	57
III.10.3	Équations mécaniques :	58
III.11	Modélisation diphasée de la Machine asynchrone :	59
III.11.1	Transformation de Park :	59
III.11.2	Les avantages de cette transformation :	59
III.11.3	Équations électriques dans le repère de PARK :	59

III.11.4	Choix de référentiel :	59
III.11.4.1	Référentiel lié au stator	60
III.11.4.2	Référentiel lié au rotor	60
III.11.4.3	Référentiel lié au champ tournant :	60
III.12	Modélisation électrique de la batterie:	61
III.13	Classification générale des pompes :	61
III.13.1	Principe de fonction d'une pompe centrifuge	62
III.13.2	Modèle de la pompe centrifuge :	62
III.14	Simulation du système :	63
III.14.1	Représentation de la simulation Commande MLI sinus-triangle de l'onduleur :	63
III.14.2	Interprétation des résultats :	65
III.14.3	Simulation du modèle de la machine asynchrone :	65
III.14.4	Résultats de la simulation :	67
III.14.5	Interprétation des résultats de simulation :	69
III.14.6	Simulation de la batterie:	69
III.14.7	Résultats de simulations :	69
III.15	Gestion de l'énergie entre les différents composants du système :	70
III.16	Allure de différentes puissances.	72
	Répartition horaire de la demande énergétique	72
	Comportement du système selon les résultats de simulation	72
III.17	Conclusion	73
	Conclusion générale	75
	Références bibliographique	76

Liste des figures et tableaux

Figure I.1 Énergie éolienne	16
Figure I-2 Les énergies marines	17
Figure I 3 énergie géothermique	17
Figure I 4 énergie photovoltaïque.....	18
Figure II 1 Carte des radiation en Algérie	22
Figure II.2 association série	30
Figure II.3 association parallèle	31
Figure III 1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle Error! Bookmark not defined.	
Figure III.2 les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle. Error! Bookmark not defined.	
Figure. III.4 Schéma de simulation d'un PV	36
Figure III.5 caractéristique $I=f(v)$ d'un panneau solaire	37
Figure III.6 caractéristique $P=f(v)$ d'un panneau solaire	37
Figure III.7.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes irradiances solaires à température constante égale à 25°C.	38
Figure III.7.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairagements solaires à température constante égale à 25°C.	39
Figure III.8.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairage constant égal à 1000 w/m ²	40
Figure III.8.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairage constant égal 1000 w/m ²	40
Figure III. 9: Schéma Bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT	44
Figure III. 10: l'irradiation constante (W/m ²)	44
Figure III. 11: Tension de sortie de panneaux PV	45
Figure III. 12: Courant de sortie de panneaux PV	45
Figure III. 13: la puissance maximale donnée par panneaux PV pour un éclairage constant ...	45
Figure III. 14: Température constante $T=25^{\circ}\text{C}$	46
Figure III. 15: Variation de l'irradiation (W/m ²).....	46
Figure III. 17: Effet de changement d'éclairage (W/m ²)	46
Figure III. 18: Effet de changement d'éclairage (W/m ²) zoom	47
Figure IV. 1: principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec stockage de l'énergie par batteries	50
Figure IV. 2: Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé	53
Figure IV. 4: Schéma d'une machine asynchrone triphasée	56
Figure IV. 5: Modèle R-C de la batterie.	61
Figure IV.2 bloc SIMULINK de la pompe centrifuge.....	62
Figure IV. 3: Bloc de simulation du modèle global de MLI-Onduleur.....	63
Figure IV. 4: Illustration de la MLI sinus-triangle	63
Figure IV. 5: tension et le Zoom de la tension composé de sortie de l'onduleur	64

Figure IV. 6: les courants de sortie de l'onduleur	64
Figure IV. 7: Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur (m=45) ...	65
Figure IV. 8: Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur (m=19)	Error! Bookmark not defined.
Figure IV. 9:Schéma de simulation de la Machine asynchrone	66
Figure IV. 10: schéma bloc du modèle de la machine asynchrone.....	66
Figure IV. 11: le courant statorique en fonction du temps (démarrage à vide).....	67
Figure IV. 12: le flux en fonction du temps (démarrage à vide)	67
Figure IV. 13: le couple en fonction du temps (démarrage à vide)	67
Figure IV. 14: la vitesse en fonction du temps (démarrage à vide)	67
Figure IV. 15: le courant statorique en fonction du temps (en charge)	68
Figure IV. 16: le flux en fonction du temps (en charge).....	68
Figure IV. 17: le couple en fonction du temps (en charge)	68
Figure IV. 18: la vitesse en fonction du temps (en charge)	68
Figure V.19 simulation de batterie	69
Figure IV. 20: Débit d'une pompe centrifuge	69
Figure IV. 21: Hauteur d'une pompe centrifuge.....	70
Figure IV. 22:Organigramme de gestion d'énergie du système globale.....	70
FigureIV.23 allure	72

Résumé

L'énergie solaire représente une solution particulièrement adaptée aux sites isolés, notamment pour des applications telles que le pompage d'eau avec stockage d'énergie. Elle offre un espoir considérable aux populations des pays en développement qui souffrent d'un accès limité ou inexistant à l'eau potable. Cependant, les générateurs photovoltaïques présentent deux inconvénients majeurs : un rendement relativement faible et une production d'énergie instable, soumise aux variations de l'ensoleillement.

Afin d'optimiser l'efficacité de ces systèmes, il est essentiel d'assurer une adaptation optimale entre le générateur solaire et la charge. L'intégration d'un algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) permet d'en extraire la puissance maximale à tout moment.

Ce mémoire porte sur la modélisation et la simulation d'un système d'irrigation alimenté par une source photovoltaïque avec stockage d'énergie. Le système étudié comprend plusieurs composants interconnectés : un générateur photovoltaïque équipé d'une commande MPPT, un onduleur de tension, un moteur asynchrone couplé à une pompe centrifuge, ainsi qu'un dispositif de stockage par batterie.

Mots-clés : Énergie solaire, Panneaux photovoltaïques, Modélisation, Simulation, Suivi du point de puissance maximale (MPPT), Pompe centrifuge, Commande MLI, Convertisseur Boost, Stockage d'énergie, Batterie.

ملخص

تُعدّ الطاقة الشمسية حلاً مناسباً جداً للمناطق المعزولة، خاصةً في تطبيقات مثل ضخ المياه مع تخزين الطاقة، وهي توفر أملاً كبيراً للسكان في الدول النامية الذين يعانون من ضعف أو انعدام الوصول إلى مياه الشرب. ومع ذلك، فإن المولدات الكهروضوئية تعاني من عيبين رئيسيين، هما انخفاض كفاءتها، وتقلب قدرتها الإنتاجية الناتجة عن تغير الإشعاع الشمسي.

ومن أجل تحسين أداء هذه الأنظمة، من الضروري تحقيق توافق مثالي بين المولد الشمسي والحمل، التي تسمح باستخلاص أقصى طاقة (MPPT) وتستخدم لهذا الغرض تقنيات تعقب نقطة القدرة القصوى ممكنة في كل لحظة.

يتناول هذا المذكرة نمذجة ومحاكاة نظام ري يعمل بالطاقة الشمسية مع تخزين للطاقة. ويتكوّن النظام من ، عاكس للجهد، محرك غير متزامن MPPT عدة مكونات مترابطة، تشمل: مولد كهروضوئي مزوّد بتحكم مرتبط بمضخة طرد مركزي، بالإضافة إلى بطارية لتخزين الطاقة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الألواح الكهروضوئية، النمذجة، المحاكاة، تعقب نقطة القدرة القصوى ، التخزين، البطارية Boost، محول MLI، مضخة طرد مركزي، التحكم بطريقة (MPPT).

Abstract

Solar energy represents an ideal solution for remote areas, particularly for applications such as water pumping with energy storage. It offers significant hope for populations in developing countries who suffer from limited or no access to clean drinking water. However, photovoltaic (PV) generators face two main drawbacks: relatively low efficiency and unstable energy production due to variations in solar irradiance.

To optimize the performance of these systems, it is essential to ensure proper matching between the solar generator and the load. Integrating a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm allows the system to extract the maximum possible power at any given time.

This thesis focuses on the modeling and simulation of an irrigation system powered by a photovoltaic source with energy storage. The studied system consists of several interconnected components, including: a photovoltaic generator equipped with MPPT control, a voltage inverter, an asynchronous motor coupled with a centrifugal pump, and a battery storage unit.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic panels, Modeling, Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Centrifugal pump, PWM control, Boost converter, Energy storage, Battery.

Introduction Générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se régénèrent naturellement et sont considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Elles comprennent l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, leur exploitation génère peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait des alternatives essentielles pour lutter contre le changement climatique et réduire la dépendance aux ressources épuisables.

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui provient du rayonnement solaire. Elle est obtenue en convertissant la lumière du soleil en électricité ou en chaleur à l'aide de dispositifs tels que les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, et les concentrateurs. L'exploitation de l'énergie solaire présente de nombreux avantages : elle est propre, durable et disponible dans le monde entier, ce qui en fait une alternative attrayante aux sources d'énergie traditionnelles non renouvelables. Elle contribue à réduire la pollution atmosphérique, à lutter contre le changement climatique et à préserver l'environnement. Elle offre également une indépendance et une sécurité énergétique incitant de nombreux pays à adopter cette solution pour répondre à leurs besoins énergétiques et cheminer vers une économie verte.

L'Algérie, avec ses vastes étendues désertiques et un ensoleillement exceptionnel tout au long de l'année, possède un potentiel considérable pour devenir un leader dans le domaine de l'énergie solaire. Ce pays d'Afrique du Nord se positionne de plus en plus comme un acteur majeur dans la transition énergétique mondiale, cherchant à diversifier ses ressources énergétiques et à réduire sa dépendance aux hydrocarbures.

L'inconvénient de l'énergie photovoltaïque est qu'elle est fluctuante et dépend des conditions climatiques (éclairage, température) ; la commande MPPT optimise la production d'énergie des panneaux photovoltaïques en ajustant en temps réel le point de fonctionnement pour extraire la puissance maximale disponible.

L'utilisation d'un système photovoltaïque, pour l'alimentation des charges de nature alternative tel que le moteur asynchrone induit l'intégration d'un onduleur de tension et de filtres pour améliorer la qualité de l'énergie électrique

Le stockage est essentiel pour gérer l'intermittence de la production solaire. Les solutions incluent les batteries lithium-ion, permettant de stocker l'énergie excédentaire produite pendant la journée pour une utilisation nocturne ou lors de périodes nuageuses.

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables

I.1 Introduction

On désigne par énergies renouvelables l'ensemble des ressources énergétiques qui ne s'épuisent pas à l'échelle humaine, disponibles de manière quasi illimitée, généralement gratuite et respectueuse de l'environnement. Une source d'énergie est qualifiée de renouvelable en raison de sa capacité à être utilisée sans se tarir. Les technologies associées à ces énergies promettent une production énergétique propre et abondante, tirée de ressources naturellement renouvelées comme le soleil, le vent, l'eau, la biomasse ou la chaleur du sol.

L'intérêt croissant pour le développement des énergies renouvelables repose sur plusieurs facteurs : la problématique du changement climatique, la hausse constante de la consommation d'énergie, la raréfaction des ressources fossiles et le faible rendement énergétique observé, notamment dans les pays développés.

Les énergies renouvelables représentent des sources durables, accessibles et non polluantes, mais leur usage peut comporter des bénéfices tout comme certains inconvénients qu'il convient de prendre en compte.

I.2 Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables correspondent à des sources d'énergie issues de phénomènes naturels capables de se reconstituer rapidement à l'échelle du temps humain. Parmi elles figurent l'énergie solaire, l'éolien, l'hydroélectricité, la géothermie ainsi que la biomasse. Ces formes d'énergie sont qualifiées d'inépuisables à l'échelle humaine, car leur renouvellement s'effectue au moins aussi vite que leur consommation.

À la différence des énergies fossiles, dont les réserves sont limitées et la formation s'étend sur des millions d'années, les énergies renouvelables sont abondamment disponibles et plus facilement accessibles. Elles représentent un levier essentiel pour accompagner la transition énergétique, en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le réchauffement climatique.

Outre leur impact environnemental moindre, les énergies renouvelables favorisent la création d'emplois et participent à la diversification des sources d'énergie. Elles constituent ainsi une alternative crédible et durable aux combustibles fossiles, promouvant un modèle de développement plus respectueux des équilibres écologiques.

Exploitées de manière responsable, ces ressources renouvelables offrent une solution pérenne pour satisfaire la demande énergétique mondiale tout en préservant la planète. [1]

I.3 Les différents types de l'énergie renouvelable

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

I.3.1 Énergie éolienne

L'énergie éolienne fait partie des sources d'énergie renouvelables et repose sur l'utilisation de la force du vent pour générer de l'électricité. Ce procédé repose sur la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique, à l'aide d'appareils appelés éoliennes.

Une éolienne se compose principalement de pales fixées à un rotor, lui-même installé au sommet d'un mât. Lorsque le vent souffle, il met en mouvement les pales, ce qui entraîne la rotation du rotor. Ce mouvement mécanique est ensuite converti en électricité par un générateur logé dans la nacelle, située en haut de l'éolienne. L'électricité obtenue est ensuite transmise au réseau électrique, après un ajustement de la tension effectué par un transformateur. [2]



Figure I.1 Énergie éolienne

I.3.2 Les énergies marines

Les énergies marines renouvelables (EMR) regroupent l'ensemble des techniques permettant de générer de l'électricité à partir des ressources naturelles présentes dans les milieux marins. Parmi ces ressources figurent l'énergie des vagues, les courants marins, les marées, les différences de température entre les couches océaniques, la salinité de l'eau ainsi que la biomasse issue des océans.

Contrairement à l'hydroélectricité classique, qui repose sur l'exploitation de chutes d'eau ou de cours d'eau terrestres, les EMR utilisent des phénomènes propres aux environnements marins. Ces énergies sont qualifiées de renouvelables, car elles reposent sur des ressources inépuisables à l'échelle humaine, tout en n'émettant ni gaz à effet de serre ni résidus polluants.

Une fois les infrastructures mises en place, les coûts de fonctionnement restent relativement faibles, car les éléments exploités — comme le vent ou l’eau — sont disponibles gratuitement. De plus, leur implantation en mer limite les besoins en aménagements terrestres, réduisant notamment les frais liés à la construction de routes ou de réseaux électriques terrestres. [3]

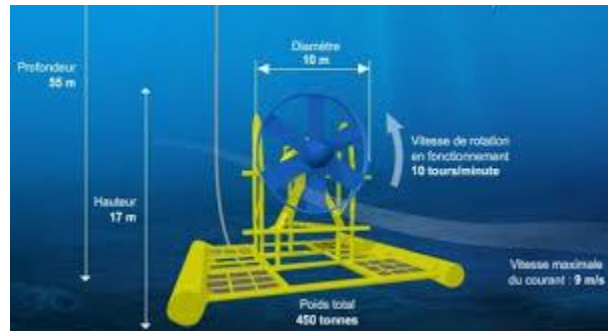


Figure I-2 Les énergies marines

I.3.3 Énergie géothermique :

L'énergie géothermique exploite la chaleur naturelle présente sous la surface de la Terre pour produire de l'électricité, du chauffage ou du refroidissement. Cette chaleur provient principalement de la désintégration radioactive d'éléments tels que l'uranium, le thorium et le potassium contenus dans les roches souterraines. À faible profondeur, la température du sol est stable autour de 12 °C, augmentant d'environ 3 °C tous les 100 mètres de profondeur, un phénomène connu sous le nom de gradient géothermique. [4]

La géothermie se divise en deux catégories principales :

- Géothermie de surface
- Géothermie profonde



Figure I 3 énergie géothermique

I.3.4 Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est une source renouvelable qui permet de produire de l'électricité en transformant directement la lumière solaire, grâce à un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce dernier a été mis en évidence en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Il se manifeste lorsqu'un photon suffisamment énergétique frappe la jonction d'une cellule photovoltaïque composée de matériaux semi-conducteurs — souvent deux couches de silicium dopées de manière opposée (type N et type P). Ce choc libère un électron de son atome, créant un trou.

Sous l'effet du champ électrique interne de la cellule, l'électron migre vers la couche de type N, tandis que le trou se dirige vers la couche de type P. Ce déplacement des charges engendre un courant électrique continu.

Les cellules photovoltaïques sont majoritairement fabriquées à partir de semi-conducteurs comme le silicium, mais d'autres matériaux sont également utilisés, tels que le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ou encore le cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS). Ces cellules sont assemblées pour former des panneaux photovoltaïques, qui peuvent être installés sur diverses surfaces — toitures, façades ou au sol — afin de produire de l'électricité. Celle-ci peut être consommée sur place, stockée dans des batteries, ou injectée dans le réseau de distribution. [5]



Figure I 4 énergie photovoltaïque

I.4 Avantages et inconvénients comme source d'énergie électrique

I.4.1 Avantage

L'énergie solaire représente une ressource renouvelable abondante, gratuite et pratiquement inépuisable à l'échelle humaine. Son exploitation à travers des panneaux photovoltaïques permet de produire de l'électricité sans générer de pollution durant le fonctionnement, ce qui en fait une solution respectueuse de l'environnement.

Elle contribue significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, participant ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique. En plus de ses avantages écologiques, l'énergie solaire offre des bénéfices économiques : l'installation de panneaux permet de réduire la dépendance au réseau électrique classique et d'alléger les factures d'énergie sur le long terme.

Un autre atout de cette technologie réside dans sa simplicité d'entretien. Les modules solaires nécessitent peu d'interventions techniques, si ce n'est un nettoyage périodique pour maintenir leur rendement. Enfin, les panneaux photovoltaïques sont recyclables à plus de 90 %, ce qui renforce leur caractère durable et limite leur impact en fin de vie.

I.4.2 Inconvénients

Bien que l'énergie photovoltaïque présente de nombreux atouts, elle comporte également certaines limites à prendre en compte.

Tout d'abord, sa production dépend directement du niveau d'ensoleillement. Les variations climatiques ainsi que l'alternance jour/nuit influencent la quantité d'électricité produite, rendant souvent nécessaire l'ajout de systèmes de stockage ou de sources d'appoint pour garantir une alimentation continue.

Par ailleurs, le coût initial d'acquisition et d'installation des équipements peut représenter un frein, malgré l'existence de subventions et d'aides financières visant à encourager ce type d'investissement.

La production étant intermittente, elle n'est pas toujours en phase avec les besoins énergétiques, en particulier lors des périodes nuageuses ou nocturnes. De plus, l'installation de panneaux requiert un espace suffisant, ce qui peut poser problème dans les zones densément peuplées ou sur des toitures mal orientées ou trop petites.

Enfin, bien que l'entretien soit relativement limité, une vérification régulière est conseillée afin de repérer d'éventuelles anomalies et de préserver les performances des installations sur le long terme.

I.6 Conclusion :

Les énergies renouvelables représentent une solution durable face aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Elles permettent de réduire la dépendance aux énergies fossiles, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de favoriser une transition énergétique plus respectueuse de l'environnement.

Les installations qui les utilisent sont souvent onéreuses à l'achat. Mais elles sont très économiques à l'usage, grâce à des coûts de maintenance et d'entretien réduits, à la robustesse des matériels employés et surtout grâce à la gratuité de la matière première.

Vue sa situation géographique, l'Algérie est un pays qui dispose d'un potentiel solaire de plus important, au monde. Des programmes en matière de réalisation d'installation photovoltaïque doivent être engagés.

Chapitre II

Énergie solaire

II.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) résulte de la transformation directe de l'énergie transportée par les photons issus de la lumière (solaire ou autre source lumineuse) en électricité. Ce procédé repose sur l'utilisation de panneaux photovoltaïques constitués de cellules, appelées également photopiles, fabriquées à partir de matériaux réactifs aux longueurs d'onde de la lumière visible, permettant ainsi cette conversion énergétique.

II.2. Le gisement solaire en Algérie :

La connaissance précise du potentiel solaire d'un site est une étape essentielle à la conception et à la mise en œuvre d'un système d'énergie solaire. Ce potentiel, aussi appelé énergie solaire, correspond à l'ensemble des données permettant de suivre l'évolution du rayonnement solaire en un lieu donné sur une période donnée, généralement obtenues à l'aide de stations météorologiques. L'analyse de ce potentiel s'appuie notamment sur des mesures d'irradiation solaire globale. Ces informations sont essentielles pour simuler le comportement d'un système solaire et ainsi déterminer précisément son dimensionnement, en fonction des besoins énergétiques à satisfaire.

Grâce à sa situation géographique favorable, l'Algérie bénéficie d'un ensoleillement remarquable, ce qui en fait un pays particulièrement propice au développement de l'énergie solaire. Sur la majeure partie de son territoire, l'ensoleillement annuel dépasse les 2 000 heures et atteint même 3 900 heures sur les hauts plateaux sahariens, révélant l'une des ressources énergétiques solaires les plus riches au monde.

Comme le montre la figure (II.1)

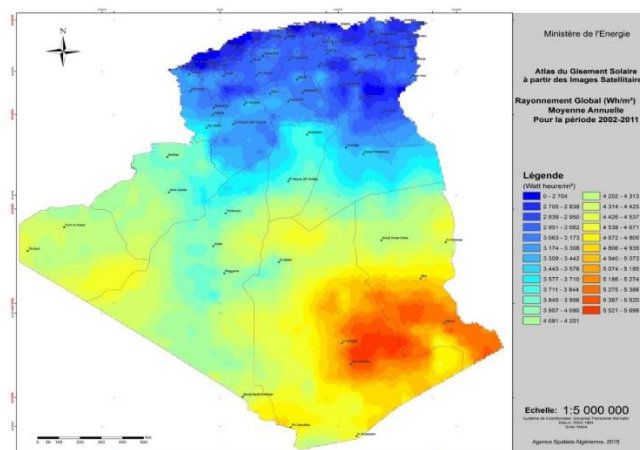


Figure II 1 Carte des radiation en Algérie

II.3. Énergie solaire et Effet photovoltaïque :

Le Soleil constitue une source d'énergie pratiquement inépuisable. Chaque année, il fournit à la surface terrestre une quantité de rayonnement équivalente à environ 8 400 fois la consommation énergétique mondiale. Cette énergie se traduit par une puissance instantanée avoisinant 1 kilowatt-crête par mètre carré (kWc/m²), couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge. À titre d'illustration, les régions désertiques de la planète reçoivent en l'espace de six heures plus d'énergie solaire que la consommation annuelle totale de l'humanité.

La quantité d'énergie solaire atteignant la surface dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, qui est exprimée par le concept de "masse d'air" (MA). En conditions optimales, à midi sous un ciel dégagé au niveau de la mer, l'intensité du rayonnement est d'environ 1 000 W/m², ce qui correspond à la condition dite de masse d'air 1 (MA1). Lorsque le soleil s'éloigne du zénith, le rayonnement doit traverser une plus grande couche atmosphérique, ce qui entraîne une diminution de l'énergie perçue. Étant donné que la position du soleil au zénith est limitée dans le temps, la masse d'air moyenne est généralement supérieure à 1, réduisant ainsi l'énergie réellement disponible. Pour standardiser les conditions de mesure, les chercheurs utilisent les spectres de référence AM1.5G (global) ou AM1.5D (direct) pour représenter le rayonnement solaire au sol dans des conditions réalistes.

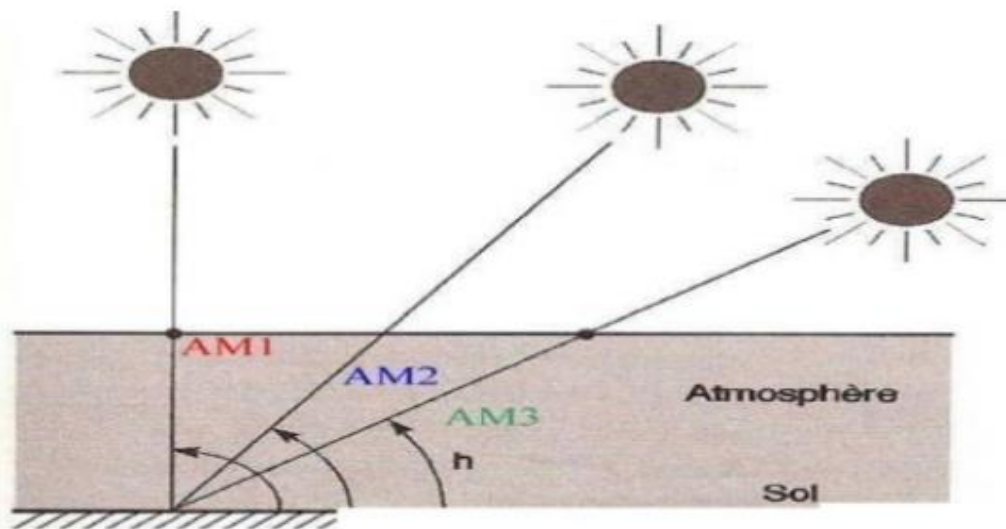


Figure II. 2 Différentes inclinaison du soleil

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (Correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant Rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

II.4. Absorption du rayonnement solaire par un semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la capacité à conduire le courant électrique se situe entre celle d'un isolant et celle d'un conducteur métallique. À température ambiante, il laisse circuler le courant, bien que moins efficacement qu'un métal. En revanche, à très basse température, un semi-conducteur pur agit comme un isolant. Sa conductivité peut toutefois augmenter de manière significative lorsqu'il est exposé à la chaleur, à la lumière ou lorsqu'on y introduit des impuretés, une technique connue sous le nom de dopage.

Au niveau atomique, les atomes d'un semi-conducteur forment un réseau cristallin où ils sont liés par leurs électrons de valence, situés sur leur couche externe. Certains de ces électrons, possédant une énergie plus élevée, peuvent se détacher plus facilement des atomes : on les appelle électrons de conduction.

Ces électrons évoluent dans deux niveaux énergétiques distincts, appelés bandes d'énergie :

- **La bande de valence**, contenant les électrons liés aux atomes,
- **La bande de conduction**, où se déplacent les électrons libres pouvant transporter une charge électrique.

Entre ces deux bandes se trouve une zone appelée **bande interdite** (ou **gap énergétique**), dans laquelle aucun électron ne peut résider. On désigne par :

- **E_v** : l'énergie au sommet de la bande de valence,
- **E_c** : l'énergie à la base de la bande de conduction,
- **E_g** : la largeur de la bande interdite, soit $E_g = E_c - E_v$.

Lorsqu'un semi-conducteur absorbe un photon dont l'énergie est supérieure ou égale à celle de la bande interdite, un électron peut être excité de la bande de valence vers la bande de conduction. Ce phénomène engendre une paire électron-trou, permettant ainsi la circulation du courant électrique. Ce principe est à la base du fonctionnement des cellules photovoltaïques.

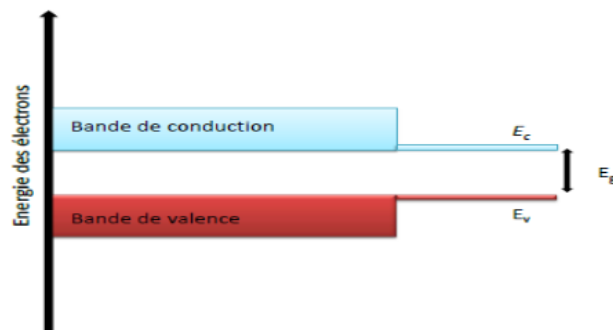


Figure II. 3: Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi-conducteur

II.5. La cellule photovoltaïque :

Définition :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit la lumière en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique produite dépend directement du rendement lumineux et du rendement de conversion de la cellule. Élément de base d'une installation photovoltaïque, cette cellule est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs.

Elle est généralement constituée d'une fine couche de semi-conducteur, comme le silicium, dont les propriétés électriques sont modulées par la bande interdite, qui contrôle le passage des électrons en fonction de l'énergie reçue. Une couche antireflet est également intégrée pour maximiser l'absorption des photons solaires. La face avant est dotée d'une grille conductrice (cathode), tandis que la face arrière est équipée d'un métal conducteur (anode).

Les technologies les plus récentes intègrent également des multicouches réfléchissantes sous le semi-conducteur pour prolonger la durée de vie des photons dans le matériau, améliorant ainsi l'efficacité énergétique.

II.6. Les différents types de cellules :

II.6.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce modèle de cellule photovoltaïque fait partie des plus couramment utilisés. Il est fabriqué à partir de silicium monocristallin, découpé sous forme de fine plaque unique. Ce type de cellule entre dans la composition de panneaux solaires capables de produire de l'électricité destinée à alimenter un logement ou à être injectée dans le réseau électrique.

a) Avantages :

- Offre un rendement énergétique supérieur par rapport à d'autres types de cellules.
- Occupe moins d'espace pour une même puissance produite.
- Possède une durée de vie estimée à environ 30 ans.

b) Inconvénients :

- Coût d'acquisition plus élevé.
- Requiert une plus grande quantité de silicium pour sa fabrication.
- Performances affectées par des températures ambiantes trop élevées.
- Moins efficace en cas de faible ensoleillement.

II.6.2. La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin

Facilement identifiable par ses cristaux bleutés, cette cellule photovoltaïque est constituée d'une seule couche de silicium. De forme carrée, elle est couramment utilisée dans les systèmes domestiques, agricoles ou industriels.

a) Avantages :

- Coût d'achat plus abordable.
- Nécessite moins de matières premières et consomme moins d'énergie lors de sa fabrication.
- Offre un rendement stable, même en cas de températures élevées.
- Performance meilleure par faible ensoleillement.
- Excellent rapport qualité/prix.

b) Inconvénients :

- Rendement global inférieur à celui des cellules monocristallines.
- Occupe plus d'espace.
- Durée de vie légèrement réduite par rapport à d'autres types.

II.6.3. La cellule au silicium amorphe

La cellule photovoltaïque en silicium amorphe se compose d'une fine couche de silicium, nettement plus mince que celles des cellules monocristallines ou polycristallines. Elle est principalement utilisée pour alimenter des dispositifs à faible consommation, tels que les montres solaires, les lampes de jardin ou les calculatrices solaires.

a) Avantages :

- Fonctionne efficacement même sous un faible éclairage, y compris en intérieur.
- Nécessite très peu de matériaux et d'énergie pour sa fabrication.
- Moins affectée par les températures élevées extérieures.

b) Inconvénients :

- Les panneaux peuvent être jusqu'à deux fois plus grands que les panneaux monocristallins.
- Coût d'achat plus élevé.

II.6.4. La cellule photovoltaïque tandem

La cellule photovoltaïque tandem est fabriquée en associant deux couches distinctes de semi-conducteurs. Par exemple, il peut s'agir d'une couche de silicium amorphe combinée à une couche de silicium cristallin (monocristallin ou polycristallin). Ce type de cellule est particulièrement adapté à un usage industriel.

a) **Avantage :**

- Ce type de cellule offre un rendement élevé.

b) **Inconvénient :**

- Sa fabrication complexe entraîne un coût de production élevé.

II.6.5. La cellule en couche mince de tellure de cadmium

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau différent du silicium. Il s'agit ici de tellure de cadmium, déposé en une couche unique et encapsulé entre deux plaques de verre.

II.6.6. La cellule photovoltaïque multi-jonction

La cellule photovoltaïque multi-jonction est constituée de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs superposées, chacune capable de capter différentes longueurs d'onde de la lumière solaire, optimisant ainsi la conversion de l'énergie, peu importe l'angle d'exposition. À ce jour, ce type de cellule est principalement utilisé dans le domaine spatial.

II.7. La structure d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie lumineuse en électricité grâce à un processus physique précis. Lorsqu'un photon frappe un matériau semi-conducteur, il peut libérer un électron, créant ainsi une paire électron-trou. Pour générer un courant électrique, il est essentiel que ces porteurs de charge se déplacent dans des directions opposées. Cela est réalisé en créant une jonction p-n dans le matériau semi-conducteur.

La jonction p-n est formée en associant deux couches de semi-conducteurs dopés différemment. La couche supérieure est dopée de type n, apportant des électrons excédentaires, tandis que la couche inférieure est dopée de type p, créant des "trous" ou absences d'électrons. Lorsque ces deux couches sont mises en contact, des électrons de la région n diffusent vers la région p, et des trous de la région p se déplacent vers la région n. Ce mouvement crée une zone de déplétion, ou zone de charge d'espace, où il n'y a plus de porteurs de charge libres. Cette zone agit comme une barrière, générant un champ électrique interne orienté du côté n vers le côté p. [8]

II.8. Description de la cellule :

Les cellules photovoltaïques, ou photopiles, sont des dispositifs optoélectroniques qui convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité. Elles sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, qui possèdent des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le silicium est le matériau de base le plus couramment utilisé, bien que d'autres matériaux comme l'arséniure de gallium (GaAs) ou le tellure de cadmium (CdTe) puissent également être employés.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur le dopage du silicium. Le dopage consiste à introduire de petites quantités d'impuretés dans le cristal de silicium pour modifier ses propriétés électriques. Si l'on ajoute du phosphore, qui possède cinq électrons de valence, on obtient un silicium de type n, riche en électrons libres. À l'inverse, l'ajout de bore, qui a trois électrons de valence, crée un silicium de type p, déficitaire en électrons et donc riche en "trous" (charges positives).

Lorsque ces deux types de silicium sont mis en contact, une jonction p-n se forme. Au niveau de cette jonction, un champ électrique interne se crée, ce qui permet de séparer les électrons et les trous générés par l'absorption des photons. Ce phénomène empêche les électrons et les trous de se recombiner immédiatement et permet leur collecte pour générer un courant électrique continu.

La cellule photovoltaïque est généralement composée de plusieurs couches minces :

- Une couche antireflet sur la face avant, visant à maximiser la pénétration des photons et à réduire les pertes par réflexion.
- Une grille conductrice avant, servant à collecter les électrons tout en étant transparente à la lumière.
- Une couche dopée n, fournissant des électrons libres.
- Une couche dopée p, fournissant des trous.
- Une surface de contact conductrice en métal, assurant la collecte des électrons et leur acheminement vers le circuit externe.

Ce montage permet à la cellule photovoltaïque de capter l'énergie solaire et de la convertir efficacement en électricité. [9]

II.9. Principe de fonctionnement:

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Ce processus repose sur la génération et le transport de charges électriques positives et négatives au sein d'un matériau semi-conducteur sous l'influence de la lumière. Ce matériau est constitué de deux zones : l'une présentant un excès d'électrons (dopée n) et l'autre une carence en électrons (dopée p). Lorsque ces deux zones

sont mises en contact, les électrons excédentaires de la zone dopée n diffusent vers la zone dopée p, créant une zone de déplétion. Cette zone de déplétion crée un champ électrique interne qui sépare les électrons des trous, permettant la génération d'un courant électrique continu lorsqu'une charge externe est connectée.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière, les photons peuvent être absorbés par les électrons de la bande de valence, les excitant vers la bande de conduction. Ce phénomène crée des paires électron-trou. Le champ électrique interne à la jonction p-n dirige les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p, empêchant leur recombinaison et permettant la circulation du courant électrique.

Ce mécanisme est fondamental pour le fonctionnement des cellules photovoltaïques, qui convertissent l'énergie solaire en électricité de manière directe et efficace. [10]

II.10. Module solaire photovoltaïque :

Un module photovoltaïque (ou panneau solaire photovoltaïque) est constitué d'un ensemble de cellules solaires interconnectées électriquement. Avec un rendement moyen avoisinant les 10 %, la puissance maximale délivrée par ce type de panneau est généralement comprise entre 100 et 180 watts par mètre carré. La quantité d'énergie produite dépend à la fois de la surface du panneau, de la latitude à laquelle il est installé et de l'ensoleillement local.

En fonctionnement, un module photovoltaïque ne produit aucun déchet. Ses coûts d'exploitation sont quasi inexistants, et les frais liés à son démantèlement restent très faibles. De plus, sa durée de vie dépasse généralement 20 ans, ce qui en fait une solution énergétique durable.

II.11. Association de cellules PV :

La mise en série et/ou en parallèle des cellules PV donne un module ou un générateur photovoltaïque, pour générer la tension et le courant souhaités.

II.11.1. Association série :

L'association en série de **Ns** cellules permet d'élever la tension délivrée par un module photovoltaïque. Dans une telle configuration, chaque cellule est traversée par le même courant, tandis que la tension totale est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule. La relation qui décrit cette caractéristique électrique est donnée par :

$$V_{sco} = N_s \times V_{co}$$

où :

V_{sco} est la tension en circuit ouvert d'un ensemble de **Ns** cellules connectées en série, et V_{co} correspond à la tension en circuit ouvert d'une cellule unique.

Avec l'augmentation progressive de la surface active des cellules grâce aux avancées technologiques, le courant généré par une cellule s'améliore, même si la tension d'une cellule reste relativement faible. C'est donc par l'association en série que l'on peut élever la tension globale du système, ce qui permet aussi d'en accroître la puissance.

Dans les modules photovoltaïques commerciaux de première génération, on retrouve fréquemment des assemblages de 36 cellules en série, ce qui permet d'atteindre une tension d'environ 21,6 V (calculée comme $0,6 \text{ V} \times 36$), ce qui est adapté pour obtenir une tension de fonctionnement proche de celle d'une batterie de 12 V.

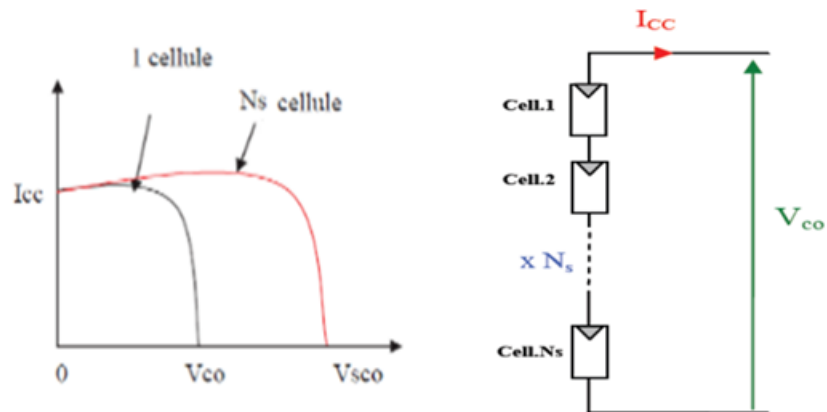


Figure II.5 association série

II.11.2. Association en parallèle :

L'association en parallèle de N_p cellules permet d'augmenter le courant de sortie du panneau constitué. Dans le cas de cellules identiques reliées parallèlement, chacune est soumise à la même tension, soit $N_s \times V_{co}$, et la courbe caractéristique globale est obtenue en additionnant les courants individuels.

Le courant de court-circuit total s'exprime ainsi :

$$I_{pcc} = N_p \times I_{cc}$$

où :

I_{pcc} : le courant de court-circuit de l'ensemble de N_p cellules connectées en parallèle.

I_{cc} : courant de court-circuit d'une cellule unique.

La figure illustre les paramètres électriques principaux d'un montage parallèle de N_p cellules.

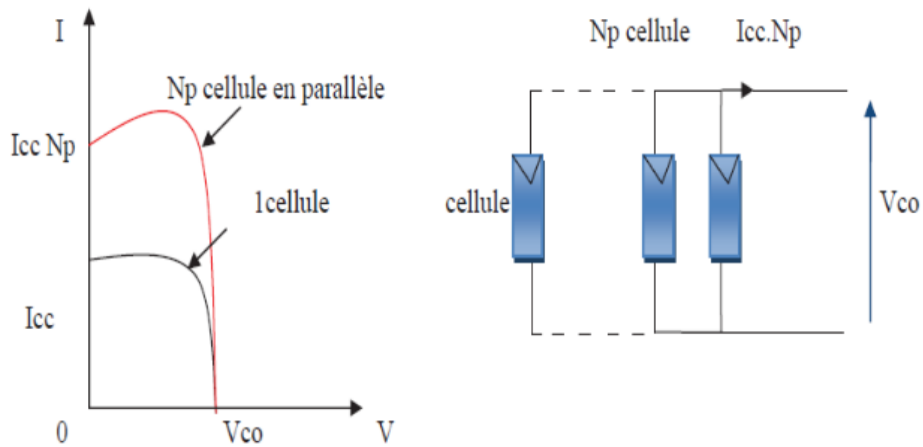


Figure II.6 association parallèle

II.11.3. Association en série/parallèle :

Le générateur photovoltaïque est formé d'un ensemble de modules connectés en série, en parallèle, ou selon une combinaison des deux. Les propriétés globales du générateur (telles que la relation courant-tension) peuvent être théoriquement déduites à partir des caractéristiques fondamentales des modules individuels, en supposant que ceux-ci possèdent des performances identiques.

Ces propriétés de base dépendent de deux paramètres : n_s , représentant le nombre de modules connectés en série (influant sur la tension), et n_p , le nombre de modules en parallèle (affectant le courant), comme illustré à la figure II.15.b.

Ainsi, le courant de court-circuit du générateur est donné par :

$I_{gcc} = n_p \times I_{cc}$, et la tension à vide par :

$V_{gco} = n_s \times V_{co}$.

Chapitre III.

Modélisation et simulation d'un panneau PV muni d'une commande MPPT

III.1 Introduction

Sous l'effet de la lumière, la jonction PN agit comme un générateur. Dans ce chapitre, nous allons développer un modèle mathématique du panneau photovoltaïque afin de pouvoir tracer sa caractéristique courant-tension en sortie.

III.1 Modalisation de cellule photovoltaïque :

La modélisation d'une cellule photovoltaïque nécessite le choix rigoureux d'un circuit équivalent adapté. Pour élaborer un modèle fidèle, il est indispensable de bien comprendre à la fois la structure physique et les propriétés électriques des composants impliqués. Dans le cadre de cette étude, le modèle basé sur une seule diode a été adopté, en raison de sa simplicité d'implémentation et de sa capacité à reproduire de manière satisfaisante le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les performances de la cellule réelle, notamment ses caractéristiques courant-tension (I en fonction de V), dépendent directement des valeurs attribuées aux éléments du modèle. Ces relations sont illustrées dans la figure III.1.

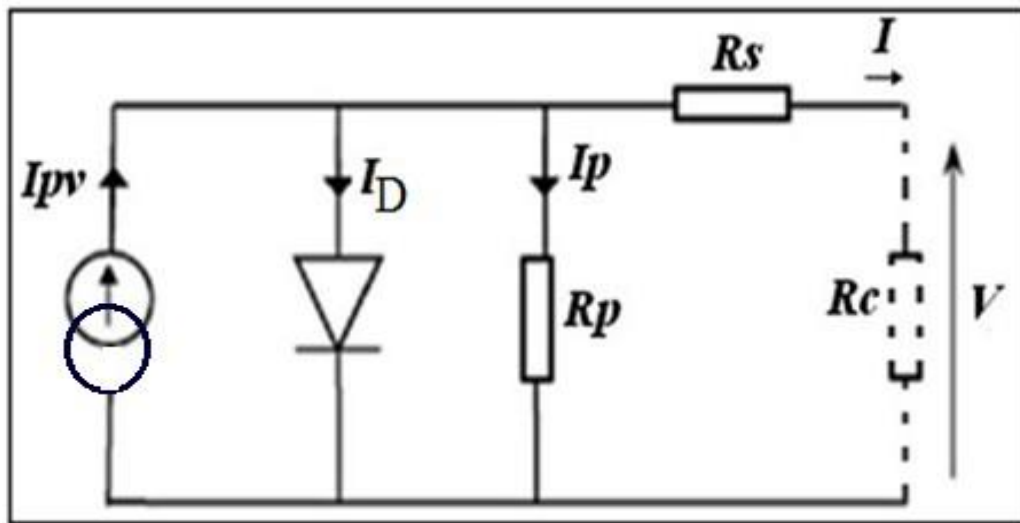


Figure III 1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

$$I = I_{pv\text{celle}} - I_{sat\text{celle}} \left(\exp\left(\frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

$I_{pv\text{celle}} = a_1 \cdot w \cdot \text{photo courant (A)}$.

Avec :

$$a_1 = 2.5 \cdot 10^{-7} T + 2 \cdot 10^4$$

[enA/ (w/m²)]

$$I_d = I_{\text{stacelle}} \left(\exp \left(\frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right)$$

Avec :

$V_T = KT/q$: la potentielle thermodynamique à une température donnée.

I_D : le courant d'une jonction PN(A).

I_0 : le courant de saturation (A).

R_s : résistance série(Ω)

R_p =résistance parallèle (shunt) (Ω)

K : la constante de Boltzmann ($K=1.38 \cdot 10^{-23}$ (J /°K)).

q : la charge de l'électron ($q=1.6 \cdot 10^{-19}$ (C) .

T : la température de la cellule (°K).

n : le facteur d'idéalité ($1 \leq n \leq 2$) $n=2$ pour une diode en silicium).

Le photo-courant il est donné par l'équation

$$I_{PV} = a_1 \cdot G(A)$$

Avec : G : rayonnement solaire

$$a_1 : 2.5 \cdot 10^{-3} T + 2 \cdot 10^{-9} [\text{en A/ (w/m}^2\text{)}]$$

Le courant de saturation, aussi appelé courant d'échelle ou plus précisément courant de saturation inverse, correspond à la composante de courant circulant en sens inverse dans une diode semi-conductrice. Ce phénomène est dû à la diffusion des porteurs minoritaires depuis les zones neutres vers la région d'appauvrissement de la jonction PN.

Il s'exprime généralement par la relation suivante :

$$I_0 = I_{sr} * \left(\frac{T}{T_n} \right) * \exp \left[\frac{q * E_{g0} * \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n * k} \right]$$

Avec le courant de saturation inverse donné comme suit

$$I_{RP} = \left(\frac{V + I * R_s}{R_{rp}} \right)$$

Le courant qui circule dans une résistance shunt est dérivé de la loi d'ohm de la résistance shunt, où la tension est la tension fonctionnelle plus la tension des panneaux solaires connectés en série, et il est donné comme suit

$$I_{RP} = \left(\frac{V + I * RS}{Rrp} \right)$$

III.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque

III.2.1 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque

Après caractérisation de la cellule photovoltaïque, le module est modélisé comme un ensemble de NSN_SNS cellules connectées en série et de NPN_PNP cellules branchées en parallèle, en supposant que toutes les cellules sont identiques. Dans ce cas, le courant de court-circuit du module est multiplié par NPN_PNP, tandis que la tension en circuit ouvert est multipliée par NSN_SNS.

La courbe caractéristique du module constitué de NSN_SNS cellules en série et de NPN_PNP cellules en parallèle s'exprime alors de la manière suivante :

$$I = I_{pvcelle} - I_{satcelle} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{a \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

III.2.2 Simulation

Le module photovoltaïque (SI 1088 T2), est choisi pour la simulation.

Il contient 176 cellules solaires de silicium, et fournit une puissance maximum nominale 1119.4w.

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau (III.1) suivant :

LES PARAMETRES	SYMBOLE	UNITE
Tension nominale	V_N	222
Tension de circuit ouvert	V_{co}	370V
Courant de court-circuit	I_{cc}	5.10A
Tension de puissance maximale	V_{mp}	264.00V
Courant de puissance maximal	I_{mp}	3.89V
Puissance maximal	P_{MAX}	1119.4W
Nombre de cellule en série	NS	8
Nombre de cellule en parallèle	NP	22
Coefficient de température		0.10%/°C
Facteur d'idéalité	A	4.25

Tableau. III.1 caractéristiques électriques du module SIT, SI1632G1

III.3 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement constante

Le schéma de la simulation est donné par la figure III.4

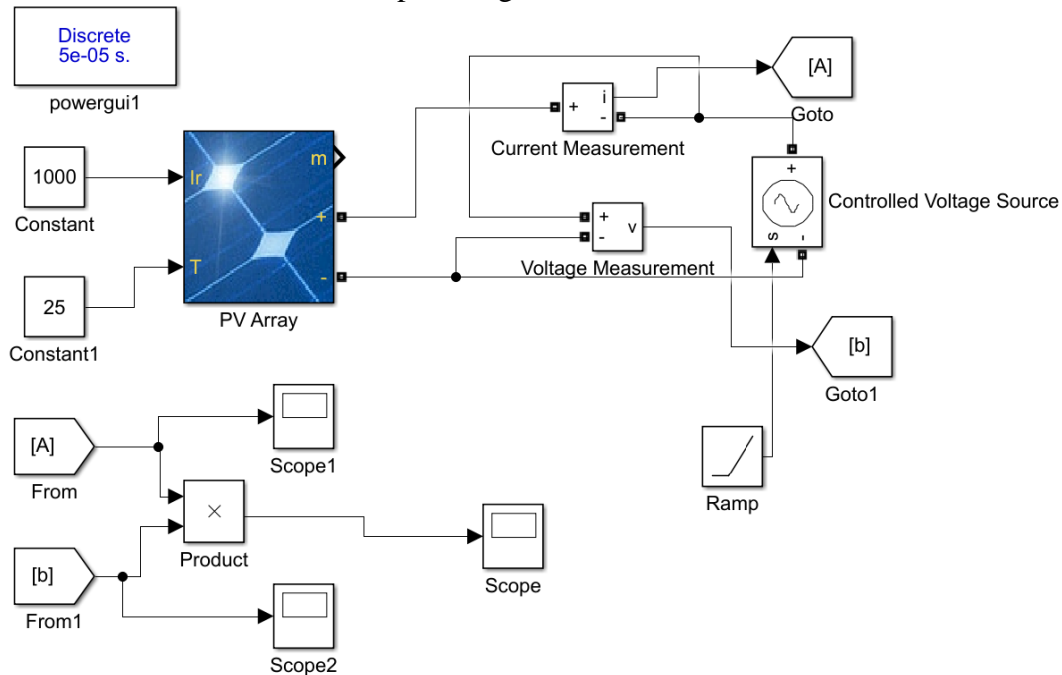
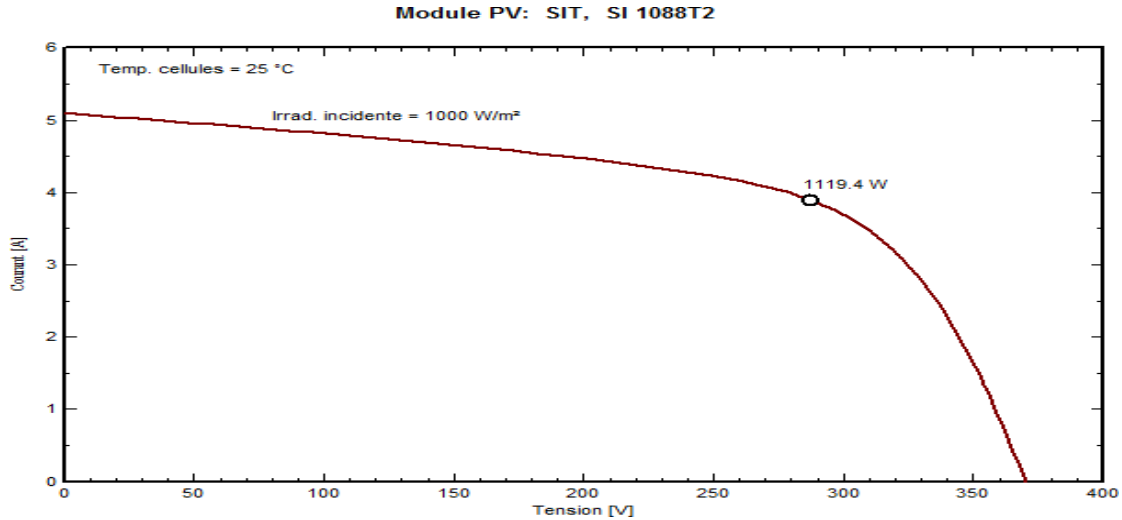


Figure. III.4 Schéma de simulation d'un PV

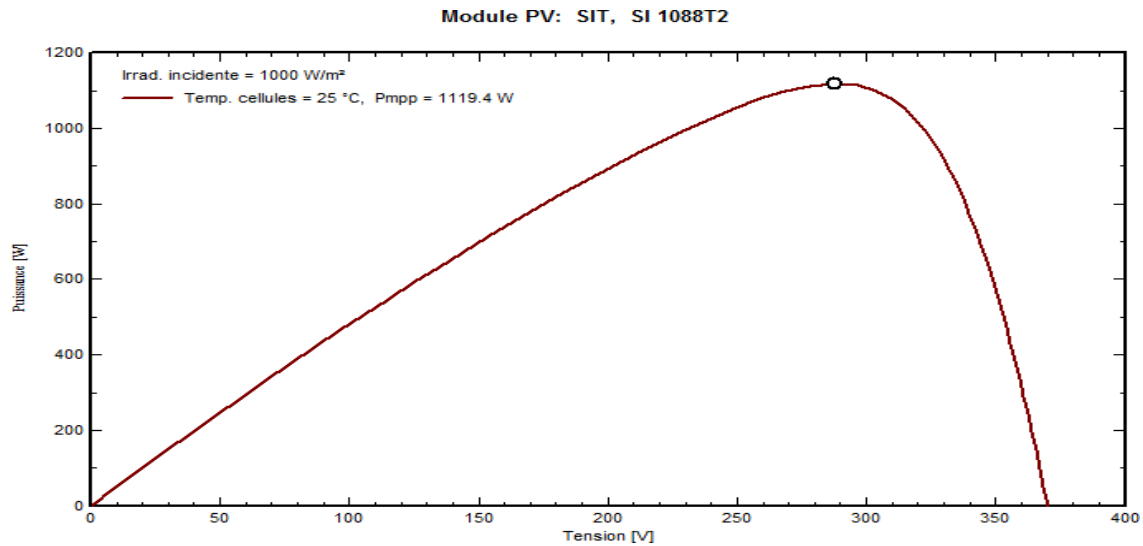
❖ caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) :

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ($G=1000$ W/m^2 , $T=25^\circ C$), la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la figure III.5



❖ caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) :

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ($G=1000$ W/m^2 , $T=25^\circ C$), la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la figure III.6



III.4 Simulation d'un générateur (GPV) à température et éclairement variable

Pour analyser l'influence des conditions extérieures — à savoir l'éclairement et la température (G, T) — sur les caractéristiques (I_{pv} - V_{pv} , P_{pv} - V_{pv}) d'un générateur photovoltaïque, nous avons adopté la démarche suivante :

Dans un premier temps, nous fixons la température ambiante à 25 °C, puis nous faisons varier l'éclairement sur une plage suffisamment large afin d'observer son impact.

Ensuite, en maintenant un éclairement constant à 1000 W/m², nous faisons varier la température pour étudier son influence sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque.

III.4.1 L'influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement (G) entre 200 et 1000 avec un pas de 200, les caractéristiques [$I_{pv}=f(V_{pv})$, $P_{pv}=f(V_{pv})$] sont données par les figures III.7.a,b

Module PV: SIT, SI 1088T2

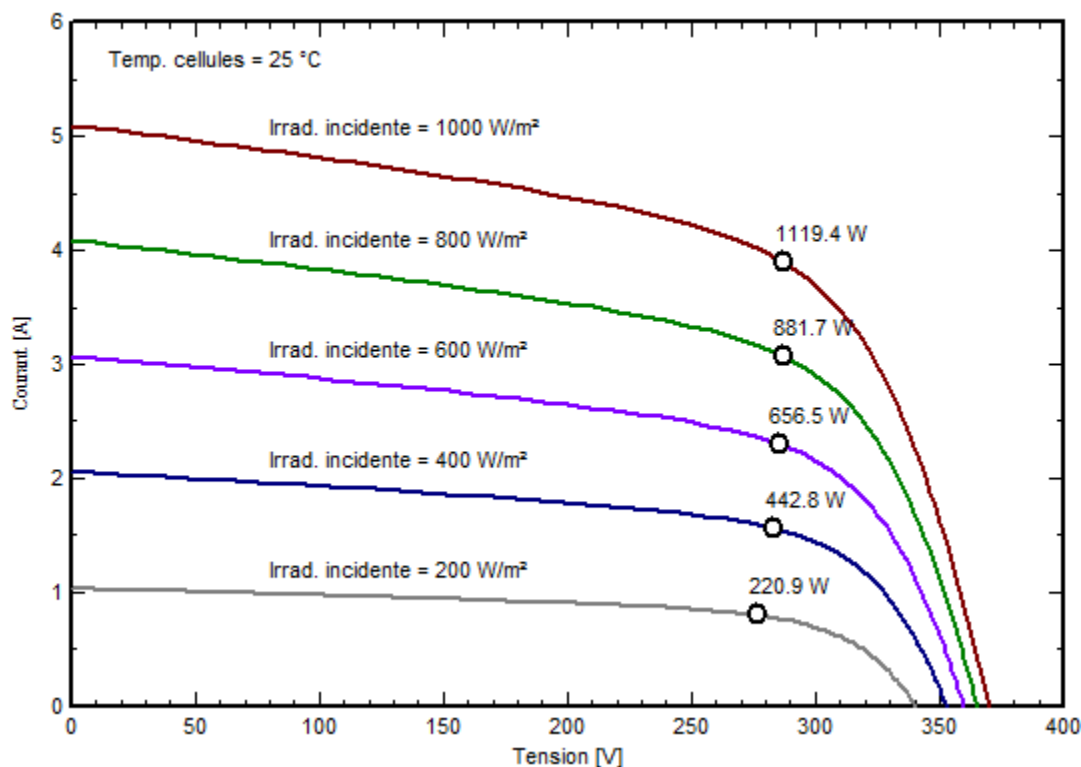


Figure III.7.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes irradiances solaires à température constante égale à 25°C.

D'après la figure III.7.a, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par apport à l'éclairement (G) et une faible diminution de la tension de circuit ouvert.

Module PV: SIT, SI 1088T2

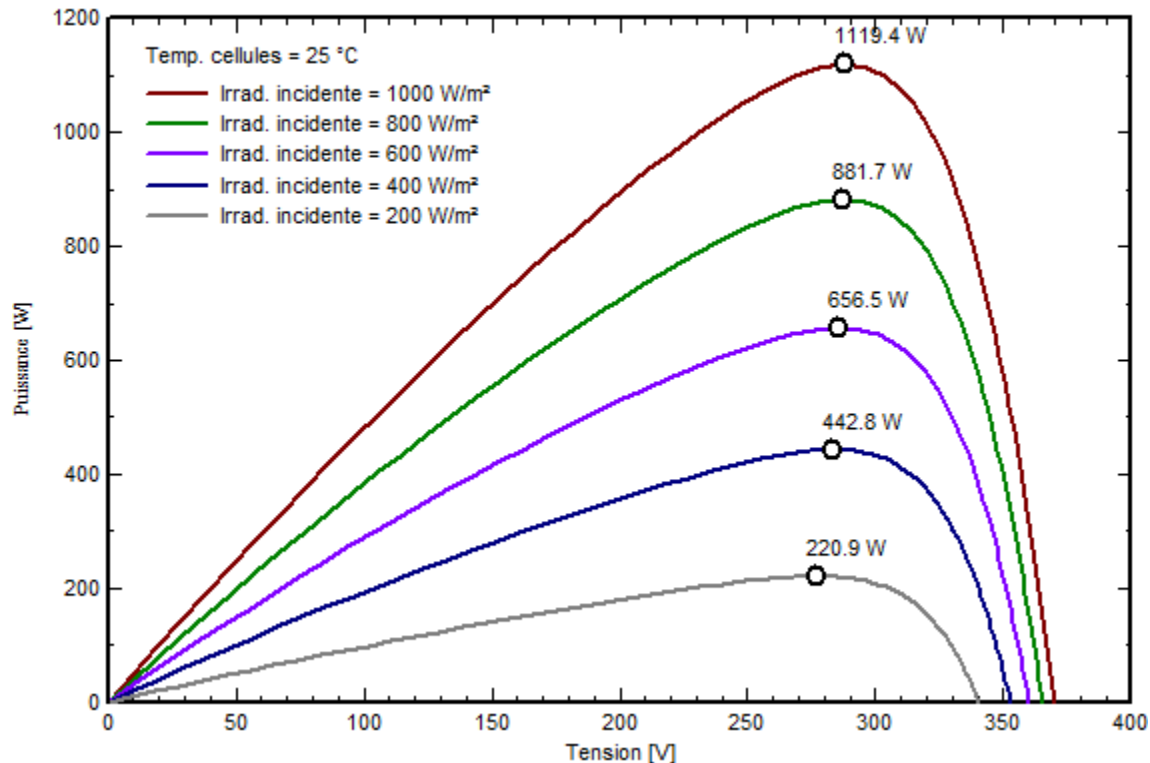


Figure III.7.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements solaires à température constante égale à 25°C.

On remarque aussi sur la figure III.7.b que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque

III.4.2 L'influence de la température

Dans le but d'analyser l'effet de la température sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, la température ambiante TTT a été progressivement augmentée de 25°C à 55°C, par paliers de 10°C, tout en maintenant un éclairement constant de $G=1000 \text{ W/m}^2$. Les figures II.1 et II.2 montrent l'évolution de la caractéristique courant-tension $I_{pv}-V_{pv}$ en fonction de la température.

L'observation de la figure III.5 met en évidence qu'une élévation de température provoque une baisse de la tension à vide (tension en circuit ouvert) du module photovoltaïque, tandis que le courant de court-circuit reste quasiment inchangé. Les figures III.5 et III.6 présentent respectivement les courbes $I-V$ - $V-I$ et $P-V$ - $V-P$ pour différentes températures, toujours sous un éclairement constant.

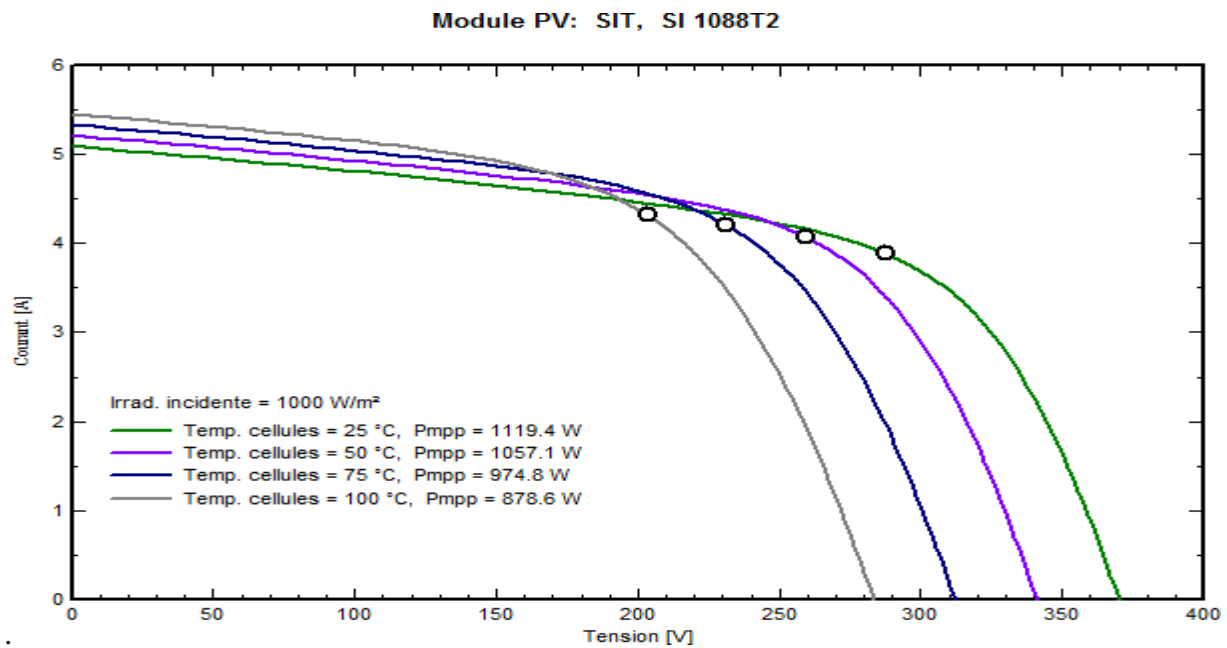


Figure III.8.a) caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal à 1000 w/m²

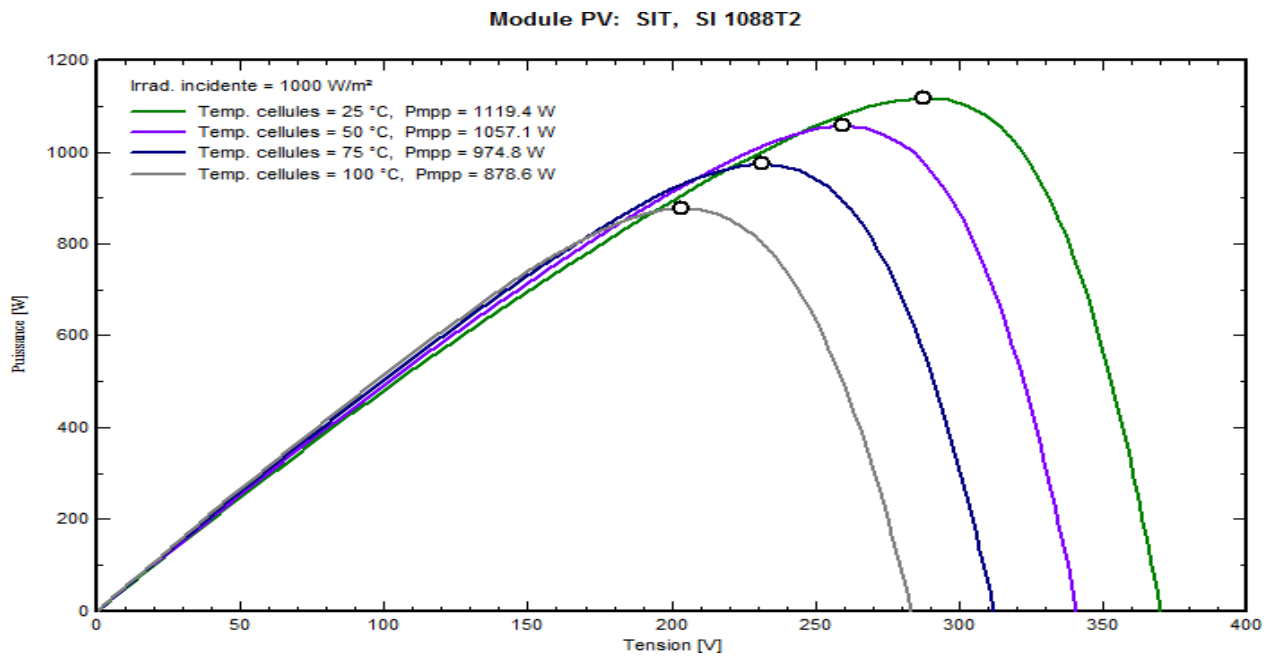


Figure III.8.b) caractéristique $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairement constant égal 1000 w/m².

D'après la figure III.8.b, l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique (P_{pv} - V_{pv}) fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert de générateur photovoltaïque

III.4.3 L'influence de la résistance série R_s et parallèle R_p

Le matériau semi-conducteur présente une résistance série R_s le plus souvent inférieure à $1\ \Omega$ et une résistance parallèle R_p bien supérieure à R_s due au contact métallique. Ces deux résistances altèrent sensiblement la puissance maximale fournie par le panneau PV comme le montrent les résultats de la simulation.

III.5 Convertisseur (DC/DC) :

Les convertisseurs CC-CC sont utilisés dans de nombreuses applications, telles que les alimentations pour ordinateurs personnels, les équipements de bureau, les systèmes d'alimentation des engins spatiaux, les ordinateurs portables, les équipements de télécommunications et les entraînements de moteurs CC.

L'entrée d'un convertisseur CC-CC est une tension continue non régulée (V_g à V_{gVg}). Le convertisseur produit une tension de sortie régulée (V à V_V), dont l'amplitude (et parfois la polarité) diffère de celle de l'entrée.

Il existe trois principaux types de hacheurs :

- Hacheur abaisseur : la tension de sortie moyenne est inférieure à la tension d'entrée.
- Hacheur élévateur : la tension de sortie moyenne est supérieure à la tension d'entrée.
- Hacheur abaisseur-élévateur : il peut fonctionner en mode abaisseur ou élévateur, avec une tension de sortie inférieure ou supérieure à la tension d'entrée, selon les besoins. Dans cette étude, le convertisseur élévateur est utilisé comme adaptateur de charge, permettant de suivre le point de puissance maximale.

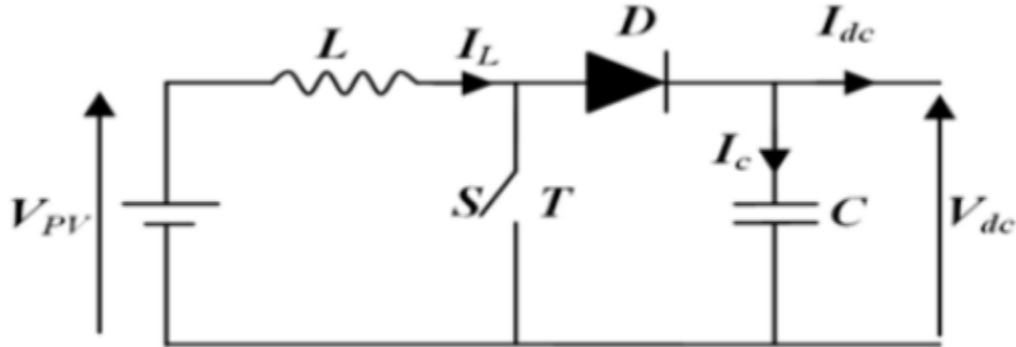
Envoyer des commentaires [17]

III.5.1 Convertisseur Boost

Un convertisseur élévateur est un type de convertisseur continu-continu (CC-CC) dont la fonction principale est d'augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée, tout en diminuant proportionnellement le courant. Ce dispositif appartient à la catégorie des alimentations à découpage (SMPS) et se compose d'au moins deux composants semi-conducteurs : un transistor et une diode. Il intègre également au moins un élément de stockage d'énergie, généralement une inductance, un condensateur ou une combinaison des deux.

Pour atténuer l'ondulation de tension, des filtres composés de condensateurs, parfois associés à des inductances, sont placés à l'entrée (côté alimentation) et à la sortie (côté charge) du

convertisseur. En raison de leur nature fortement non linéaire, les convertisseurs élévateurs nécessitent l'utilisation de diverses méthodes de contrôle, linéaires et non linéaires. afin d'assurer une régulation efficace de la tension, même en présence de variations importantes de la charge. [18]



III.5.2 Modélisation de l'hacheur Boost :

La modélisation de ce convertisseur se base sur l'analyse des différentes séquences de Fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande (Figure 3-10) Comme résultats on a deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T, que Nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

Lorsque (T) est fermé :

$$V_{pv} = L \frac{dl}{dt}$$

$$0 = C \frac{dl}{dt} + I_{dc}$$

Lorsque (T) est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{dl}{dt} + V_{dc}$$

$$I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc}$$

En posant :

- (S=1) pour T est fermé
- (S =0) pour T ouvert.

Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous Qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - s)$$

$$(1 - s)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc}$$

III.6 La méthode de Perturbation et Observation (P&O) :

Le contrôle MPPT utilisant l'algorithme Perturb and Observe (P&O) repose sur l'application de petites variations à la tension V_{pv} autour de sa valeur actuelle, dans le but d'analyser les effets de ces changements sur la puissance P_{pv} . Comme le montre la figure III.10, une légère augmentation de V_{pv} accompagnée d'une élévation de P_{pv} suggère que le point de fonctionnement se situe à gauche du point de puissance maximale (MPPT). À l'inverse, si cette modification de la tension entraîne une baisse de la puissance, cela signifie que le système se trouve au-delà du point de puissance maximale, soit sur sa droite.

Ce principe s'applique également lorsqu'on diminue la tension. En observant les variations de puissance en réponse à de petites modifications de la tension, on peut donc localiser le point de fonctionnement par rapport au MPPT. Un algorithme de régulation est alors utilisé pour faire converger le système vers ce point optimal. En résumé, si la perturbation provoque une augmentation de la puissance, la direction du changement est maintenue. En revanche, si une diminution de la puissance est observée, la direction de la perturbation est inversée afin de continuer la recherche du point de puissance maximale.

III.6.1 Principe de la commande P&O :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), ou suivi du point de puissance maximale, a pour objectif d'optimiser le rendement des panneaux solaires en les maintenant constamment à leur point de fonctionnement idéal, même lorsque l'ensoleillement ou la température varient.

Chaque panneau solaire possède un point précis où il peut produire la quantité maximale d'énergie, en fonction de la tension et du courant. Le rôle du système MPPT est de détecter ce point et de s'y ajuster en continu.

Le fonctionnement repose sur les étapes suivantes :

1. Le système mesure en temps réel la tension et le courant générés par le panneau.
2. Il calcule ensuite la puissance produite à l'aide de la formule $P = V \times I$.
3. Une légère variation de la tension est introduite.
4. Si cette modification entraîne une hausse de la puissance, l'ajustement continue dans la même direction.
5. En revanche, si la puissance diminue, la variation est inversée.
6. Ce processus est répété en boucle pour maintenir le fonctionnement du panneau à sa puissance optimale.

Cette régulation est généralement assurée par un microcontrôleur (comme un Arduino, un STM32, etc.), qui pilote un convertisseur de type Buck, Boost ou Buck-Boost, selon les besoins du système.

III.7 Simulation :

III.7.1 schéma de simulation du panneau photovoltaïque mini d'une commande MPPT :

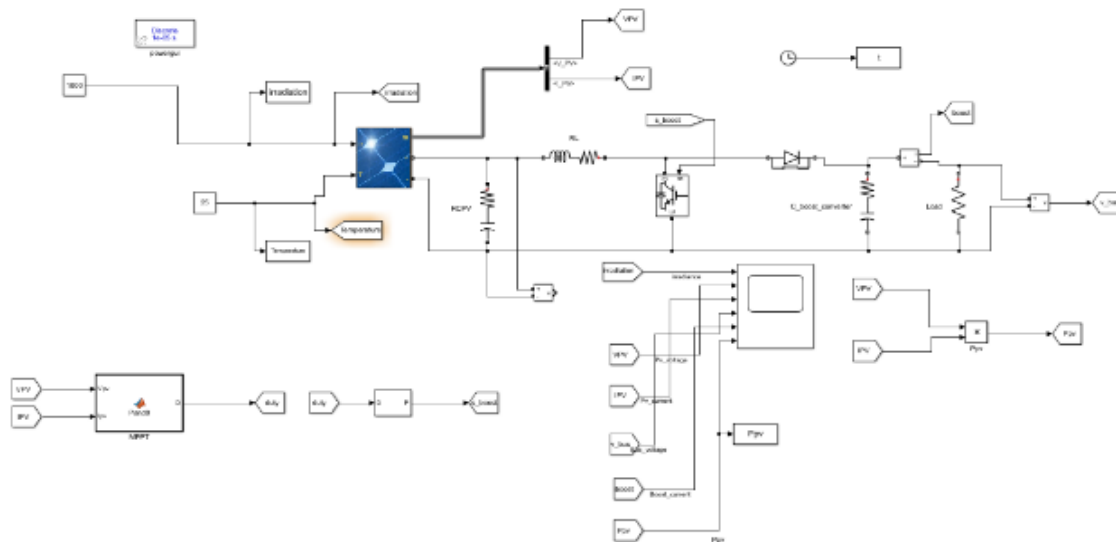


Figure III. 9:Schéma Bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT

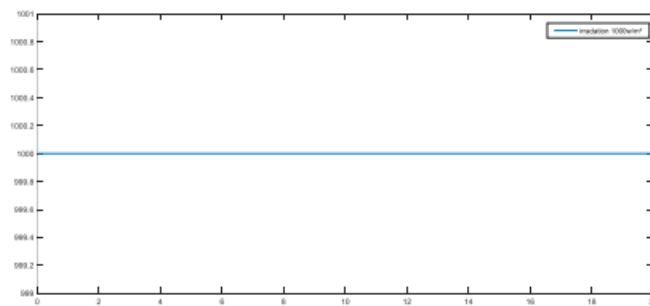


Figure III. 10:l'irradiation constante (W/m2)

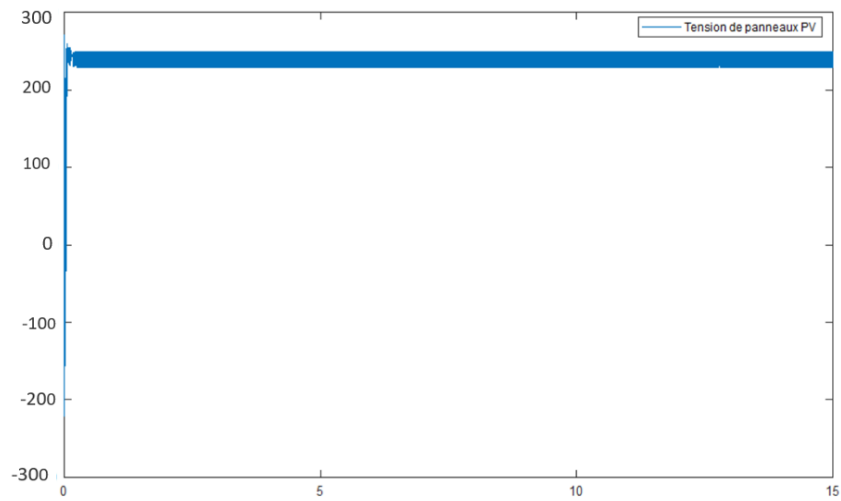


Figure III. 11: Tension de sortie de panneaux PV

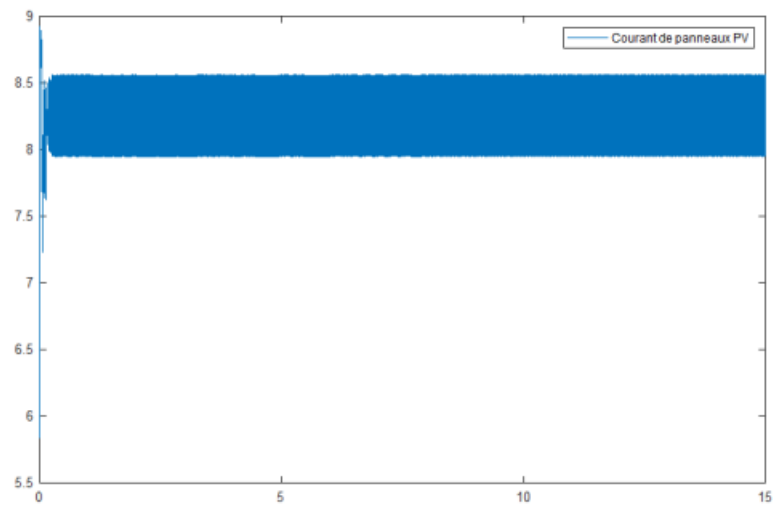


Figure III. 12: Courant de sortie de panneaux PV

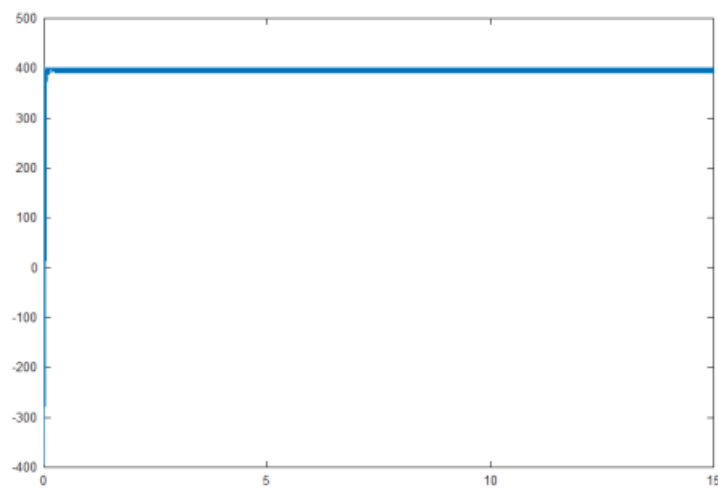


Figure III. 13: la puissance maximale donnée par panneaux PV pour un éclairage constant

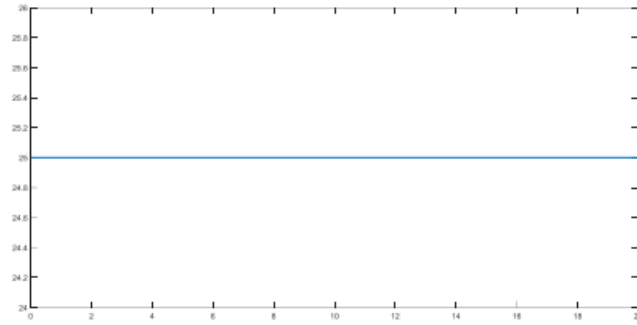


Figure III. 14:Température constante $T=25^{\circ}\text{C}$

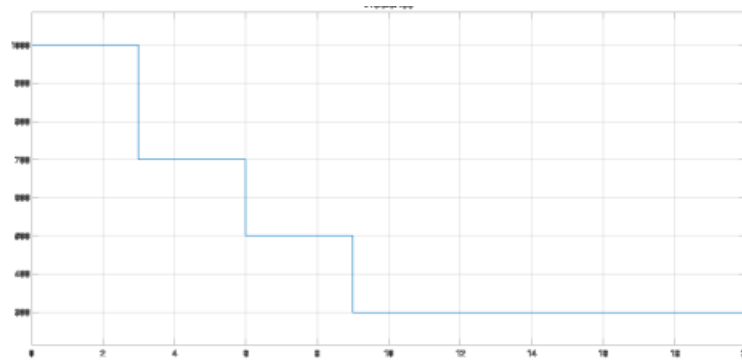


Figure III. 15:Variation de l'irradiation (W/m^2)

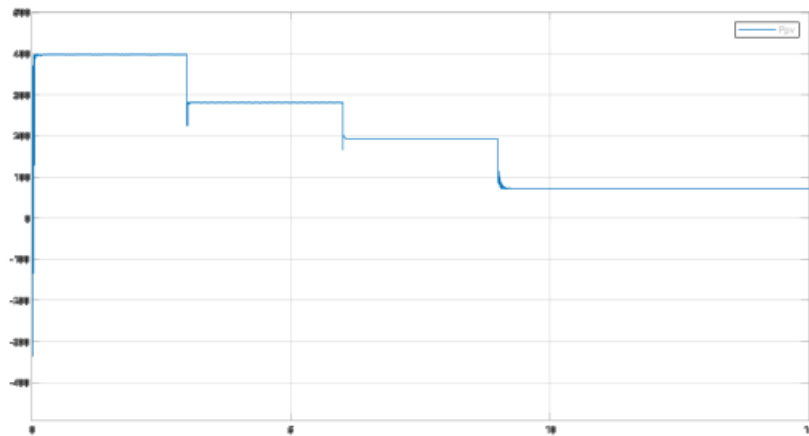


Figure III. 17:Effet de changement d'éclairement (W/m^2)

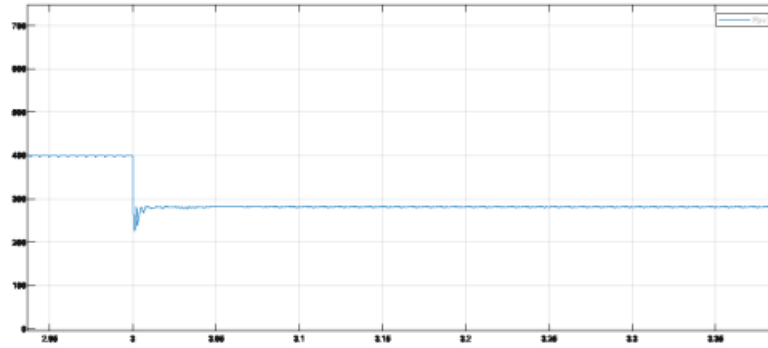


Figure III. 18: Effet de changement d'éclairement (W/m²) zoom

III.7.2 Discussions des résultats de la simulation :

Les figures III-11, III-12, III-13, représentent la tension, le courant et la puissance de sortie respectivement. Ces résultats montrent que le hacheur série et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles. La tension fournie par le hacheur boost à la sortie est supérieure à la tension fournie par le générateur. La commande MPPT permet au générateur photovoltaïque de s'adapter à la charge. Dans La figure III-17, nous avons changé l'éclairement du système (1000, 750, 500, 350 200) W / m² Nous pouvons clairement voir que grâce à la commande MPPT, la puissance répond correctement aux changements d'éclairement, se stabilisant ainsi au point de puissance maximale, et nous avons remarqué que le point de puissance maximal MPP a été atteint rapidement.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré le modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque en nous appuyant sur celui d'une cellule solaire exposée à la lumière.

Les simulations réalisées mettent en évidence l'influence significative des conditions climatiques, en particulier de l'irradiation solaire et de la température, sur le comportement et les performances d'un module photovoltaïque.

Lorsque l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant généré par le panneau s'élève, ce qui se traduit par une augmentation de la puissance électrique produite. Par ailleurs, l'analyse de la courbe caractéristique courant-tension ($I=f(V)$) en fonction de la température révèle que le courant tend à croître avec la hausse de la température.

Cependant, cette amélioration apparente est contrebalancée par certains facteurs internes, notamment la résistance série (R_s) du module. Une valeur élevée de cette résistance entraîne une dégradation notable des performances globales, en particulier une diminution du point de puissance maximale (PPM), comme l'illustre la courbe $P=f(V)$.

Enfin, le raccordement direct d'un générateur photovoltaïque au circuit de charge limite sa capacité à fonctionner en permanence à son point de rendement optimal. Ce manque d'adaptabilité constitue l'un des inconvénients majeurs de cette technologie en l'absence d'un système de régulation tel que le MPPT.

Chapitre IV.

Système photovoltaïque avec stockage d'énergie

IV.1 Introduction :

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes vitaux dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau pour l'utilisation domestique et l'irrigation partout où le réseau électrique est absent.

IV.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

Il est fréquent que les périodes durant lesquelles l'eau doit être pompée ne coïncident pas avec les heures de fort ensoleillement. Afin d'assurer un débit régulier et adapté à la demande, l'intégration d'un dispositif de stockage d'énergie devient nécessaire. C'est dans ce contexte que notre étude se concentre sur une solution de pompage solaire équipée d'une batterie. Ce type d'installation assure une certaine autonomie énergétique et permet de maintenir un débit stable, indépendamment des variations d'ensoleillement. L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques durant la journée est ainsi stockée dans une batterie, qui peut ensuite alimenter le système pendant la nuit ou lorsque l'ensoleillement est insuffisant. Un régulateur de charge est indispensable pour protéger la batterie contre les surtensions et les décharges excessives, ces dernières étant susceptibles de compromettre sa longévité.

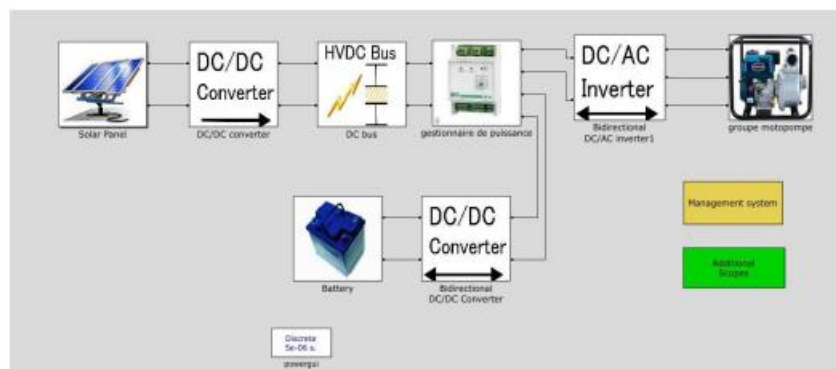


Figure IV. 1: principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec stockage de l'énergie par batteries

IV.2.1 Bus continues (DC bus) :

Rôle : Le bus continu joue le rôle d'axe central de transmission de l'énergie électrique en courant continu (DC) entre les différents éléments du système, tels que les panneaux photovoltaïques, les batteries et la pompe.

Fonction : Il permet une distribution efficace de l'énergie tout en assurant la régulation de la tension, afin de garantir un fonctionnement stable et fiable de l'ensemble des composants connectés.

IV.2.2 Gestionnaire de puissance (PMS) :

Rôle : Le gestionnaire de l'énergie (ou Power Management System - PMS) a pour mission de superviser et d'optimiser la distribution de l'énergie à l'intérieur du système.

Fonction : Il prend des décisions en temps réel concernant l'allocation énergétique, notamment en déterminant les instants les plus appropriés pour recharger les batteries ou alimenter la pompe. Il assure également un suivi des performances globales et joue un rôle préventif en cas de dysfonctionnements électriques tels que les surtensions, les sous-tensions ou les surcharges.

Alors que le bus continu se charge du transport de l'énergie, c'est le PMS qui, par une gestion intelligente, oriente son utilisation afin d'assurer une exploitation efficace et sécurisée du système.

IV.2.3 Choix de moteur asynchrone :

La puissance du moteur doit être supérieure ou égale à celle de la pompe. on a choisi le moteur asynchrone dont les données sont les suivantes :

- $P_{\text{mot}} = 1 \text{ kW}$
- Triangle/étoile
- 230 (V)/ 400 (V)
- $I_n = 6.65 \text{ (A)}$
- $\cos \theta = 0.78$
- $N = 1440 \text{ tr/min}$
- $F = 50 \text{ HZ}$
- $r = 76\%$

IV.2.4 Choix de la batterie :

On suppose que le temps d'éclairage est 8 heures

$$P = 8 \times 1 = 8 \text{ kWh}$$

La capacité de batterie est 200ah

La tension 24v

Donc la puissance egale 4800Wh

On a choisi deux (2) batteries en série d'une tension de 24V et une capacité de 200 Ah et 4800Wh.

Le calcul de la capacité (C_{batt}) des batteries dépend de plusieurs données, elle peut être calculée comme suit : C_{batt}

$$C_{batt} = \frac{Pp * Nf}{U_{batt} * \eta_{batt} * PDD}$$

Le nombre de batteries utilisées peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq \frac{C_{batt}}{C_{batt, u}}$$

Avec :

NJ : Nombre de jour d'autonomie de la batterie

PDD : Profondeur de décharge de la batterie.

Nbatt : Rendement de la batterie.

Ubatt : Tension de la batterie.

Nb : Nombre de batterie.

$C_{batt, u}$: Capacité unitaire de la batterie.

IV.3 Définition de l'onduleur :

Les dispositifs utilisés pour convertir une alimentation en courant continu (CC) en courant alternatif (CA) sont appelés **onduleurs**. Leur rôle principal consiste à transformer une tension continue en une tension alternative symétrique, en respectant des critères précis d'amplitude et de fréquence à la sortie.

Il existe deux approches pour obtenir une tension alternative variable en sortie :

- La première consiste à modifier la tension continue en entrée tout en maintenant le gain de l'onduleur constant.
- La seconde, applicable lorsque la tension d'entrée est fixe et ne peut être ajustée, repose sur la modulation du gain de l'onduleur afin de contrôler la tension de sortie.

IV.4 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsions (MLI) repose sur l'utilisation d'une fréquence de commutation nettement plus élevée que celle des signaux de sortie, afin de générer chaque alternance de la tension de sortie sous forme d'une série d'impulsions de largeur soigneusement contrôlée. Les onduleurs de tension, généralement utilisés pour alimenter des charges en courant alternatif à fréquence fixe ou variable, ont pour objectif principal — dans le

cadre de ce chapitre — de produire une tension de sortie dont la forme d'onde se rapproche le plus possible d'une sinusoïde.

IV.5 Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé à deux niveaux, dont le schéma de puissance est illustré à la figure IV-2, permet de distinguer deux catégories de tensions.

La première concerne les tensions de branche V_{ANV_AN} , V_{BNV_BN} et V_{CNV_CN} , mesurées par rapport à la borne négative de la source de tension continue V_{PVV_PV} .

La seconde catégorie regroupe les tensions de phase V_{ANV_AN} , V_{BNV_BN} et V_{CNV_CN} , cette fois définies par rapport à un point neutre flottant nnn , correspondant au neutre d'une charge équilibrée connectée en étoile.

À partir de ces tensions simples, il est ensuite possible de déterminer les tensions composées (ou différentielles) entre les phases, en les calculant directement à partir des différences entre les tensions de phase.

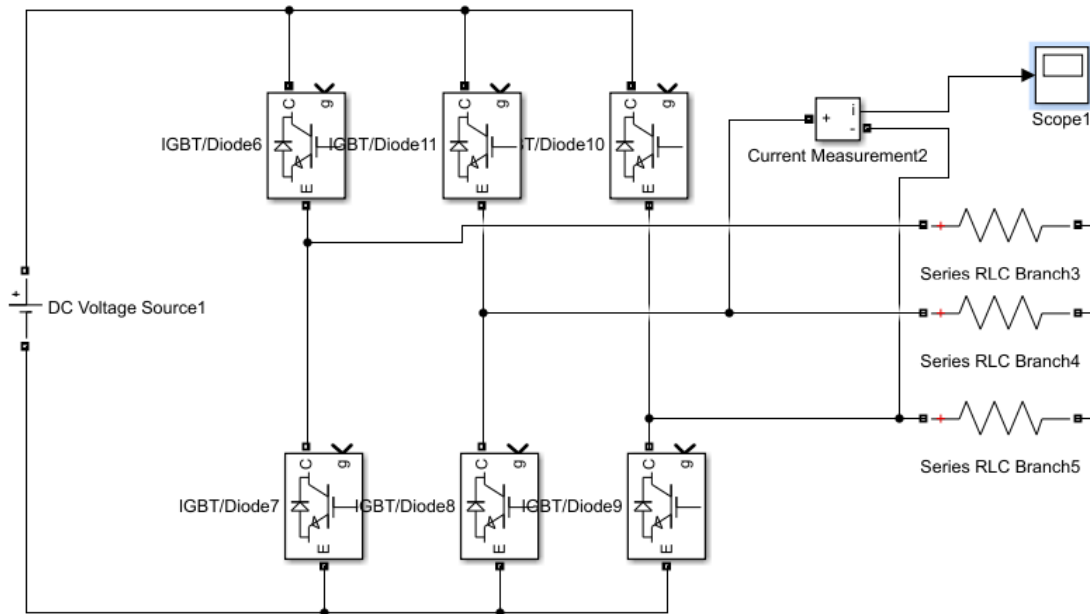


Figure IV. 2. Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé représenté à la figure 4-4, il est important de souligner que les deux interrupteurs de chaque bras fonctionnent de manière complémentaire : lorsque l'un est fermé, l'autre est ouvert, et inversement.

En exploitant cette complémentarité des états de commutation, il devient possible de déterminer les tensions de branche en sortie de l'onduleur, mesurées par rapport à la borne négative de la source de tension continue. Ces tensions peuvent alors être exprimées en fonction des états logiques des interrupteurs de chaque bras.

$$V_{AN} = S_1 V_{PV}$$

$$V_{BN} = S_2 V_{PV}$$

$$V_{CN} = S_3 V_{PV}$$

Où S_1 , S_2 et S_3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Les tensions composées sont] :

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2) V_{PV}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3) V_{PV}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1) V_{PV}$$

On peut écrire l'équation sous la forme matricielle :

On peut écrire l'équation sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{pmatrix} = V_{PV} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

$$V_{AN} = \frac{2}{3} V_{AN} - \frac{1}{3} (V_{BN} + V_{CN})$$

$$V_{BN} = \frac{2}{3} V_{BN} - \frac{1}{3} (V_{AN} + V_{CN})$$

$$V_{CN} = \frac{2}{3} V_{CN} - \frac{1}{3} (V_{AN} + V_{BN})$$

$$\begin{pmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{pmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

IV.6 Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsions (PWM) pour piloter l'onduleur permet de produire une tension alternative dont l'amplitude et la fréquence peuvent être modulées, tout en maintenant des niveaux d'harmoniques réduits, même si l'alimentation d'origine est fixe en fréquence et en tension. Dans cette section, nous allons détailler la méthode de commande basée sur la modulation sinus-triangle.

IV.7 Commande MLI sinus – triangle

La modulation de largeur d'impulsions de type sinus-triangle s'obtient en comparant une onde modulante basse fréquence, correspondant à la tension de référence, à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les commutations des interrupteurs se produisent aux instants où ces deux signaux se croisent, la fréquence de commutation étant donc déterminée par la fréquence de la porteuse. Dans le cas d'un système triphasé, on utilise trois signaux sinusoïdaux de référence décalés de $2\pi/3$ radians, tous à la même fréquence f_{sf} .

IV.8 Avantages de la commande MLI :

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) offre plusieurs avantages importants : elle assure une meilleure réduction des harmoniques comparée aux onduleurs produisant des ondes carrées ou des impulsions simples. En déplaçant les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences plus élevées, elle facilite grandement leur filtrage. Par ailleurs, la MLI permet de moduler l'amplitude de la composante fondamentale de la tension de sortie. Elle autorise également l'alimentation simultanée de plusieurs groupes d'onduleurs ou de moteurs asynchrones à partir d'une seule source de courant continu.

IV.9 Modélisation de la Machine asynchrone :

IV.9.1 . Introduction :

L'analyse d'un système physique passe inévitablement par une phase de modélisation, essentielle pour simuler son comportement face à diverses sollicitations et pour mieux comprendre les phénomènes qui régissent son fonctionnement. La machine asynchrone peut être représentée à l'aide de plusieurs approches, selon les objectifs de l'étude. Dans ce chapitre, nous présentons deux types de modélisation :

- Le **modèle en abc**, basé sur les équations différentielles décrivant le comportement de la machine. Il est principalement utilisé pour l'analyse en régime permanent.
- Le **modèle issu de la transformation de Park**, couramment employé pour étudier les régimes transitoires, grâce à une simplification des équations qui facilite leur résolution.

IV.10 Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique :

Pour établir le modèle de la machine asynchrone triphasée, on commence par présenter son schéma, illustré à la Figure IV-4.

Les cadres statorique et rotorique possèdent chacun un enroulement triphasé. Les trois enroulements du stator sont désignés par SAS_ASA, SBS_BSB et SCS_CSC, tandis que ceux du rotor sont notés RaR_aRa, RbR_bRb et RcR_cRc.

L'angle θ représente la position relative entre l'axe de la phase statorique SaS_aSa et celui de la phase rotorique RaR_aRa.

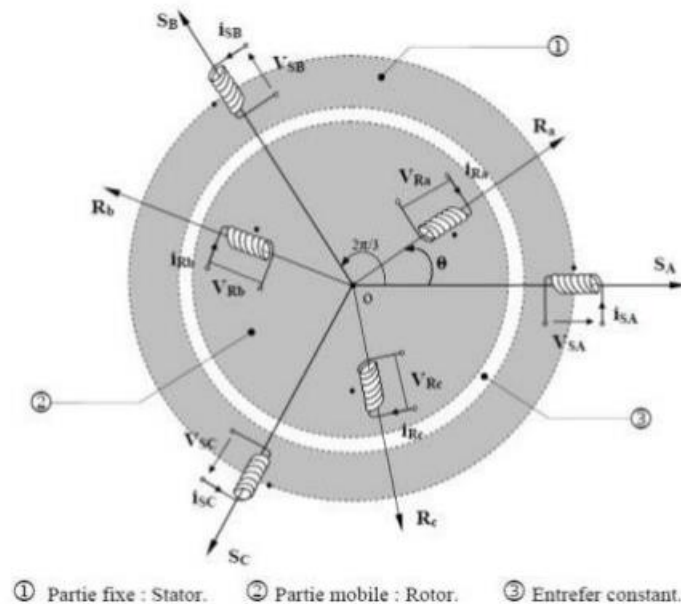


Figure IV. 4: Schéma d'une machine asynchrone triphasée

IV.11 Mise en équations de la machine asynchrone :

Le comportement des machines asynchrones peut être transformé par trois équations :

IV.11.1 Equations électriques

Pour le stator :

$$[V_{SABC}] = [R_S] \cdot [i_{SABC}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{SABC}]$$

Pour le rotor :

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}]$$

Où :

$[R_S]$: Matrice des résistances statoriques ;

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques ;

$[V_{sABC}] = [V_{SA} \ V_{SB} \ V_{SC}]^T$: vecteur des tension statorique

$[V_r abc] = [V_{ra} V_{rb} V_{rc}]^T$: vecteur des tension rotorique

$[i_s ABC] = [i_{sA} i_{sB} i_{sC}]^T$ vecteur des courant statorique

$[i_r abc] = [i_{ra} i_{rb} i_{rc}]^T$: vecteur des courant rotorique

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Ainsi que pour les vecteurs des flux :

IV.11.2 Équations magnétiques

Les relations entre les flux et les courants du stator et du rotor s'écrivent comme suit :

Pour le stator :

$$[\varphi_s ABC] = [L_s] * [i_s * ABC] + [M_{sr}] * [i_r abc]$$

Pour le rotor :

$$[\varphi_r abc] = [L_r] * [i_r abc] + [M_{rs}] * [i_s ABC]$$

Où :

$[L_s]$: Matrice des inductances statoriques ;

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques ;

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle du couplage entre stator-rotor.

Alors :

$$\begin{Bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{Bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & 0 \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\vartheta) & \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Où :

L_s : Inductance propre d'une phase statorique;

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique;

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques ;

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

IV.11.3 Équations mécaniques :

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement

des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple,

vitesse)

$$C_e = [P] * [i_s * ABC]^T + [M_{sr}] * [i_r abc]$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_e - C_r - k_f \omega$$

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$C_e - C_r = J \frac{d\omega}{dt} + f \omega$$

Où :

C_e (C_m) : représente le couple moteur appliqué.

C_r : représente le couple résistant.

J : le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

f : le coefficient de frottement.

IV.12 Modélisation diphasée de la Machine asynchrone :

IV.12.1 Transformation de Park :

On appelle souvent cette opération la transformation des axes. Elle établit une correspondance entre les trois enroulements de la machine initiale et des enroulements équivalents vus du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation consiste à envisager le remplacement du repère rotorique tournant par un repère fictif fixe équivalent, tout en maintenant la force magnétomotrice ainsi que la puissance instantanée.

L'objectif principal de cette transformation est de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation.

IV.12.2 Les avantages de cette transformation :

Dans une armature diphasée, les axes des bobines sont perpendiculaires, ce qui entraîne des inductances mutuelles nulles entre les enroulements d, q et o. Le choix de l'angle φ constitue un paramètre libre qui permet d'alléger les équations. La transformation de Park est un outil efficace qui facilite la simplification des équations, diminue la charge de calcul, améliore la compréhension du fonctionnement du moteur, permet une commande plus précise et simplifie la mise en œuvre numérique des algorithmes de contrôle.

IV.12.3 Équations électriques dans le repère de PARK :

Les équations statoriques et rotoriques :

$$\begin{aligned}V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s * \varphi_{ds} \\V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s * \varphi_{qs} \\V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_{si} * \varphi_{qr} = 0 \\V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_{si} * \varphi_{dr} = 0\end{aligned}$$

On applique la transformation de Park aux équations de flux et de courants (IV19). On trouve les relations électromagnétiques de la machine :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_{sisd} + L_{mird} \\ \varphi_{sq} = L_{sisq} + L_{mirq} \\ \varphi_{rd} = L_{mird} + L_{misd} \\ \varphi_{rq} = L_{mirq} + L_{misq} \end{cases}$$

IV.12.4 Choix de référentiel :

Ce qui rend la transformation de Park attrayante, est que l'orientation du repère (d-q) peut être Quelconque. Il existe trois choix importants, le repère (d-q) peut être fixé au stator, au

rotor ou au champ tournant selon l'objectif de l'application. Pour simplifier les équations de la machine, il faut faire un choix de référentiel, les trois types possibles sont :

IV.12.4.1 Référentiel lié au stator

Dans ce type de référentiel, les axes (d-q) par rapport aux axes statorique et rotorique sont définies par :

$$\frac{dos}{dt} = 0 \text{ et } \frac{dor}{dt} = -\omega r$$

Ce type de référentiel est choisi lors des variations importantes de la vitesse du rotor.

IV.12.4.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce cas, la position des axes (d-q) par rapport aux axes statorique et rotorique est donnée

$$\frac{dos}{dt} = \omega r \text{ et } \frac{dor}{dt} = 0$$

Ce type de référentiel est utilisé lorsque la vitesse de rotation de la machine est constante et lors de l'étude des régimes transitoires.

IV.12.4.3 Référentiel lié au champ tournant :

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

$$\frac{dos}{dt} = \omega s; \frac{dogi}{dt} = \frac{dos}{dt} - \frac{dogi}{dt} = \omega = p\omega$$

D'où :

$$\frac{dogi}{dt} = \omega s - \omega = \omega gi \text{ ou } \omega g, \text{ est la pulsation de glissement}$$

Donc, les équations électriques (IV-20) s'écrivent :

$$\begin{cases} Vsd = R_s i_{sd} + \left(\frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) - \omega s \phi_{sd} \\ Vs_q = R_s i_{sq} + \left(\frac{d\phi_{sq}}{dt} \right) + \omega s \phi_{sq} \\ 0 = R_r i_{rd} + \left(\frac{d\phi_{rd}}{dt} \right) - \omega gi \phi_{rq} \\ 0 = R_r * i_{rq} + \left(\frac{d\phi_{rq}}{dt} \right) + \omega gi \phi_{rd} \end{cases}$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel est qu'il a une quantité constante en régime permanent. Cela facilite d'un faire la régulation.

IV.13 Modélisation électrique de la batterie:

Le modèle électrique de la batterie comprend une fem. E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s).

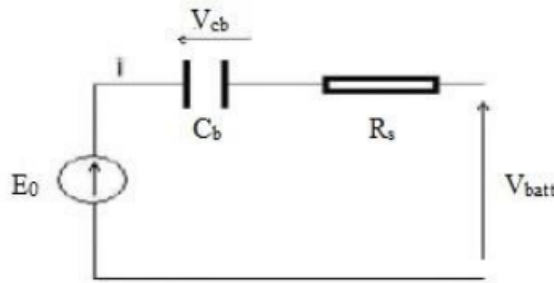


Figure IV. 5: Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{cb}$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}}$$

C_{batt} : la capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt}

IV.14 Classification générale des pompes :

Les pompes sont conçues pour déplacer des liquides selon deux principes fondamentaux, ce qui conduit à une classification principale : les pompes centrifuges et les pompes à déplacement positif.

Les pompes centrifuges, parmi les plus économiques et largement répandues dans les secteurs industriels pour le pompage de l'eau, fonctionnent grâce à des éléments rotatifs. Elles sont composées notamment d'une roue fixée à un arbre tournant, ainsi que d'éléments fixes tels que le carter, le couvercle du carter et les roulements.

En revanche, les pompes à déplacement positif regroupent une grande variété de modèles, mais leur principe général consiste à capter une certaine quantité de fluide, à la comprimer puis à la pousser vers la sortie. Ces pompes délivrent un volume précis de liquide à intervalles réguliers, ce qui leur permet d'assurer un débit constant. La pression développée dépend alors du système de tuyauterie, pouvant être estimée à l'aide de l'équation de Bernoulli.

Pour les besoins de cette étude, ce sont les pompes centrifuges qui ont été retenues.

IV.14.1 Principe de fonction d'une pompe centrifuge

Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge repose sur une roue en rotation, qui transforme l'énergie cinétique en pression ou en vitesse nécessaire pour faire circuler le fluide. Le fluide pénètre dans la pompe au niveau du centre de la roue en rotation et, sous l'effet de la force centrifuge, est poussé vers l'extérieur de la roue. À cet endroit, le liquide atteint sa pression maximale avant de s'écouler vers la sortie puis dans la canalisation.

IV.14.2 Modèle de la pompe centrifuge :

La Pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnelle au carré de la vitesse de rotation du moteur. Avec :

$$Cr = Kch \cdot \omega \quad (IV-1)$$

Kch: désigne la constante de proportionnalité et ω : la vitesse de rotation du moteur.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q, H et P) pour la vitesse N. les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q', H' et P') pour une vitesse N' en utilisant les relations suivantes :

$$Q' = Q \frac{N'}{N}, H' = \left(\frac{N'}{N}\right)^2, P' = \left(\frac{N'}{N}\right)^3$$

Avec. Q et Q', les débits correspondants respectivement à la vitesse N et N', H et H' les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N', et P et P' sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse N et N'.

La Figure IV-2 présente le modèle de la pompe centrifuge basé mathématiques précédentes

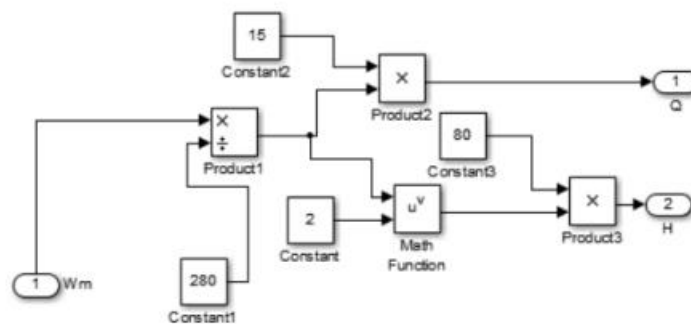


Figure IV.2 bloc SIMULINK de la pompe centrifuge

IV.15 Simulation du système :

IV.15.1 Représentation de la simulation Commande MLI sinus-triangle de l'onduleur :

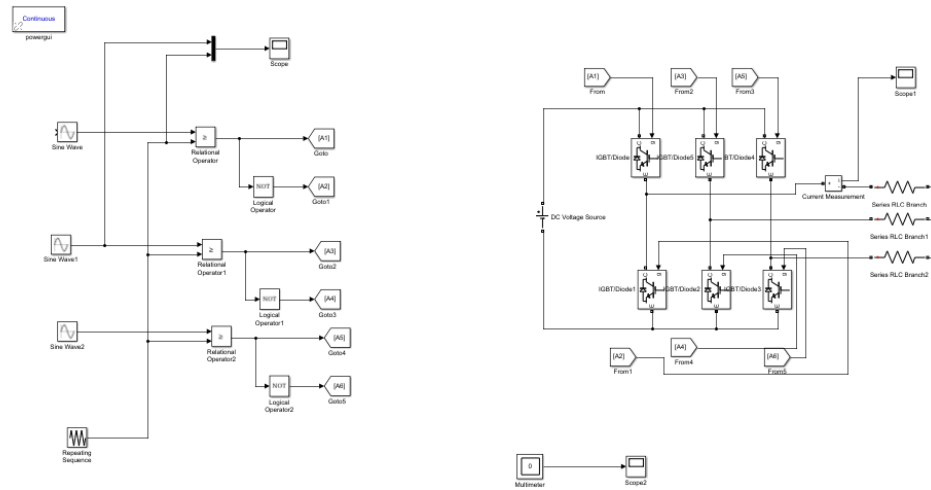


Figure IV. 3: Bloc de simulation du modèle global de MLI-Onduleur

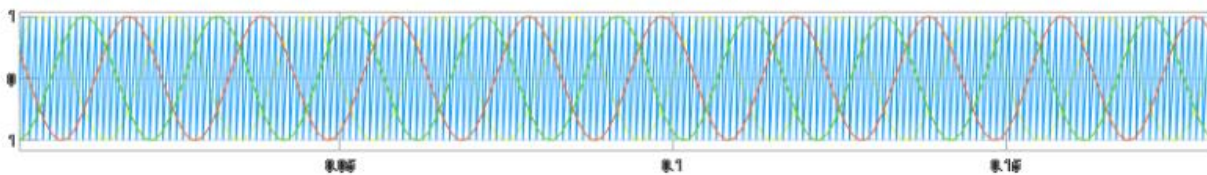


Figure IV. 4: Illustration de la MLI sinus-triangle

Après la simulation, on a obtenu à la sortie de l'onduleur les signaux des trois phases suivant :

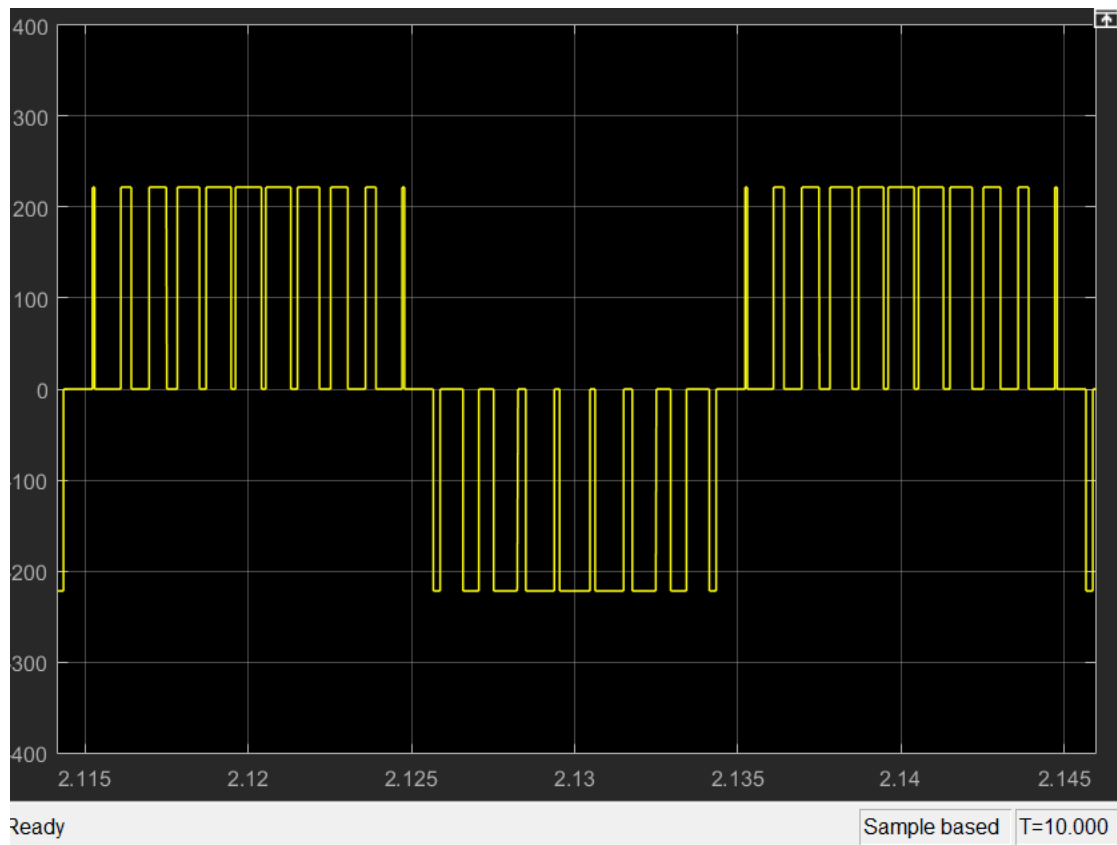


Figure IV. 5: tension et le Zoom de la tension composé de sortie de l'onduleur

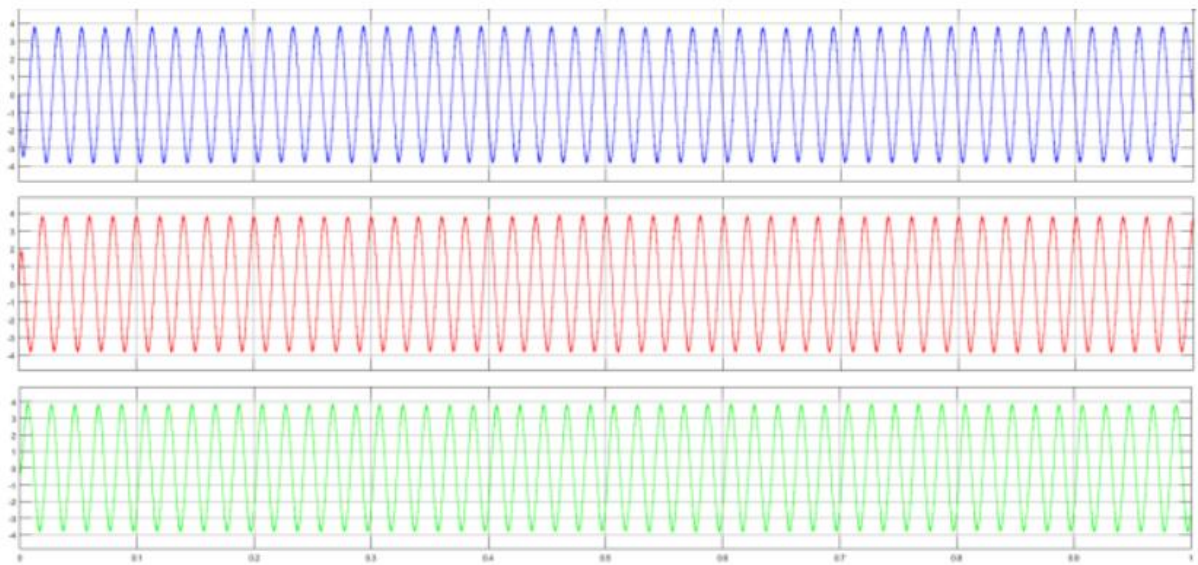
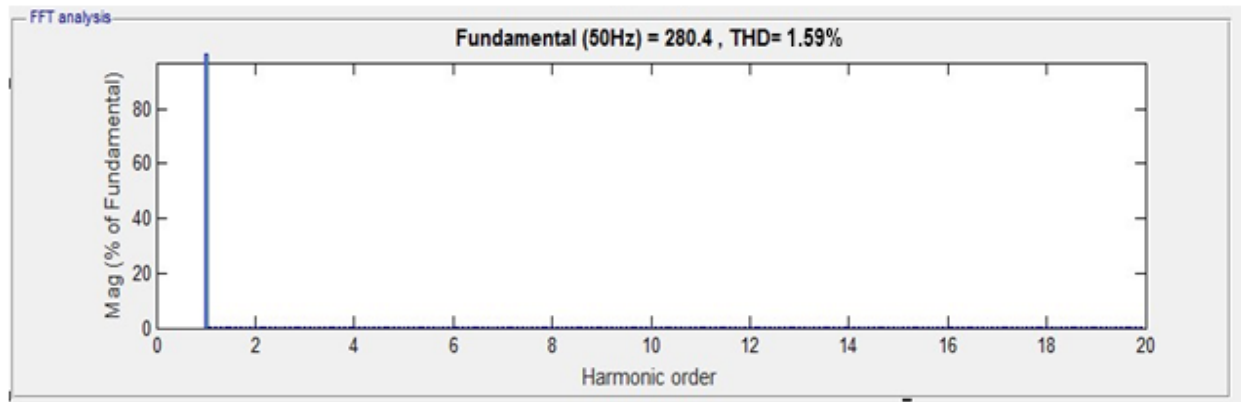


Figure IV. 6: les courants de sortie de l'onduleur

Pour $m=33$



1Figure IV. 7: Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur ($m=45$)

IV.15.2 Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation, on observe que :

1. Pour $m = 19$, la forme de la tension et du courant s'améliore, bien qu'une légère ondulation subsiste ; le THD_v vaut 69,10. En revanche, lorsque $m = 33$, la qualité de la forme d'onde de la tension et du courant s'améliore nettement, avec un THD_v de 45,52.
2. L'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de décaler les harmoniques de la tension et du courant vers des fréquences plus élevées.
3. Toutefois, il n'est pas possible d'augmenter « m » indéfiniment, car on est limité d'une part par le temps de commutation des transistors, et d'autre part par les pertes liées à ces commutations qui deviennent trop importantes.

IV.15.3 Simulation du modèle de la machine asynchrone :

Les moteurs asynchrones sont généralement alimentés directement par un réseau électrique industriel triphasé équilibré. Toutefois, lorsqu'un contrôle de la vitesse est nécessaire, l'alimentation peut être assurée par un système triphasé de tension ou de courant, injecté dans les enroulements du stator via un convertisseur électronique de puissance intercalé entre le moteur et le réseau.

La figure IV-8 illustre le schéma bloc du modèle développé, qui sera simulé à l'aide du logiciel SIMULINK dans l'environnement MATLAB. Les caractéristiques techniques de la machine asynchrone utilisée dans cette étude sont disponibles en Annexe B.

La simulation sera réalisée dans les référentiels (d, q) et (a, b), en condition de test sous charge nominale après un démarrage à vide. Les tensions d'alimentation sont considérées comme sinusoïdales, de même amplitude et constantes, et peuvent être exprimées comme suit :

$$V_{sa} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t)$$

$$V_{sb} = \sqrt{2}v_s \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{2}\right)$$

$$V_{sc} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{2}\right)$$

Avec :

V_s : valeur efficace de tension

ω_s : Pulsation d'alimentation

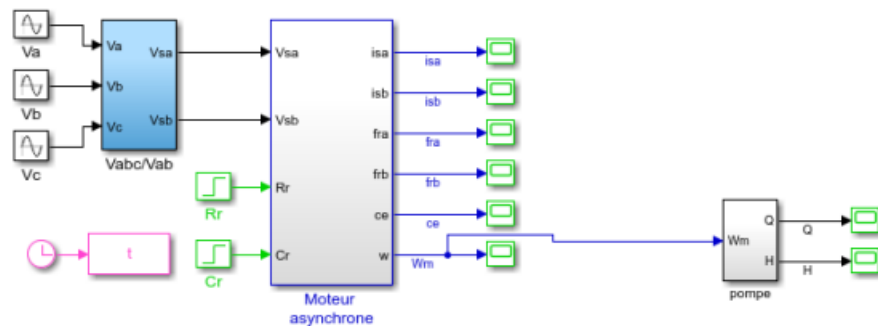


Figure IV. 9: Schéma de simulation de la Machine asynchrone

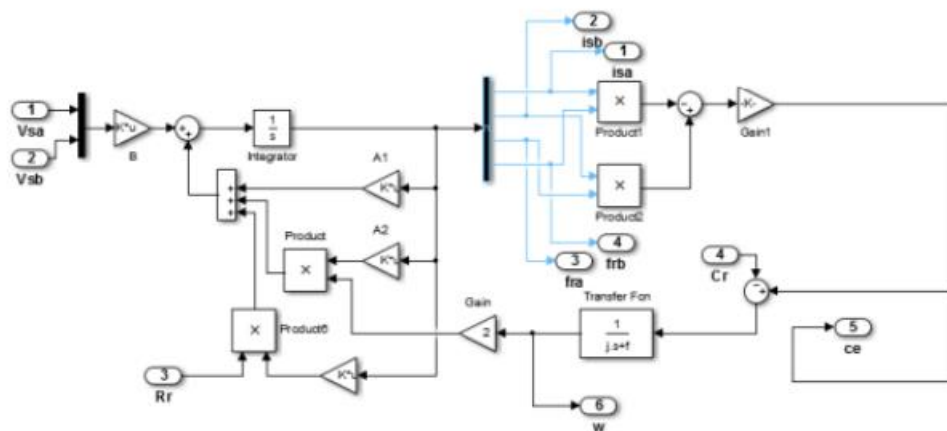


Figure IV. 10: schéma bloc du modèle de la machine asynchrone

IV.15.4 Résultats de la simulation :

- Démarrage à vide

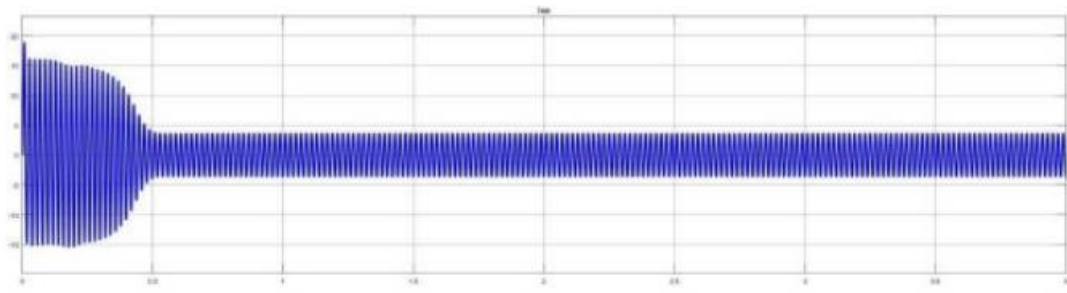


Figure IV. 11: le courant statorique en fonction du temps (démarrage à vide)

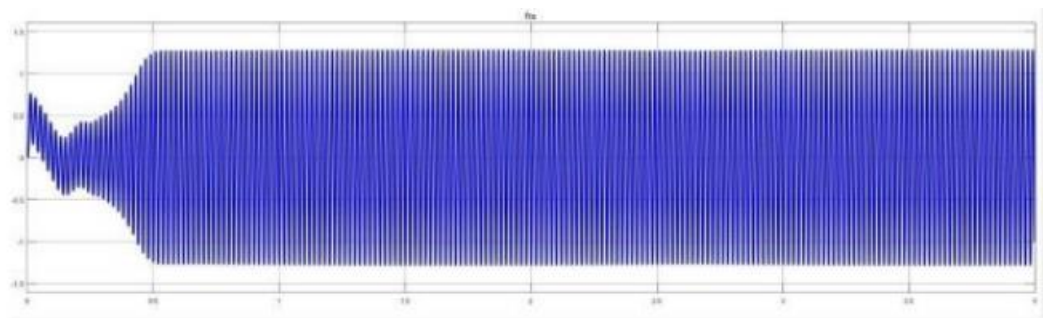


Figure IV. 12: le flux en fonction du temps (démarrage à vide)

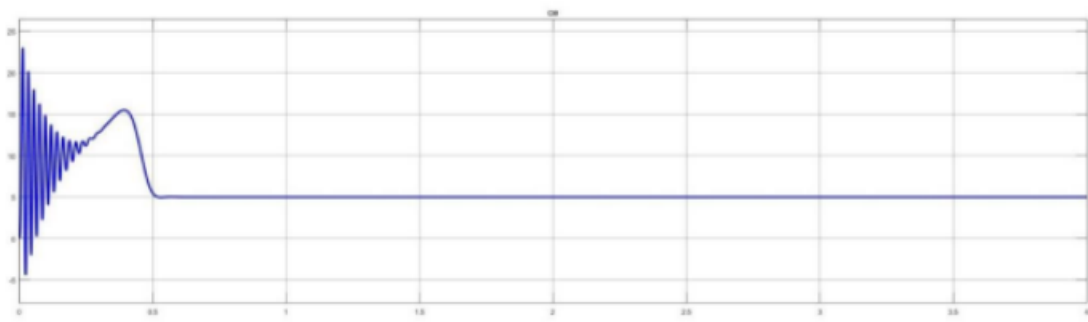


Figure IV. 13: le couple en fonction du temps (démarrage à vide)

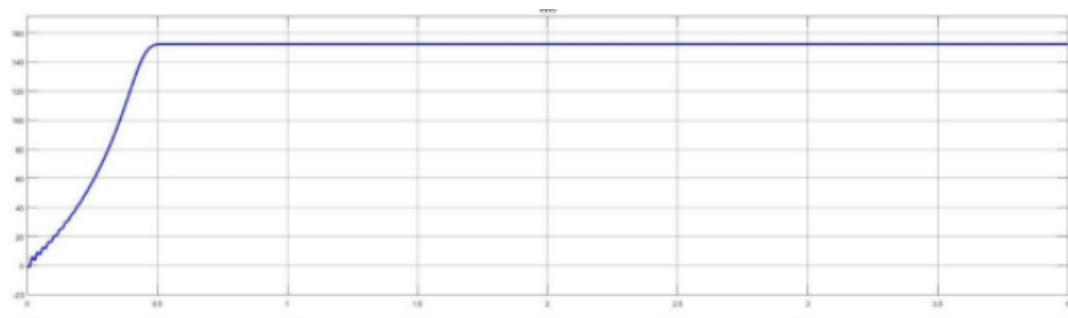


Figure IV. 14: la vitesse en fonction du temps (démarrage à vide)

- En charge :(Cr=10 N.m)

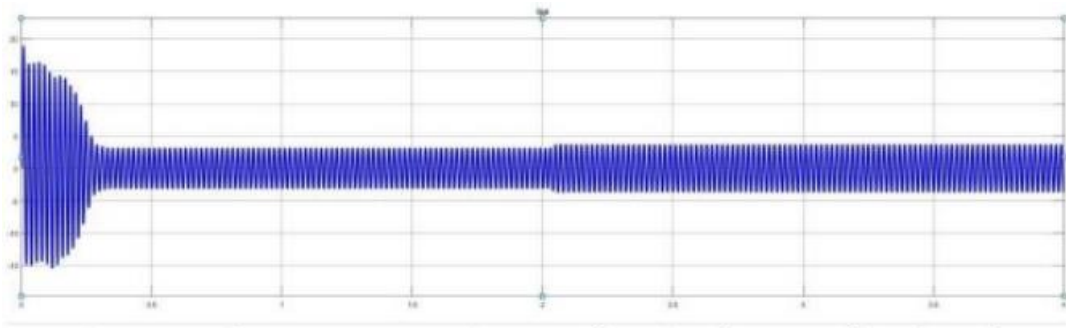


Figure IV. 15: le courant statorique en fonction du temps (en charge)

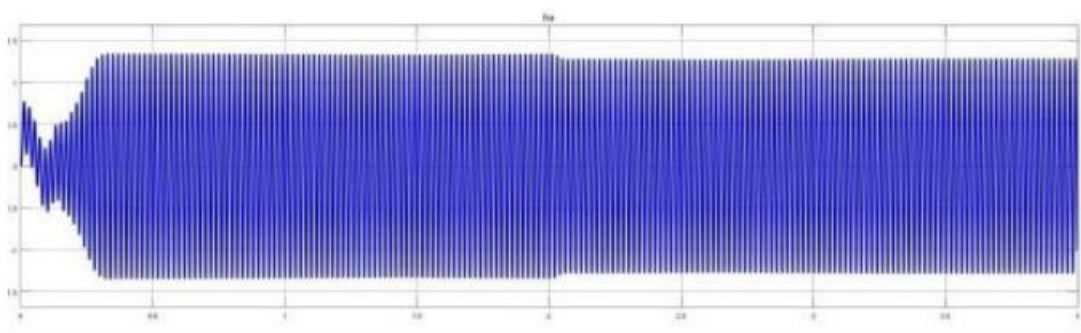


Figure IV. 16: le flux en fonction du temps (en charge)

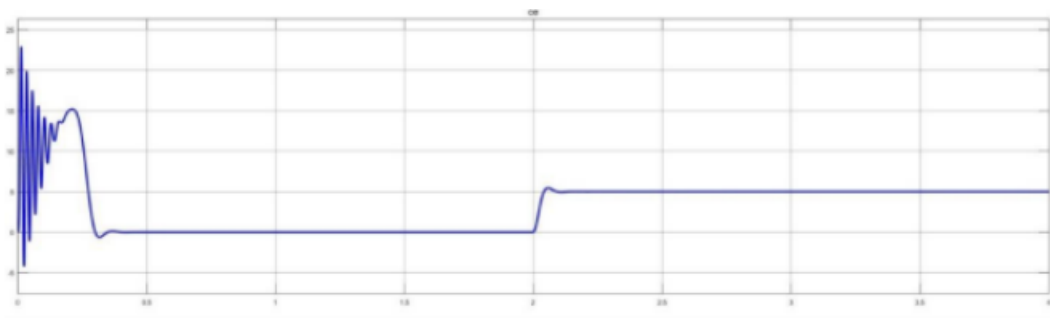


Figure IV. 17: le couple en fonction du temps (en charge)

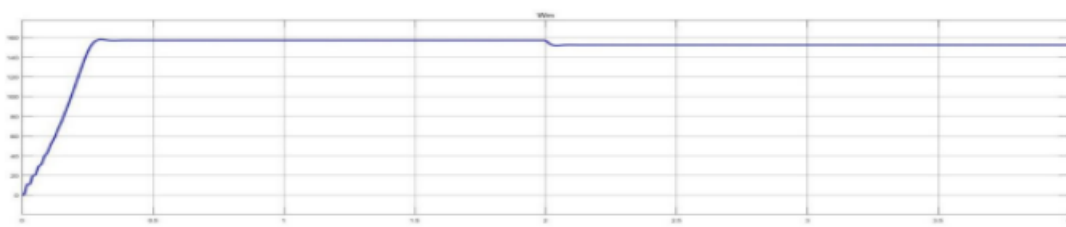


Figure IV. 18: la vitesse en fonction du temps (en charge)

IV.15.5 Interprétation des résultats de simulation :

À noter que les paramètres de la machine sont fournis en annexe (B). Dans un premier temps, nous allons simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone 380/600V, 50 Hz, sans perturbation appliquée ($C_r = 0$).

- **Démarrage à vide** : initialement, le courant du stator présente des oscillations qui s'atténuent rapidement après quelques cycles. Durant la phase transitoire, le couple est fortement pulsatile, avant de se stabiliser à zéro.
- **Sous charge** : dans une seconde étape, une perturbation de couple ($C_r = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$) est appliquée sur l'arbre du moteur à $t = 2 \text{ s}$. Les résultats des simulations sont présentés dans les figures 4-28 à 4-31. Lorsqu'une charge est introduite, le couple électromagnétique revient rapidement à sa valeur de consigne, compensant instantanément la perturbation. Avant de se stabiliser au niveau du couple résistant, la vitesse du rotor diminue, ce qui engendre un glissement important. Le courant du stator varie en fonction de la charge appliquée à l'arbre du moteur.

IV.15.6 Simulation de la batterie:

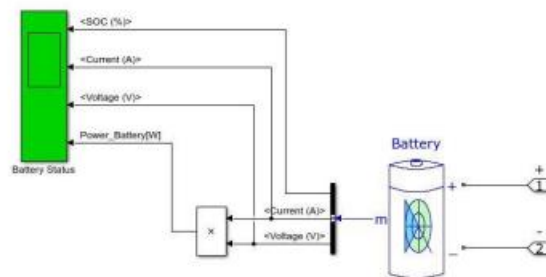


Figure V.19 simulation de batterie

IV.15.7 Résultats de simulations :

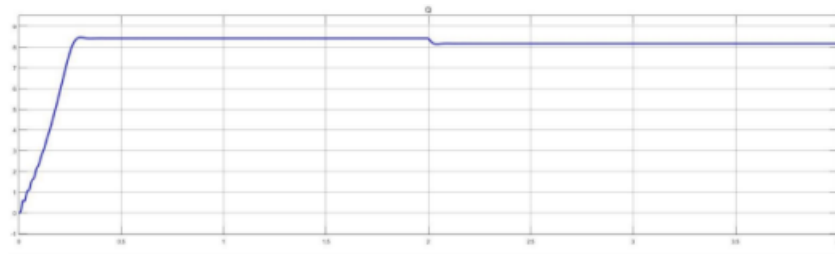


Figure IV. 20: Débit d'une pompe centrifuge

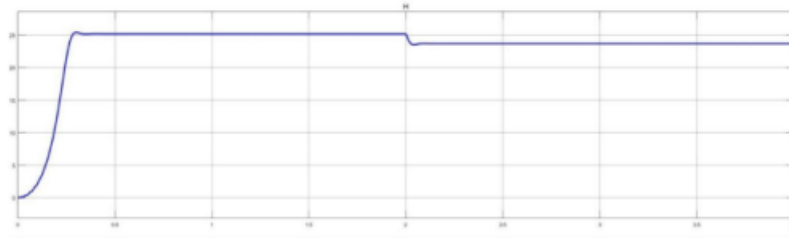


Figure IV. 21: Hauteur d'une pompe centrifuge

IV.16 Gestion de l'énergie entre les différents composants du système :

Pour assurer un fonctionnement totalement autonome du système, il est crucial d'optimiser la gestion du flux énergétique entre les différents éléments. L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre ces composants tout en régulant les phases de charge et de décharge du stockage. Cela comprend également la protection contre les surcharges et les décharges excessives, afin de préserver les caractéristiques physico-chimiques des batteries et d'en prolonger la durée de vie. Le diagramme correspondant à cet algorithme de gestion est présenté dans la figure.

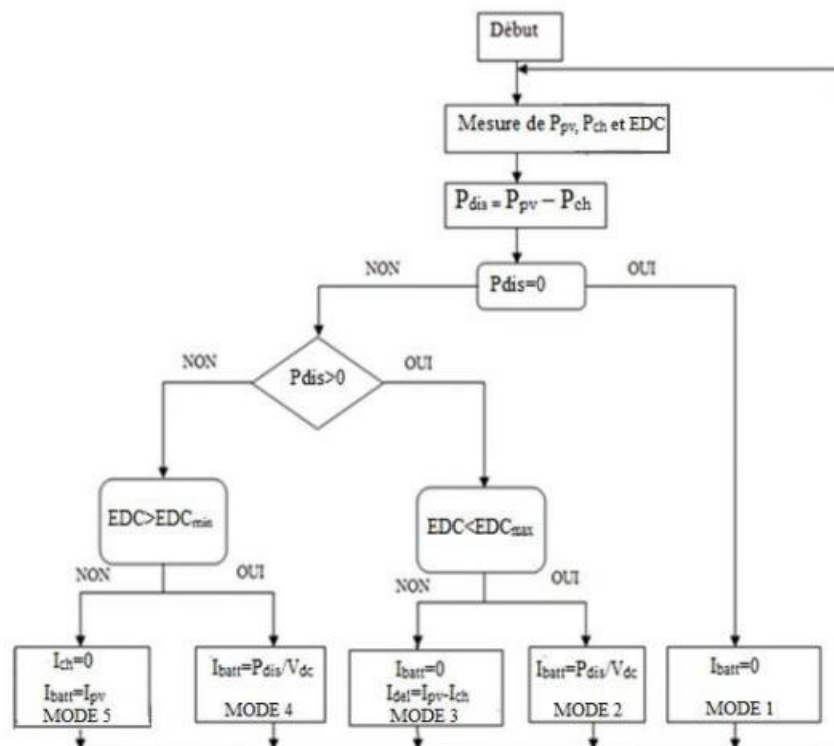


Figure IV. 22: Organigramme de gestion d'énergie du système globale

A partir de cet algorithme, on peut définir les modes de fonctionnement de ce système de gestion.

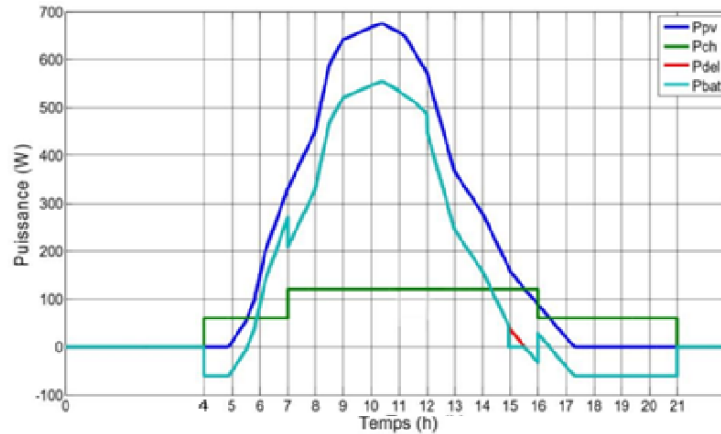
Soit P_{pv} la puissance fournie par les panneaux et P_{ch} la puissance demandée par la charge, la différence entre ces deux puissances est noté P_{dis} (puissance disponible) nous obtenons :

$$P_{dis} = P_{pv} - P_{ch} \text{ (IV.22)}$$

➤ Modes de fonctionnement :

- **Scénario 1 :** La puissance fournie par les panneaux photovoltaïques correspond exactement à la puissance requise par la charge, ce qui permet une alimentation directe de celle-ci.
- **Scénario 2 :** La puissance disponible dépasse la puissance demandée par la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{max} (90%) ; dans ce cas, la charge est alimentée et la batterie est rechargée simultanément.
- **Scénario 3 :** La puissance des panneaux photovoltaïques est supérieure à la demande de la charge et l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{max} (90%) ; la batterie est alors déconnectée, la charge est alimentée par les panneaux, et l'excédent d'énergie est dirigé vers une résistance de délestage.
- **Scénario 4 :** La puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est inférieure à celle requise par la charge, mais l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{min} (20%); le déficit est compensé par l'énergie stockée dans la batterie.
- **Scénario 5 :** La somme des puissances fournies par les panneaux photovoltaïques et la batterie est inférieure à la puissance demandée par la charge.

IV.17 Allure de différentes puissances.



figureIV.23 allure

Répartition horaire de la demande énergétique

La consommation énergétique varie selon les différentes périodes de la journée :

- **De 4h à 7h** : l'énergie est principalement utilisée pour l'irrigation.
- **De 7h à 16h** : la consommation est dédiée aux usages domestiques de la population.
- **De 16h à 21h** : la demande énergétique revient à l'irrigation.

Comportement du système selon les résultats de simulation

1. **De 4h à 5h :**
Pendant cette tranche horaire, l'ensoleillement est insuffisant pour que le générateur photovoltaïque (GPV) fonctionne, qui reste donc inactif. La charge est alors intégralement alimentée par les batteries, rechargées la veille. L'état de décharge des batteries demeure satisfaisant, avec un niveau supérieur à la limite minimale définie : $EDCB > EDCB_{min}(20\%)$.
2. **De 5h à 5h30 :**
Le GPV commence à produire de l'électricité, mais cette production reste inférieure à la demande. Les batteries prennent le relais pour compenser ce déficit, tout en maintenant un niveau de décharge acceptable : $EDCB > EDCB_{min}(20\%)$.
3. **De 5h30 à 15h :**
L'ensoleillement devient suffisant et stable, permettant au GPV de générer plus d'énergie que la charge requiert. L'excédent produit sert à recharger rapidement les batteries, tout en veillant à ne pas dépasser leur capacité maximale : $EDCB < EDCB_{max}(90\%)$.
4. **De 15h à 15h30 :**
Les batteries atteignent leur pleine capacité : $EDCB = EDCB_{max}(90\%)$.
À ce stade, elles sont automatiquement déconnectées afin d'éviter toute surcharge. Le

GPV continue d'alimenter la charge, tandis que le surplus d'énergie est dirigé vers une charge dérivative, grâce à un système de délestage.

IV.18 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'alimentation d'un système de pompage utilisant un moteur asynchrone, alimenté par un générateur photovoltaïque avec système de stockage. Le choix des éléments de système a été fondamental, car il doit être dimensionné en fonction des exigences de la charge, afin de minimiser la probabilité de perte d'énergie.

L'utilisation d'un onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) permet la conversion du courant continu en courant alternatif nécessaire au moteur. Malgré la génération d'harmoniques, les simulations ont montré que la commande MLI les repousse vers des fréquences élevées, réduisant ainsi leur effet néfaste.

L'intégration de batteries s'est avérée indispensable pour compenser l'intermittence de la production solaire, notamment durant la nuit ou les jours peu ensoleillés. La planification du stockage d'énergie doit tenir compte du profil de consommation, des conditions climatiques.

En résumé, la performance du système repose sur le dimensionnement cohérent et l'intégration harmonieuse du moteur, du stockage et de l'onduleur, afin d'assurer une alimentation fiable, stable et adaptée aux besoins d'irrigation en milieu isolé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'analyse menée à travers les quatre chapitres de ce travail met en lumière le potentiel considérable de l'énergie photovoltaïque comme levier du développement durable, en particulier dans le secteur agricole et les zones isolées. L'Algérie, dotée d'un ensoleillement exceptionnel, possède les conditions idéales pour exploiter cette source d'énergie propre et renouvelable, capable de répondre à une part significative de ses besoins énergétiques tout en réduisant son empreinte carbone.

Le premier chapitre a posé les bases théoriques en soulignant l'importance des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, dans la lutte contre le changement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il a été démontré que l'Algérie dispose d'un potentiel solaire exceptionnel qui, s'il est exploité par des investissements appropriés dans les infrastructures photovoltaïques, pourrait contribuer efficacement à satisfaire la demande énergétique nationale de manière durable.

Dans le deuxième chapitre, nous avons examiné les caractéristiques des cellules photovoltaïques à base de silicium. Bien que leur rendement reste limité, ces technologies présentent un grand intérêt pour des applications ciblées, telles que l'irrigation dans des zones isolées. Une amélioration de leur efficacité et une réduction des coûts de production sont toutefois nécessaires pour en élargir l'utilisation.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation et à la simulation du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. L'étude a révélé que les performances des panneaux sont fortement influencées par les conditions climatiques, notamment l'ensoleillement et la température. L'intégration de convertisseurs DC-DC et de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) s'est avérée indispensable pour optimiser la production énergétique en assurant une adaptation dynamique aux variations de la charge et de l'environnement.

Enfin, le quatrième chapitre a abordé l'application concrète de l'énergie photovoltaïque dans les systèmes d'irrigation et de la consommation domestique. Il a traité le dimensionnement du générateur solaire, le choix de la motopompe et l'importance des batteries de stockage. Cette étude a mis en évidence que l'utilisation de l'énergie solaire pour l'irrigation permet non seulement de pallier les insuffisances en ressources hydriques, notamment dans les régions arides et isolées, mais aussi de renforcer l'autonomie et la fiabilité des installations grâce au stockage d'énergie.

En fin, l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les systèmes d'irrigation et de la consommation domestique représente une solution viable, écologique et adaptée aux contextes ruraux. Elle constitue une piste stratégique en contribuant à la transition énergétique dans les pays à fort ensoleillement comme l'Algérie.

Références bibliographique

- [1] Énergie renouvelable – Wikipédia
https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_renouvelable
- [2] IFPEN - Énergie éolienne : transformer le vent en électricité
<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite>
- [3] Planète Énergies - Les énergies marines : comment ça marche ?
<https://www.planete-energies.com/fr/media/article/energies-marines-comment-ca-marche>
- [4] Connaissance des Énergies – Géothermie
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie>
- [5] Énergie solaire photovoltaïque – Wikipédia
https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_solaire_photovoltaïque
- [6] Plenitude – Avantages et inconvénients de l'énergie solaire
<https://www.eniplenitude.fr/en-lumiere/maison-ecologique/solaire/inconvenients-avantages-energie-solaire>
- [7] Connaissance des Énergies - Cellules photovoltaïques
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/la-cellule-photovoltaïque>
- [8] Anatomie d'une cellule photovoltaïque
<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/5/>
- [9] Les panneaux photovoltaïques - e-le
https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Principes/effet_photovoltaïque/dopage.htm
- [10] PVEducation - The Photovoltaic Effect
https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Principes/effet_photovoltaïque/dopage.htm
- [11] <https://youmatter.world>
- [12] AOUI Saliha (*Modélisation et commande d'un système de Pompage photovoltaïque*)
UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF-1 année 2014.
- [13] *énergie techno.com*

[14] *DC-DC Power Converters Robert W. Erickson Department of Electrical and Computer Engineering University of Colorado Boulder, CO 80309-0425.*

[15] *Source: Wikipédia sous licence CC-BY-SA 3.0.
La liste des auteurs est disponible*

[16] *<https://www.techno-science.net/definition/3172.html>*

[17] [?] *Mohammad H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, 4th Edition, Pearson, 2013.*

[18] *Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition, Wiley, 2003.*