

## Dédicaces

---

Je dédie ce travail :

A mes chers parents

Leurs encouragements m'ont inspiré à toujours viser des attentes élevées et à insister pour les atteindre.

A ma chère grand-mère

Ses prières m'ont soutenu tout au long de mon parcours d'étude.

A mon cher mari

Sa patience et son soutien m'ont donné la foi nécessaire pour poursuivre mes études et atteindre mes objectifs.

A mes chers beaux-parents

Leur amour et encouragement m'ont conduit avec lumière d'espoir et de soutien.

A mes chers frères et ma chère sœur

Symbole d'amour et du don qui se manifeste quand les choses semblent sombres.

A toute ma famille et tous ceux qui m'aiment et qui m'ont soutenu le long de mon parcours d'étude

**Ghizlane**

## Remerciements

---

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a été effectué au sein du laboratoire d'automatique, de conversion d'énergie et de microélectronique (LACEM) de la faculté des sciences et techniques de béni-Mellal, Université Sultane Moulay Slimane sous la direction de Pr. Abdelouahed Abounada.

Avant de me lancer dans le vif de mon travail, je saisis l'occasion pour exprimer ma sincère gratitude à M. Abdelouahed Abounada, pour son soutien continu pendant la conduite de ce projet de thèse de doctorat, pour sa patience, ses qualités humaines, ses conseils dévoués, sa motivation et son dynamisme. Il était toujours disposé et enthousiaste à aider de toutes les manières possibles tout au long de mon projet de recherche. Il m'a inspiré à devenir une chercheuse indépendante et m'a aidé à réaliser le pouvoir du raisonnement critique. Ce fut un grand privilège et un honneur de travailler et d'étudier sous sa direction.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir évaluer et participer à la présentation de mon travail. Plus précisément je tiens à remercier Pr. Mustapha Ait Lafkih, président du jury de la thèse, pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'il m'a exposées. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude pour l'intérêt qu'il a accordé à nos travaux. Mes remerciements vont également à Pr. Jaouad Foshi, Pr. El Mahjoub Boufounas et Pr. Ali Nejmi d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Leurs remarques et commentaires m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire. Mes remerciements s'adressent aussi à Pr. Hicham Aissaoui qui a participé à ma présentation en tant qu'examineur. Je suis tellement reconnaissante pour le temps qu'il a consacré afin d'examiner le manuscrit et pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'il m'a proposées. Je suis extrêmement reconnaissante aux membres de jury de rendre ma défense un moment agréable et des remarques et suggestions inestimables qui vont enrichir et clarifier mon rapport.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mes parents, dont l'amour et les conseils m'accompagnent dans tout ce que je poursuis. Ils sont les modèles ultimes. Plus important encore, je tiens à remercier mon époux aimant et solidaire qui m'a fourni une inspiration sans fin.

Je suis reconnaissante à tous ceux avec qui j'ai eu le plaisir de travailler pendant ce projet.

## Avant-propos

---

Prénom et nom de l'auteur de la thèse : Chbirik Ghizlane.

Intitulé de la thèse : Intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans les systèmes électriques : optimisation et régulation

Nom et prénom du directeur de thèse : Pr. Abdelouahed Abounada

Structure d'accueil : Laboratoire d'Automatique, de Conversion de l'Energie et de Microélectronique

### Publications internationales :

1. **G. Chbirik**, Z. Massaq, A. Abounada, ET M. MABROUKI, "Speed Control of Induction Motor Driving a Pump Supplied by a Photovoltaic Array". International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 10, No 1, pp. 237-242, 2020.
2. Z. Massaq, **G. Chbirik**, A. Abounada, A. Brahmi, M. Ramzi, "Control of Photovoltaic Water Pumping System Employing Non-linear Predictive Control and Fuzzy Logic Controller", International Review on Modeling and Simulations (I.R.E.MO.S.), en cours de publication, 2020.
3. G. CHBIRIK, A. Abounada, et Z. Massaq, "Contribution to the improvement of a solar pumping system based on asynchronous machine. International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE). IEEE, pp. 1-5. In 2019.
4. **G. Chbirik**, A. Abounada<sup>1</sup>, A. Brahmi. "A Study of a Photovoltaic Production Line Controlled with a PI Corrector», Journal of Energy Technologies and Policy, vol. 8, no. 1, 2018.

### Communications internationales:

1. A. Brahmi, **G. Chbirik**, et A. Abounada, "Design of SPWM control unit based on microcontroller for photovoltaic inverters". 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), 16-19 Avril, 2020.IEEE.

2. Z. Massaq, A. Abounada, **G. Chbirik**, A. Brahmi, and M. Ramzi. "Double Stage Solar PV Array Fed Sensorless Vector Controlled Induction Motor for Irrigational Purpose" Seventh Edition of the International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'19), Agadir 27-30 November 2019.IEEE.
3. **G. Chbirik**, A. Abounada, Z. Massaq. "Contribution to the improvement of a solar pumping system based on asynchronous machine". International conference of computer science and renewable energies ICCSRE'2019, Agadir 22-24 juillet 2019. IEEE.
4. **G. Chbirik**, A. Abounada, A. Brahmi. "Dimensionnement et simulation d'une chaine de pompage solaire à base d'une machine asynchrone". Colloque franco-maghrébin sur les énergies renouvelables (COFMER'03), Marrakech 16 - 18 avril 2019.
5. A. Brahmi, A. Abounada, **G. Chbirik**. "Platform Based PIC16F876 Microcontroller for Sinusoidal Pulse Width Modulation SPWM Generation for the Inverter Control Circuit". 13ème édition du Colloque de l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'information et des Systèmes CETSIS, Fès 29-31 Octobre 2018.
6. A. Brahmi, A. Abounada, **G. Chbirik**. "Design and optimal choice of a 1.5 kW photovoltaic pumping system for irrigation purposes". 1st international congress on solar energy research, technology and applications ICERTA, OUARZAZATE, 8-10 juin 2018.IEEE.
7. **G. Chbirik**, A. Abounada, A. Brahmi, "A Study of a Photovoltaic Production Line Controlled with a PI Corrector". Colloque international sur les énergies renouvelables et les emplois verts, Casablanca 24-25 avril 2017. IEEE.



## Résumé

---

Ce travail de thèse a été consacré à l'étude, la régulation et l'optimisation d'une chaîne de production d'électricité par conversion photovoltaïque. Au début, une étude bibliographique sur les étages d'un système photovoltaïque a été élaborée. Ce qui nous a permis de choisir la structure adoptée pour notre premier système et dimensionner ses étages. La structure choisie est constituée d'un générateur photovoltaïque, d'un hacheur élévateur, d'un onduleur et d'un filtre. Les premiers tests de notre dimensionnement ont été faits pour une charge résistive. Le comportement du générateur photovoltaïque utilisé et l'influence du changement des conditions climatiques sur son fonctionnement ont été étudiés et simulés sous le logiciel Matlab Simulink. Les résultats de la simulation montrent que la variation de l'irradiation et de la température entraînent la chute de la puissance crête du générateur photovoltaïque. Afin de surmonter cette influence et optimiser le fonctionnement du système, l'algorithme de la recherche du point de puissance maximale perturber et observer a été adopté. Ceci a permis au système d'exploiter la puissance maximale correspondante à chaque valeur de l'irradiation et de la température. Le fonctionnement du système dimensionné et optimisé a été étudié par simulation sous Matlab Simulink. Les résultats de la simulation ont prouvé le bon fonctionnement du système PV. En effet, le générateur PV génère la puissance maximale correspondante aux valeurs de l'irradiation et de la température considérées pendant la simulation. Afin de surmonter la variation de la tension de sortie du hacheur élévateur le système élaboré est doté d'une régulation de la tension de bus continu. Ceci a été assuré par l'intégration d'un correcteur PI qui contrôle l'interrupteur du hacheur élévateur. Les résultats de la simulation du système régulé ont prouvé que la sortie du hacheur suit la référence avec précision.

Par la suite, le pompage photovoltaïque a été choisi comme application. En effet, des études théoriques et techniques nous ont mené à choisir, dimensionner et optimiser un système de pompage d'eau photovoltaïque autonome pour des fins d'irrigation. Tout d'abord, on a commencé par déterminer les besoins en eau, choisir le moteur convenable pour l'entraînement de la pompe et calculer la puissance électrique requise pour assurer le débit d'eau nécessaire.

La structure du système de pompage contient les mêmes étages que ceux intégrés dans le système étudié au début de cette thèse. Le dimensionnement a été refait afin d'adapter le nouveau système à alimenter un moteur asynchrone triphasé qui entraîne une pompe submersible. Afin d'améliorer le débit d'eau pomper même aux conditions climatiques critiques, une optimisation par régulation de débit d'eau en fonction de la puissance photovoltaïque disponible a été mise en place. Ceci a été réalisé par l'introduction d'un régulateur proportionnel intégral qui contrôle la fréquence de commutation des interrupteurs commandés de l'onduleur triphasé. Le système a été implémenté et simulé dans l'environnement MATLAB / SIMULINK pour vérifier ses performances.

En fin, une réalisation pratique de certains circuits de la chaîne a été mise en place. En effet, une carte de commande du hacheur et de l'onduleur basée sur le microcontrôleur PIC16F876A a été réalisée. C'est une carte programmable directement par un ordinateur dotée d'une interface série RS232. Elle contient un circuit de protection formé par l'optocoupleur HCPL2631 et le driver IR2113 et d'un afficheur 7 segments pour le suivi de la température au niveau des interrupteurs et l'affichage de la tension et du courant pendant les tests.

**Mots clés :**

Générateur photovoltaïque ; convertisseur élévateur ; algorithme de recherche du point de puissance maximale perturber et observer; Onduleur triphasé, la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale ; régulateur proportionnelle intégrale ; moteur asynchrone triphasé ; régulation de vitesse du moteur asynchrone.



## Abstract

---

This thesis work was devoted to the study, regulation and optimization of an electricity production chain by photovoltaic conversion. Initially, a bibliographical study on the photovoltaic system stages was developed. This allowed us to choose the structure adopted for our first system and size its components. The chosen structure contains a photovoltaic generator, a boost converter, an inverter and a filter. The first tests of our system were made for a resistive load. The behaviour of the photovoltaic generator used and the influence of climate change on its operation were studied and simulated using the Matlab Simulink software. The results of the simulation show that the degradation of irradiation and temperature causes a fall of the peak power of the photovoltaic generator. In order to overcome this influence and optimize the operation of the system, the maximum power point tracking algorithm disturbs and observe was adopted. This allowed the system to use the maximum power corresponding to each irradiation and temperature value. The operation of the dimensioned and optimized system was studied by simulation in Matlab Simulink. The results of the simulation proved that the PV system works properly. The PV generator generates the maximum power corresponding to the irradiation and temperature values considered during the simulation. The developed system is also equipped with continuous bus voltage regulation. This has been ensured by the integration of a PI corrector that controls the switching of the step up converter. The results of the simulation of the regulated system proved that the output of the converter follows the reference.

Thereafter, photovoltaic pumping was chosen as an application. Theoretical and technical studies made have led us to choose, size and optimize a stand-alone photovoltaic water pumping system for irrigation purposes. First of all, we started by determining the water requirements, choose the suitable motor to drive the pump and calculate the electrical power required to ensure the necessary water flow.

The structure of the pumping system contains the same stages as those integrated into the system studied at the beginning of this thesis. The sizing has been redone to adapt the new system to feed a three-phase asynchronous motor that drives a submersible pump. An optimization by water flow regulation has been implemented according to the photovoltaic power available. This was achieved by the introduction of an integral proportional controller

that controls the switching frequency of the three-phase inverter controlled switches. The system has been implemented and simulated in the MATLAB/SIMULINK environment to verify its performance.

In the end, a practical realization of some circuits of the chain was set up. Indeed, a control board of the converter and inverter based on the microcontroller PIC16F876A has been realized. It is a board programmable by the computer. It is formed with an RS232 programming interface, a protection circuit formed by the opto-coupler HCPL2631 and the driver IR2113, a 7 segments display for temperature monitoring at switches and voltage and current display during tests.

**Keywords:**

Photovoltaic generator; boost converter; maximum power point tracking “disturb and observe”; Three-phase inverter, sinusoidal pulse width modulation; integral proportional regulator; three-phase asynchronous motor; asynchronous motor speed regulation.

# Table des matières

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Le solaire et la conversion photovoltaïque .....</b>	<b>5</b>
1. Introduction.....	5
2. L'énergie solaire.....	5
3. Le photovoltaïque.....	8
3.1. <i>Historique</i> .....	8
3.2. <i>Type des installations PV</i> .....	9
4. Le générateur photovoltaïque.....	12
4.1. <i>Composition</i> .....	12
4.2. <i>Fonctionnement</i> .....	13
4.3. <i>Caractéristiques</i> .....	15
4.4. <i>Types du panneau solaire</i> .....	17
5. Le convertisseur continu-continu.....	18
5.1. <i>Le convertisseur élévateur</i> .....	18
5.2. <i>Le convertisseur abaisseur</i> .....	20
5.3. <i>Le convertisseur abaisseur-élévateur</i> .....	21
6. Recherche du point de puissance maximale.....	22
6.1. <i>La technique perturbation et d'observation</i> .....	22
6.2. <i>La technique conductance incrémentale</i> .....	24
6.3. <i>La technique Hill Climbing</i> .....	25
7. Le convertisseur continu alternatif.....	26
7.1. <i>Onduleur à onde carrée</i> .....	27
7.2. <i>Onduleur à onde sinusoïdale modifiée</i> .....	27
7.3. <i>Onduleur à onde sinusoïdale</i> .....	28
8. Modulation de largeur d'impulsion.....	29
8.1. <i>La modulation de largeur d'impulsion simple</i> .....	30
8.2. <i>La modulation de largeur d'impulsion multiple</i> .....	30
8.3. <i>La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale</i> .....	31
9. Conclusion .....	32
<b>Chapitre II : Etude, Dimensionnement et simulation d'un système PV autonome.....</b>	<b>33</b>
1. Introduction.....	33
2. Le générateur photovoltaïque .....	33
3. Le hacheur élévateur .....	34
4. L'onduleur .....	37
5. Le filtre LC.....	38
6. Simulations de la chaîne de pompage adopté.....	38
6.1. <i>Simulation du système commandé par rapport cyclique constant</i> .....	39
6.2. <i>Simulation du système commandé par régulateur PI</i> .....	40
7. Conclusion.....	42

<b>Chapitre III : Les systèmes PV autonomes et le pompage.....</b>	<b>44</b>
1. Introduction.....	44
2. Performances des systèmes de pompage d'eau PV.....	45
3. Structure des systèmes de pompage photovoltaïques.....	48
4. La pompe.....	51
4.1. <i>La pompe centrifuge</i> .....	51
4.2. <i>La pompe à rotor hélicoïdale excentré</i> .....	52
5. Le moteur.....	52
6. Conclusion.....	54
<b>Chapitre IV : La chaine de pompage adoptée.....</b>	<b>55</b>
1. Introduction.....	55
2. La structure du système de pompage adoptée .....	55
3. Le dimensionnement de la chaine de pompage .....	56
3.1. <i>La pompe</i> .....	56
3.1.1. <i>Choix de la pompe</i> .....	56
3.1.2. <i>Dimensionnement de la pompe</i> .....	57
3.2. <i>Le moteur</i> .....	58
3.3. <i>L'onduleur</i> .....	59
3.4. <i>Le hacheur élévateur</i> .....	61
3.5. <i>Le générateur photovoltaïque</i> .....	61
4. Simulations de la chaine de pompage adoptée.....	64
5. Régulation de la vitesse du moteur asynchrone.....	68
6. Conclusion.....	73
<b>Chapitre V : Réalisation pratique.....</b>	<b>74</b>
1. Introduction.....	74
2. Réalisation de la carte de commande programmable.....	74
3. conclusion.....	81
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>82</b>

## Liste des figures

---

Figure 1 : L'énergie solaire reçue par le sol dans le monde en KWh/m <sup>2</sup> /an.....	5
Figure 2 : Sources de production mondiale d'électricité.....	6
Figure 3 : Système photovoltaïque autonome avec une charge continue.....	11
Figure 4 : Système photovoltaïque autonome avec une charge alternative.....	12
Figure 5 : Construction des modules photovoltaïque.....	13
Figure 6 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	14
Figure 7 : Influence de la variation de la température sur les caractéristiques puissance-tension du générateur PV .....	16
Figure 8 : Influence de la variation de l'irradiation sur les caractéristiques puissance -tension du générateur PV .....	17
Figure 9 : Hacheur élévateur.....	19
Figure 10 : La phase d'accumulation d'énergie.....	19
Figure 11 : La phase de roue libre.....	19
Figure 12 : Hacheur abaisseur.....	20
Figure 13: Hacheur abaisseur-élévateur.....	21
Figure 14 : Principe de la MPPT perturbation et observation.....	23
Figure 15 : L'organigramme de la MPPT conductance incrémentale.....	24
Figure 16 : algorithme de la technique Hill Climbing.....	25
Figure 17 : Structure de base d'un onduleur monophasé.....	27
Figure 18 : Forme d'onde de sortie d'un onduleur à onde carrée.....	27
Figure 19 : Forme d'onde de sortie d'un onduleur à onde sinusoïdale modifiée.....	28
Figure 20 : Forme d'onde de sortie d'un onduleur à onde sinusoïdale.....	28

Figure 21 : La modulation de largeur d'impulsion simple.....	30
Figure 22 : La modulation de largeur d'impulsion multiple.....	31
Figure 23 : La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale.....	31
Figure 24 : Les caractéristiques I/V du générateur PV en fonction de la variation de l'irradiation.....	33
Figure 25 : Les caractéristiques P/V du générateur PV en fonction de la variation de l'irradiation.....	33
Figure 26 : Les caractéristiques I/V du générateur PV en fonction de la variation de la température.....	34
Figure 27 : Les caractéristiques I/V du générateur PV en fonction de la variation de de la température.....	34
Figure 28 : Hacheur élévateur.....	35
Figure 29 : Boucle de régulation.....	36
Figure 30 : L'onduleur.....	37
Figure 31: La commande MLIS.....	38
Figure 32 : Variation de l'irradiation.....	39
Figure 33 : Variation de la température.....	39
Figure 34 : Système commandé par un rapport cyclique constant.....	39
Figure 35 : La tension du hacheur élévateur.....	40
Figure 36 : Système commandé Par le régulateur PI.....	40
Figure 37 : Tension du hacheur élévateur.....	41
Figure 38 : Rapport cyclique.....	41
Figure 39 : Tension de sortie de l'onduleur.....	42
Figure 40 : Tension de sortie du filtre.....	42

Figure 41 : Système de pompage à couplage directe.....	48
Figure 42 : Système de pompage a couplage directe avec convertisseur DC_DC.....	49
Figure 43 : Système de pompage DC avec stockage d'énergie.....	49
Figure 44 : Système de pompage avec moteur alternatif.....	50
Figure 45 : Système de pompage avec moteur alternatif et stockage d'énergie.....	50
Figure 46 : Structure du système de pompage adoptée.....	56
Figure 47: Les types de pompe et leur plage de fonctionnement en rapport avec la hauteur de la source d'eau et les besoins quotidiens en eau.....	57
Figure 48 : Onduleur pont H triphasé.....	59
Figure 49 : Branchement des modules photovoltaïques.....	62
Figure 50 : Le système de pompage adopté.....	64
Figure 51 : Variation de l'irradiation.....	64
Figure 52 : Variation de la température.....	64
Figure 53 : Simulation du générateur PV.....	65
Figure 54 : Caractéristiques P/V du générateur PV choisi.....	65
Figure 55 : Caractéristiques I/V du générateur PV choisi.....	65
Figure 56 : Courant de sortie du générateur PV.....	66
Figure 57: Tension de sortie du générateur PV.....	66
Figure 58 : Tensions de sortie de l'onduleur .....	67
Figure 59 : Vitesse du moteur asynchrone.....	67
Figure 60 : Couple du moteur asynchrone.....	68
Figure 61 : Circuit de régulation du système de pompage.....	69

Figure 62 : La variation de la température appliquée à l'entrée du générateur PV.....	70
Figure 63 : La variation de l'irradiation appliquée à l'entrée du générateur PV.....	70
Figure 64 : Caractéristiques P/V du générateur PV sous la variation de l'irradiation et de la température.....	70
Figure 65 : Caractéristiques I/V du générateur PV sous la variation de l'irradiation et de la température.....	70
Figure 66 : Courant de sortie du générateur PV.....	71
Figure 67 : Tension de sortie du générateur PV.....	71
Figure 68 : Fréquence générée par le régulateur PI.....	72
Figure 69 : Courbe du couple du moteur asynchrone.....	72
Figure 70 : Vitesse du moteur asynchrone et vitesse de référence.....	73
Figure 71 : Circuit de communication pic pc.....	75
Figure 72 : Réalisation pratique du circuit de communication pic pc.....	76
Figure 73 : Circuit de mesure et d'affichage de la température.....	76
Figure 74 : Réalisation pratique du circuit d'affichage de la température.....	77
Figure 75 : Circuit de protection et d'amplification.....	78
Figure 76 : Réalisation pratique du circuit de protection et d'amplification.....	78
Figure 77 : Signal appliqué aux entrées de l'optocoupleur.....	79
Figure 78 : Signaux de sortie de l'optocoupleur.....	79
Figure 79: Signaux d'entrée du driver.....	80
Figure 76 : Signaux de sortie du driver.....	80



## Abréviations

---

PV: Photovoltaïque

I : Courant

V : Tension

$I_{pv}$ : Courant photovoltaïque

$V_{pv}$  : Tension photovoltaïque

MPP : Point de puissance maximale

$I_{mpp}$  : Courant du point de puissance maximale

$V_{mpp}$  : Tension du point de puissance maximale

MPPT : Programme de recherche du point de puissance maximale

PI : Régulateur proportionnel intégrale

G : Irradiation

T : Température

Cd-Te : Cellules composé de tellure de cadmium

CIS/CIGS: Cellules composé de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium.

Cds: Cellules composé de sulfure de cadmium

$I_d$  : Courant de la diode

$R_s$  : Résistance série

$R_p$  : Résistance shunt

DC: Continue

AC : Alternatif

$V_e$  : Tension d'entrée

$V_s$  : Tension de sortie

D : Rapport cyclique

MLI: Modulation de largeur d'impulsion

J : Joule

Ht: Hauteur totale

P&O : Perturber et observer

j: Jour

s: second

KWh: Kilowatt-heure

TWh: Téra watt-heure

GW: Gigawatt

MW: Mégawatt

EVA : Acétale de vinyle d'éthylène

Icc : Courant de court-circuit

Vco : Tension de circuit ouvert

DSC : Cellules à colorant photosensible

L : Inductance

C : Condensateur

Pn : Puissance actuelle

Pn-1 : Puissance de référence

$\Delta D$  : Le pas de perturbation du rapport cyclique

Dn : Le rapport cyclique actuel

$\Delta I$  : Ondulation de courant

Fd : Fréquence de découpage

$\Delta V$ s : ondulation de tension

Is: courant de sortie

R: Résistance de la charge du boost

F0: fréquence de coupure

°C: Celsius

HMT : hauteur manométrique totale

Ht : hauteur totale

Ch: la constante hydraulique ( $Ch=2.725 \text{ Kg.s.h/m}^2$ )

$Q_h$ : le débit horaire

$H_t$ : la hauteur totale

$\eta_{mp}$ : le rendement du moteur et de la pompe

$E_h$ : puissance hydraulique

$P_e$ : puissance électrique

$\eta_{mp}$ : le rendement du moteur et de la pompe

$K$ : constante de la pompe

$T$ : couple de la charge

$W_r$ : vitesse de rotation du rotor

$P_m$ : puissance mécanique

$P_{cc}$ : puissance crête

$\eta_{ond}$ : rendement onduleur

$P_n$ : puissance nominale

$N_h$ : nombre d'heures de fonctionnement

$E_{irr}$ : l'irradiation journalière

$F_p$ : facteur de perte

$P_u$ : Puissance utile

$T_u$ : Couple utile

$\Omega$ : Vitesse angulaire

$n$ : Vitesse de rotation

$\eta$ : Rendement

## Introduction générale

---

Les énergies dérivées des sources renouvelables comme le soleil, l'eau, le vent... contribuent aujourd'hui à la production d'énergie avec des pourcentages de plus en plus importants. En effet, les technologies d'énergie renouvelable sont utilisées pour produire de l'électricité, des carburants et de la chaleur pour répondre aux besoins des secteurs économiques, du transport et des procédés industriels.

Ainsi, le manque des lignes d'électricité dans les zones éloignées, la déplétion des sources d'énergie traditionnelles, et la dégradation de l'environnement causée par la consommation des combustibles fossiles exigent l'utilisation des sources d'énergie renouvelables. Ces sources d'énergie sont inépuisables et ne causent aucun dommage à l'environnement, ce qui en fait une meilleure solution pour remédier à l'augmentation significative de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

De là, la régulation et l'optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes électriques est devenue un axe de recherche qui suscite un grand intérêt.

Propre, illimitée et largement distribuée à travers le monde, l'énergie solaire se présente sur la terre avec une quantité plus grande de ce que le monde consomme aujourd'hui. L'exploitation de l'énergie solaire se manifeste sous deux aspects :

- Le chauffage où on exploite des capteurs solaires thermiques qui transforment le rayonnement solaire en chaleur et réchauffent le liquide de refroidissement qui les traverse.
- La production d'électricité établie par des panneaux solaires constitués de cellules photovoltaïques qui transforment le rayonnement solaire en électricité.

Inscrit dans la deuxième catégorie, le pompage photovoltaïque est une technologie qui répond au défi mondial pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone, et même réduire la dépendance à l'électricité classique et les combustibles fossiles. C'est une solution énergétique plus durable qui permet d'offrir un approvisionnement en eau suffisant.

Un système de pompage photovoltaïque se compose de plusieurs étages de traitement d'énergie interconnectés, dont l'objectif est d'atteindre la puissance nécessaire pour alimenter une pompe. Les étages de traitement se différencient selon le type de la pompe à utiliser.

Une pompe à alimentation continue nécessite seulement un moteur continu. Si une amélioration est prévue, l'ajout d'un étage d'adaptation entre le panneau solaire et le moteur aura lieu.

Une pompe à alimentation alternative nécessite un convertisseur du continu en alternatif, pour adapter la puissance continue générée par le panneau solaire au moteur alternatif. De même l'ajout d'un étage d'adaptation entre le panneau solaire et le convertisseur continu alternatif est possible pour l'amélioration de l'efficacité de la chaîne de pompage.

De nombreux travaux ont étudié le pompage photovoltaïque. A chaque fois l'objectif est de minimiser le coût de l'installation de la station de pompage et optimiser son fonctionnement par l'ajout des régulateurs. Le dimensionnement de la chaîne de pompage photovoltaïque nécessite une estimation de la consommation d'eau et même une étude des conditions climatiques (irradiation et température). Vu que l'efficacité de la production d'énergie photovoltaïque est liée au rayonnement solaire et au degré de la température. Ce travail vise l'étude et le développement des algorithmes de commande numériques afin d'optimiser une chaîne de conversion photovoltaïque dimensionnée pour des fins de pompage. L'objectif de ce travail est de pomper un débit d'eau spécifique pour l'irrigation du jardin de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal à partir d'un puits de profondeur 60 m. De ce fait, cette étude vise le choix, l'étude et le dimensionnement des différents étages nécessaires pour pomper un débit d'eau de  $25 \text{ m}^3/\text{j}$ , et garantir un fonctionnement optimal de l'ensemble du système.

La dissertation de cette thèse contient cinq chapitres :

- Le premier chapitre se divise en trois parties. La première partie présentera une étude de l'énergie solaire, sa répartition au monde et son potentiel au Maroc. Elle exposera aussi la participation de l'énergie solaire à la production mondiale et le degré de son exploitation aux différents pays.

La deuxième partie entamera l'exploitation de l'énergie solaire sous forme photovoltaïque. Elle présentera l'histoire de la découverte et du développement de l'effet PV ainsi que les structures des installations PV développées au cours du temps.

La troisième partie présentera une étude théorique des différents étages de traitement de puissance qu'un système PV peut comprendre. Il contiendra :

- La composition, le fonctionnement, les caractéristiques et les types des panneaux PV.
  - La composition et le fonctionnement des trois types de convertisseur continu- continu : élévateur, abaisseur et abaisseur-élévateur.
  - Le principe de quelques techniques de recherche du point de puissance maximale du générateur PV : perturbation et d'observation, conductance incrémentale, Hill CLIMBING.
  - Une description du convertisseur continu alternatif à onde carrée, à onde sinusoïdale modifiée et à onde sinusoïdale.
  - Le principe des trois types de la modulation de largeur d'impulsion : simple, multiple, sinusoïdale.
- 
- Le deuxième chapitre comprendra le choix et le dimensionnement de la chaîne de conversion ainsi que la régulation de la tension du bus continu. Il contient deux parties : La première partie présentera le dimensionnement du système PV autonome qui contient un générateur PV, un hacheur élévateur, un onduleur triphasé, un régulateur PI, un filtre et une charge triphasée. Elle entamera aussi la méthode utilisée pour le paramétrage du régulateur. la deuxième partie exposera les résultats de la simulation du système dimensionné sous MATLAB SIMULINK.
  - Le troisième chapitre entamera une étude des systèmes PV autonomes dédiés au pompage. En effet, cette partie contiendra un descriptif des différentes configurations des systèmes de pompage PV élaborées dans la littérature et une étude de leurs performances.

- Le quatrième chapitre présentera le système de pompage adopté pour des fins d'irrigation. Il est divisé en deux parties. La première partie du chapitre présentera la structure choisie pour le système adopté, les méthodes du dimensionnement et l'étude des différentes commandes utilisées pour améliorer le fonctionnement du système. La deuxième partie contiendra les résultats de la simulation et la discussion des résultats obtenus.
- Le dernier chapitre présentera la réalisation d'un circuit de commande programmable directement par l'ordinateur à base du microcontrôleur PIC16F876A.

Ce travail se termine par des conclusions générales et des perspectives ouvertes par les solutions proposées.

## Chapitre I

### *Le solaire et la conversion photovoltaïque*

#### 1. Introduction

Ce chapitre présentera l'importance du soleil comme source d'énergie en donnant des statistiques de la quantité d'énergie émise par le soleil et la répartition de cette énergie dans le monde entier. On outre, il présentera une étude de l'exploitation de cette source d'énergie qui connaît une croissance importante. Différentes techniques ont été présentées, ce chapitre détaillera la conversion de l'énergie solaire en électricité par effet photovoltaïque.

#### 2. L'énergie solaire

Le soleil est une immense source d'énergie inépuisable, et présente depuis l'éternité. Il émet une quantité d'énergie estimée de  $3.8 * 10^{26}$  J/s dont environ  $1,8 * 10^{17}$  J/s est reçue par la terre [1]. En fait, l'énergie solaire dépasse toutes les autres sources énergétiques renouvelables et fossiles combinées [2]. L'énergie solaire est partout, et elle est répartie dans le monde avec des quantités différentes. La figure 1 présente l'énergie solaire reçue par le sol dans le monde en  $KWh/m^2/an$  [3].

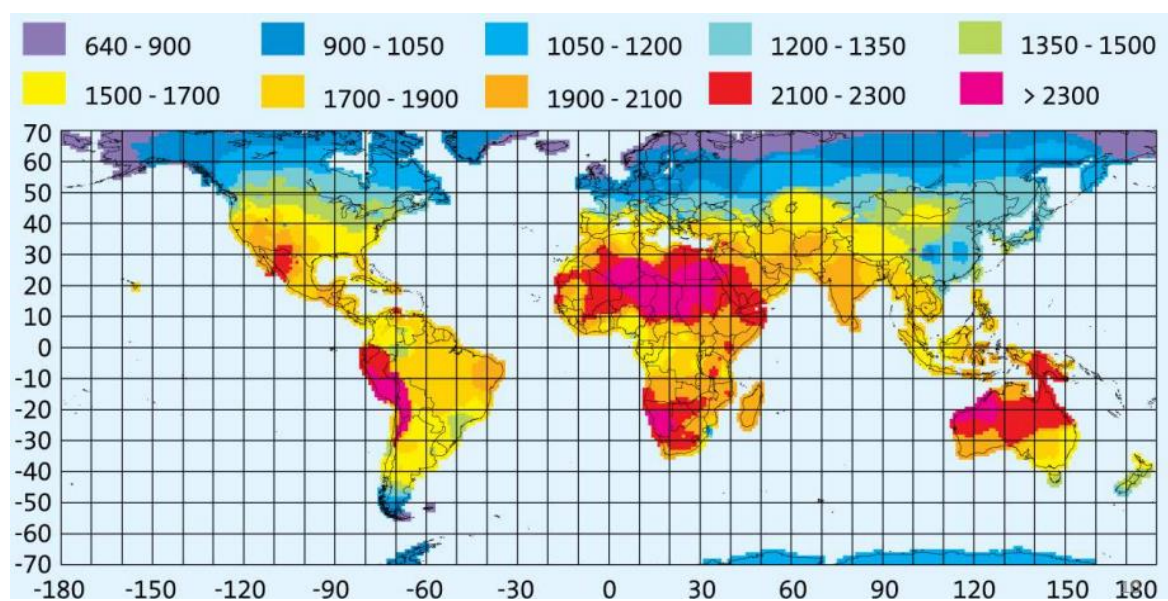


Figure 1 : L'énergie solaire reçue par le sol dans le monde en  $KWh/m^2/an$



Comme la figure 1 le montre, l'énergie solaire a un grand potentiel dans le continent africain. Cette région dispose d'une réserve de plus de 40% de la puissance solaire mondiale. Selon des études, l'exploitation de ces réserves permet à l'Afrique de produire 60 millions de TWh par an. Cependant l'utilisation de l'énergie solaire dans tels pays reste faible par rapport aux autres. Actuellement, on est en face à un paradoxe, là où la quantité d'énergie solaire est importante, là où on dispose le moins des infrastructures pour l'exploiter. En fait, selon le « Snapshot of Global PV Markets » de l'AIE, la capacité solaire internationale cumulée atteint environ 500 GW en 2019. La chine accumule un pourcentage de 35.2% de la puissance solaire mondiale installée. Ce développement remarquable dans la chine est dû à la contribution du gouvernement dans les projets solaires. Selon les rapports de l'administration National d'Energie (NEA), 3921 projets dans 22 provinces et villes ont obtenu l'approbation de ces subventions. Les États-Unis concentrent 12.4% avec une puissance cumulée de valeur 62 GW. Cette puissance provient de l'installation des centrales solaires et des petites installations résidentielles et commerciales. Près de deux millions d'installations solaires ont eu lieu en 2019. Le japon est classé le troisième avec une capacité cumulé de 56 GW ce qui présente un pourcentage de 11.2% de la capacité mondiale. Ceci se manifeste dans l'exploitation des terrains de golf abandonnés et la création des îles solaires flottantes. L'Allemagne tombe en quatrième place avec une valeur de puissance totale installée de 45 GW.

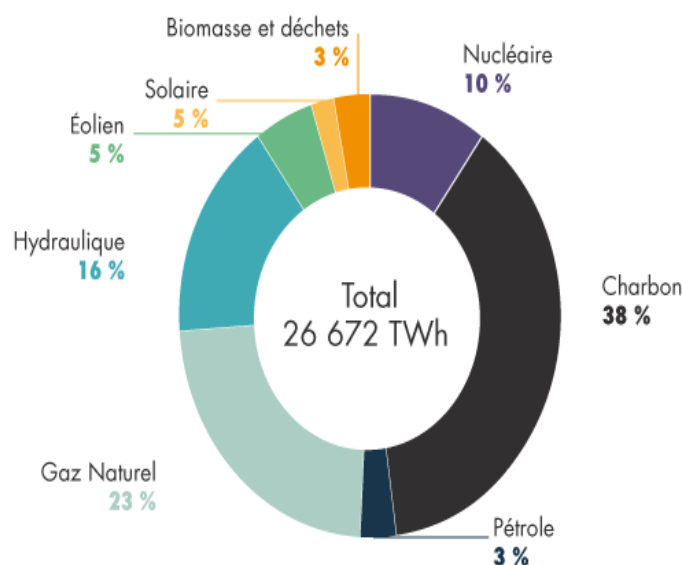


Figure 2 : Les sources de production mondiale d'électricité

En générale, la participation de l'énergie solaire à la production mondiale en 2019, ne présente que 5% d'après l'agence internationale de l'énergie. La figure 2 présente les sources de la production mondiale d'électricité et le pourcentage d'énergie produite par ces sources.

Cependant, le secteur de l'énergie solaire est en pleine croissance, et ce, partout dans le monde. Ceci se manifeste dans l'apparition d'importantes centrales solaires dans différents pays. En effet, l'Amérique latine a construit le complexe solaire « Cerro Dominador » d'une capacité de 210 MW qui combine les technologies à concentration solaire et le photovoltaïque. Le Sénégal a construit « Senergy 2 », une centrale solaire de 20 MW dont l'objectif est d'alimenter en électricité plus de 160 000 personnes. L'Afrique du sud a bâti « Kathu », une centrale solaire à concentration de 100MW qui permet de conserver l'énergie pour s'en servir la nuit. Le Maroc de son tour a mis en place le complexe « Noor ». Etendu sur 150 hectares près d'Ouarzazate, ce complexe est formé par 4 centrales solaires de capacité totale de 580 MW. Les deux premières centrales utilisent les miroirs cylindro paraboliques qui collectent et concentrent le rayonnement solaire sur un tube récepteur placé le long de sa ligne focale pour réchauffer un fluide caloporteur. La chaleur du fluide réchauffe la vapeur d'un générateur à turbine standard. La troisième est une centrale solaire à tour construite de manière à canaliser l'air chauffé par le soleil afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité. La quatrième centrale est du type photovoltaïque. Elle convertit le rayonnement solaire en électricité par des panneaux solaires. Après le succès de « Noor » Ouarzazate, le Maroc a poursuivi ces projets qui visent à produire 52% de son électricité d'ici 2030. En effet, « Noor » a vu le jour une deuxième fois à Midelt. La première phase de « Noor » Midelt porte sur le déploiement d'une puissance totale de 800 MW via la construction d'une centrale thermo-solaire de 300 MW et d'une centrale photovoltaïque de 500 MW.

Le Plan solaire au monde porte sur le développement de tels projets pour améliorer la capacité solaire installée. Trois types d'installations ont été considérés. Le thermique où on transforme le rayonnement solaire en chaleur. Le photovoltaïque où on transforme le rayonnement solaire directement en électricité. La thermodynamique qui permet d'obtenir des températures élevées par concentration du rayonnement solaire afin de réchauffer un fluide caloporteur. Ce dernier transporte la chaleur vers un réservoir

d'eau et produit de la vapeur qui entraînera un turboalternateur pour produire de l'électricité.

### 3. Le photovoltaïque

#### *3.1. Historique*

L'histoire du photovoltaïque est marquée par différents chercheurs qui ont découvert et étudié le phénomène photovoltaïque [3].

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Becquerel en 1839. Lors d'une expérimentation où il a utilisé deux électrodes en platine argentées, plongées dans une solution d'électrolyte et exposé au soleil, il a noté que la tension de la cellule augmentait. C'est l'effet photovoltaïque dans une cellule électrochimique.

En 1873, l'ingénieur électricien Willoughby Smith a découvert la photoconductivité de l'élément sélénium. Lors du développement d'une méthode pour tester un câble sous-marin où il a choisi le sélénium comme semi-conducteur pour son circuit. Smith a aperçu que la conductivité des bâtonnets de sélénium augmentait considérablement lorsqu'ils étaient exposés au soleil. Cet effet a été étudié par la suite en 1876, par William G. Adams et Richard E. Day. Lors des expériences effectuées au laboratoire sur le sélénium, ils ont allumé une bougie près des barres de sélénium, l'aiguille de leur appareil de mesure a réagi immédiatement. De là, ils ont prouvé qu'on peut récupérer de l'énergie électrique directement de l'énergie solaire.

En 1883, l'inventeur américain Charles Edgar Fritts a construit le premier module solaire en se basant sur le cuivre de sélénium et une couche mince semi-transparente de l'or. Les propriétés du sélénium ne permettent au module résultant qu'une efficacité de conversion électrique de 1%. Ce module solaire n'était pas commercialement réalisable grâce au coût élevé de l'or.

En 1905, Albert Einstein a publié un article concernant l'énergie provenant du soleil. Il a déclaré que la lumière contient des paquets d'énergies qu'il a appelés quanta de lumière. La description d'Einstein et la découverte de l'électron ont permis la compréhension de l'effet photovoltaïque. Les photons peuvent porter des électrons de leurs orbites atomiques. Ceci permet de générer de l'électricité si une connexion externe est établie.

En 1954, les chercheurs Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin et Calvin S. Fuller mettent au point une cellule photovoltaïque à base de silicium modifié avec une efficacité de conversion électrique de 6%. Ces cellules solaires ont été réalisées selon le principe du transistor. Ils se sont formés par une jonction de cristal de silicium. En 1956, les modules photovoltaïques sont mis à la disposition du consommateur avec un prix au-delà des moyens de quiconque. En 1970, le fondateur de Solar Power Corporation Dr Elliot Berman a conçu un module solaire avec une qualité de silicium moins pure en se basant sur des techniques similaires à la production de films photographiques. Cette démarche a permis de réduire le coût des modules photovoltaïques.

Le développement des cellules photovoltaïques a continué. Aujourd'hui, les panneaux photovoltaïques ont une efficacité de conversion électrique allant jusqu'à 21%. Ainsi, leurs prix ont connu une importante chute, ce qui rend l'énergie photovoltaïque à la disposition de tout le monde.

### *3.2. Type des installations PV*

Aujourd'hui l'énergie photovoltaïque est utilisée dans des applications extrêmement variées. De façon générale, l'exploitation de l'énergie photovoltaïque se divise en deux sections. Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau et les systèmes photovoltaïques isolés [4].

Les installations photovoltaïques connectées au réseau sont des systèmes qui permettent d'injecter l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire dans le réseau public. Ce sont des installations reliées en parallèle avec le réseau électrique. Elles se présentent sous deux architectures. Les systèmes photovoltaïques avec injection totale, où la totalité de la puissance produite est injectée dans le réseau public de distribution, et Les systèmes photovoltaïques avec autoconsommation, où l'énergie produite est consommée sur le site de production. Ce deuxième type d'installation permet d'assurer la puissance nécessaire au fonctionnement d'une charge connectée, et injecte toute l'énergie qui dépasse l'utilisation régulière au réseau électrique public, si la puissance de sortie du système photovoltaïque est supérieure à la puissance requise par la charge connectée. Si l'énergie délivrée par le système photovoltaïque est inférieure à la quantité d'énergie demandée par la charge, l'énergie photovoltaïque sera

intégralement autoconsommée et le réseau fournira le complément nécessaire. Ces systèmes se composent des panneaux solaires, d'un onduleur, d'une unité de conditionnement d'énergie et d'un équipement de connexion au réseau. L'onduleur joue un rôle primordial dans ce type d'installation qui se manifeste dans l'adaptation de l'énergie produite aux standards du réseau, et l'interruption de la connexion si un cas de défaillance du réseau est détecté.

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont des systèmes dimensionnés pour alimenter une charge continue, ou alternative, indépendamment du réseau électrique. Ils sont utilisés dans des zones éloignées, qui n'ont pas accès au réseau électrique, ou dans le cas où la connexion au réseau électrique publique n'est pas pratique.

Généralement on distingue deux types d'installations photovoltaïques autonomes :

- Les systèmes hybrides, où plus que le générateur photovoltaïque, une combinaison de certain nombre de générateurs d'électricité peuvent être utilisés pour atteindre la puissance demandée.

- Et les systèmes autonomes où le générateur photovoltaïque est la seule source d'énergie. Ces derniers se trouvent sous différentes topologies. Ceci dépend du type de charge à alimenter et des optimisations envisagées par le concepteur.

Globalement on distingue deux topologies de systèmes autonomes:

- Système photovoltaïque autonome avec une charge continue.
- Système photovoltaïque autonome avec une charge alternative.

Le système photovoltaïque autonome avec une charge continue accepte trois configurations possibles. La première est le système à couplage direct qui consiste à connecter la sortie continue du générateur photovoltaïque directement à une charge DC. C'est la configuration des systèmes photovoltaïques autonomes la plus simple. Ce type d'installation ne fonctionne qu'aux moments de présence des rayonnements solaires. Ainsi, le taux de production d'électricité varie selon l'intensité et l'angle d'incidence de la lumière solaire.

La deuxième configuration consiste à intégrer un circuit de traitement d'énergie électronique. Le système photovoltaïque autonome est donc constitué du générateur photovoltaïque, la charge continue et le circuit de commande électronique. Ce circuit permet l'optimisation du système par l'adaptation de la charge à la source

photovoltaïque, et la poursuite de la puissance maximale du générateur. Le pilotage du circuit pour atteindre le point de puissance maximale permet une utilisation favorable du générateur photovoltaïque.

Les systèmes photovoltaïques autonomes précédemment présentés ne permettent l'alimentation de la charge, que dans le cas de présence du rayonnement solaire. D'où vient la troisième configuration, qui consiste à l'ajout des batteries pour rendre ces systèmes capables de fonctionner en permanence. Ce type d'installation se constitue d'une charge continue, des circuits de traitement d'énergie électroniques et des batteries. Le principe de fonctionnement de ce type d'installation est de stocker de l'énergie dans des batteries, quand les conditions de fonctionnement sont satisfaisantes. Dans le cas contraire, l'énergie stockée est restituée à la charge. Le circuit de commande dans une telle installation limite et contrôle le courant de charge de la batterie, de plus qu'il protège la batterie contre les surcharges et les décharges excessives.



Figure 3: Système photovoltaïque autonome avec une charge continue

En ce qui concerne le système photovoltaïque autonome avec une charge alternative, l'ajout d'un étage de conversion continu alternatif est indispensable. Vu que le générateur photovoltaïque produit une tension (i.e. courant) continue, l'adaptation de cette sortie à la charge nécessite un onduleur. C'est un dispositif qui transforme la tension continue appliquée à son entrée en tension alternative, tout en contrôlant l'amplitude et la fréquence. La configuration de ce type de système consiste à connecter la charge alternative au générateur photovoltaïque via l'onduleur. D'autres éléments peuvent être introduits à la chaîne, à savoir circuit de traitement d'énergie électronique contrôlé par un programme de poursuite de puissance maximale du générateur

photovoltaïque ou des batteries. Le convertisseur peut être intégré entre le générateur et l'onduleur. Il assure le fonctionnement du générateur dans la puissance maximale. Tandis que les batteries doivent être placées à la sortie du convertisseur DC-DC. Elles permettent de cumuler l'énergie pendant le jour et de la restituer en absence du rayonnement.

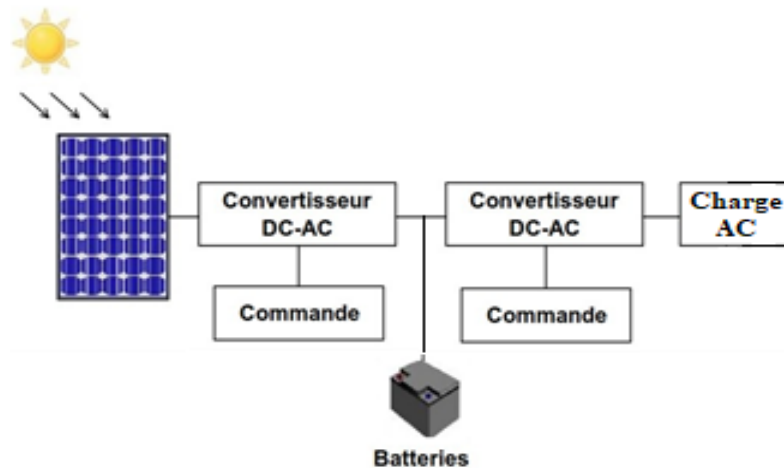


Figure 4 : Système photovoltaïque autonome avec une charge alternative

L'utilisation des systèmes photovoltaïques autonomes sans batteries est limitée aux applications où le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique tel que le pompage d'eau, ou dans le cas où le système est dimensionné pour générer la puissance nécessaire sous un faible éclairage.

Différents étages de traitement de puissance peuvent être intégré dans un système de production PV. La suite de ce chapitre présente les types, le fonctionnement et la composition de chaque élément cité afin de bien comprendre leur utilité et de bien choisir un système photovoltaïque optimal.

#### 4. Le générateur photovoltaïque

Le générateur PV est l'élément qui fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du système photovoltaïque. Il est responsable de convertir le rayonnement solaire en électricité pour alimenter des charges électriques connectées à la sortie du système.

##### 4.1. Composition

Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules. Le branchement des modules dépend de la valeur d'énergie nécessaire à récupérer à sa sortie. L'association

des modules en série augmente la valeur de la tension alors que l'association des modules en parallèle augmente la valeur du courant.

Un module est construit à partir de plusieurs matériaux liés ensemble. Une variété de technologies de la construction des modules photovoltaïques ont été adoptées. La structure des modules cristallins les plus couramment utilisés est relativement similaire à la figure 5 [5]. Elle est constituée des cellules solaires photovoltaïques qui permettent de transformer le rayonnement solaire en électricité. Pour les protéger, ces cellules photovoltaïques sont encapsulées par des films EVA transparents. C'est une résine adhésive et diélectrique qui présente d'importantes propriétés thermiques, très faible taux d'absorption d'eau et très bonne transmission optique. Le côté face au soleil est couvert par du verre trempé, en maintenant une grande transparence, afin de prolonger la durée de la vie des modules photovoltaïques. Pour protéger la face arrière de l'humidité, une feuille fabriquée par un matériau plastique est placée au dos du module. La boîte de jonction a pour fonction d'amener les connexions électriques du module PV à l'extérieur. Elle contient des diodes de protection pour les ombres et des câbles pour la connexion des panneaux sur le terrain.

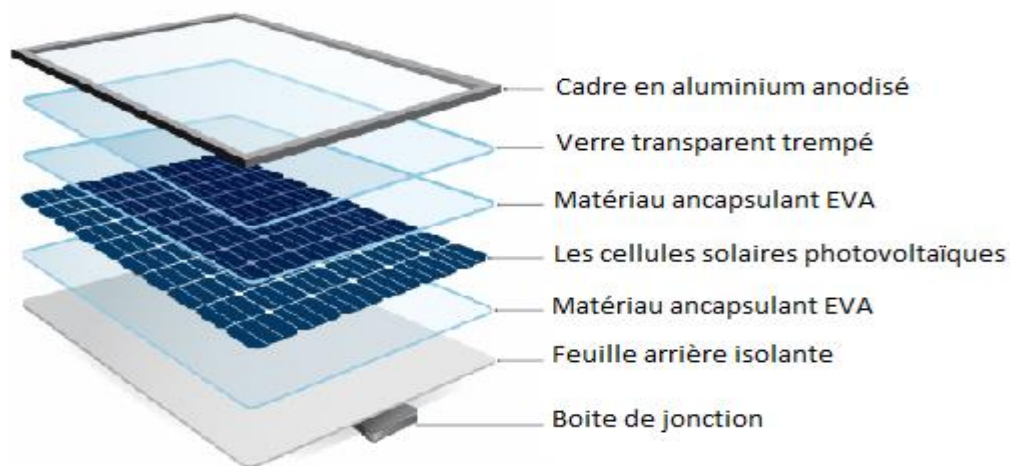


Figure 5 : Construction des modules photovoltaïque

#### 4.2. Fonctionnement

Vu que chaque module se compose de plusieurs cellules photovoltaïques interconnectées en série et/ou en parallèle, et afin de comprendre le fonctionnement du



générateur photovoltaïque, il est indispensable d'analyser la constitution et le fonctionnement des cellules solaires PV.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées par des semi-conducteurs de différent type. Chaque type se caractérise par un nombre de transporteurs libres. La différence de densité d'électrons libres indique la conductivité du matériel. La plupart des cellules PV sont basées sur des plaquettes de silicium. Elles sont composées de deux couches. La couche exposée à la lumière est dopée de type n. La couche inférieure est dopée de type p. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle. C'est un solide cristallin, dont les propriétés de conduction électrique sont déterminées par deux bandes d'énergie particulières, séparées par une bande interdite, ce qui ne donne aucune liberté de mouvement aux électrons. Exposés au rayonnement solaire, qui est un ensemble de photons avec des valeurs énergétiques distinctes, les photons causent une agitation des électrons. Un photon dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande interdite semi-conductrice libère des porteurs de charge dans les deux côtés de la jonction. L'application d'un champ électrique provoque le déplacement des électrons et des trous vers les jonctions P et N. Les contacts métalliques ajoutés sur les deux côtés collectent les électrons et les trous, ainsi le courant peut circuler [6].

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est donné par la figure 6.

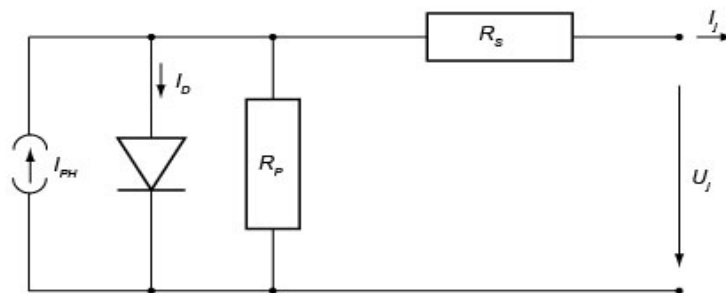


Figure 6 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Comme le montre la figure 6, le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est constitué d'une source de courant qui représente le courant généré par le photon, une diode représentant la jonction PN, une résistance parallèle  $R_p$  dite de « shunt » qui présente les pertes à travers la jonction PN de la cellule, et une résistance série  $R_s$  qui

modélise les pertes internes dues au flux de courant. La résistance  $R_s$  dépend de la profondeur de jonction p-n, des impuretés et de la résistance des contacts.

### 4.3. Caractéristiques

Chaque générateur photovoltaïque présente différentes caractéristiques par rapport à l'autre, à savoir la puissance crête, la caractéristique  $P=f(V)$ , la caractéristique  $I=f(V)$ , le courant de court-circuit, tension à vide, le rendement et le point de fonctionnement optimum.

La puissance crête est la valeur de la puissance maximale que peut fournir le module PV à une température de  $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000\text{ W/m}^2$ . La caractéristique  $P=f(V)$  est la courbe qui représente la puissance débitée par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci. La caractéristique  $I=f(V)$  est la courbe du courant débité par le module en fonction de la tension à ces bornes. Le courant de court-circuit est le courant débité par un module lorsqu'il est en court-circuit. La tension à vide est la tension aux bornes du module, lorsqu'il est en circuit ouvert. Dans les deux points  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  la valeur de la puissance du générateur est nulle. Le rendement présente le rapport entre la puissance électrique optimale et la puissance du rayonnement solaire reçue par le module pour une valeur d'irradiation et de la température. Et le point de fonctionnement optimum qui se caractérise par les valeurs du courant et de la tension où le module délivre sa puissance maximale.

Les courbes (courant/tension), et (puissance/tension) du générateur photovoltaïque sont variables en raison de la variation du rayonnement solaire à travers le jour, et les variations saisonnières. Deux paramètres cruciaux qui affectent le fonctionnement de la cellule : l'intensité d'irradiation solaire ( $G$ ) et la température ( $T$ ).

L'effet de la température ambiante sur les performances du générateur photovoltaïque se manifeste dans une proportionnalité indirecte. L'augmentation de la température entraîne une diminution remarquable de la tension générée par le module PV, ce qui réduit la puissance.

En effet, La conversion d'énergie solaire par un générateur PV n'est pas favorable pour une température ambiante très élevée. Alors qu'elle est optimale pour des valeurs

de température ambiante basse. Donc l'efficacité du générateur photovoltaïque diminue quand il est exposé à une température élevée.

La figure 7 ci-dessous présente l'influence de la variation de la température sur les caractéristiques puissance-tension du générateur PV.

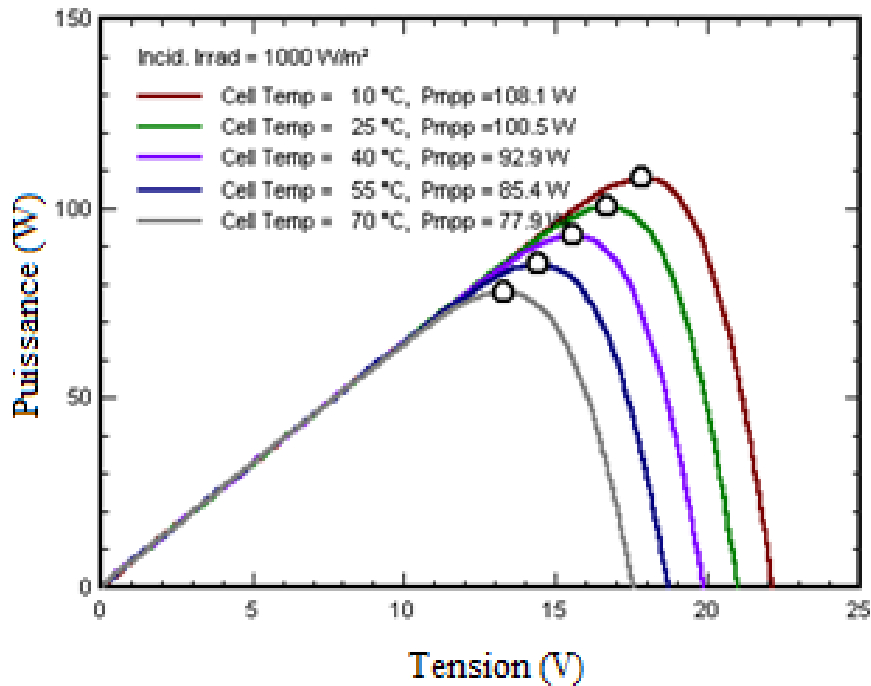


Figure 7 : Influence de la variation de la température sur les caractéristiques puissance-tension du générateur PV

L'effet de l'irradiation sur les performances du générateur photovoltaïque se manifeste dans une proportionnalité directe. La diminution de la valeur de l'irradiation entraîne une réduction importante du courant généré par le module PV, ce qui réduit la puissance. En effet, La conversion d'énergie solaire par un générateur PV n'est pas favorable pour une irradiation très faible. Alors qu'elle est optimale pour des valeurs de l'ordre de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Donc l'efficacité du générateur photovoltaïque diminue avec la diminution de la valeur de l'irradiation.

La figure 8 ci-dessous présente l'influence de la variation de l'irradiation sur les caractéristiques puissance-tension du générateur PV.

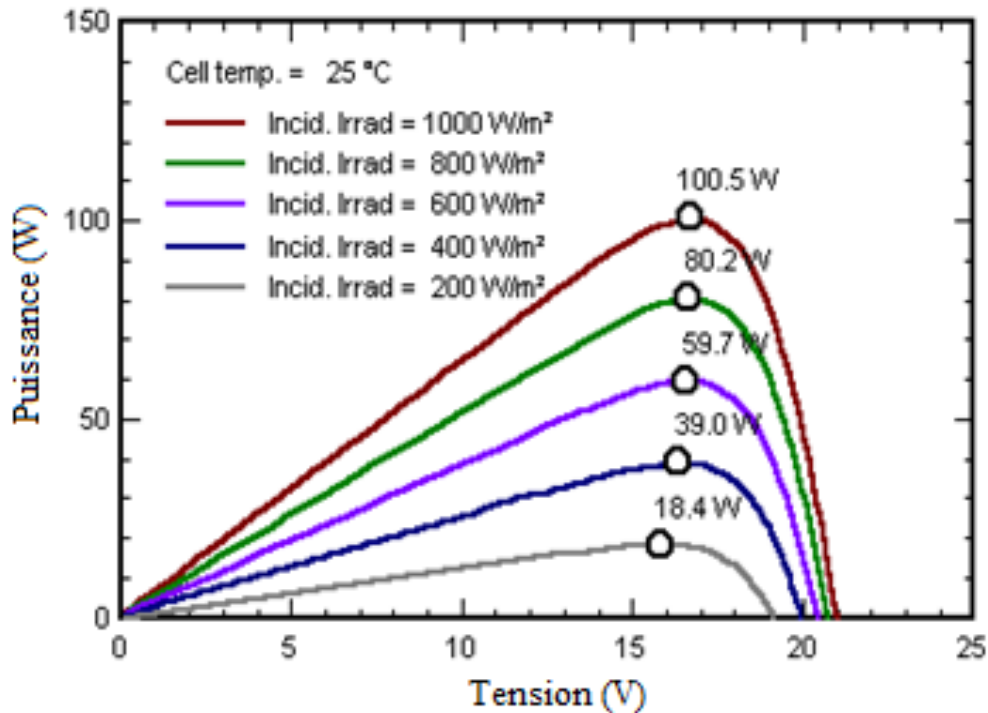


Figure 8 : Influence de la variation de l'irradiation sur les caractéristiques puissance-tension du générateur PV

#### 4.4. Type du panneau solaire

Selon les processus disponibles du fabricant et le type du matériau utilisé pour concevoir les cellules solaires, trois principales générations du module solaire PV ont été inventées [7] [8].

Les modules de premières générations sont fabriqués par des cellules solaires de silicium cristallin comme semi-conducteur, ils sont basés sur une seule jonction. On distingue deux types de ces modules dans le marché. Les modules à base des cellules solaires monocristallines et les modules à base des cellules solaires poly-cristallines. Le type monocristallin se caractérise par une couleur bleue uniforme. Il est fabriqué à partir d'un seul cristal de grande dimension découpé en fines tranches. Ce sont des modules de bonne efficacité car ils exploitent l'irradiation solaire d'environ 20 à 22%. Les modules à base des cellules solaires poly-cristallines se caractérisent par une couleur bleue contenant des motifs. Ce type de cellules solaires est fabriqué à partir de plusieurs cristaux combinés les uns avec les autres. Ils ont une efficacité de 15 à 16%, ils sont moins chers par rapport aux modules monocristallins.

Les modules de deuxième génération sont basés sur la technologie des couches minces. On en distingue trois familles. A savoir, les modules amorphes, les modules Cd-Te et les modules CIS/CIGS. Les modules à base des cellules en silicium amorphes sont fabriqués par des cellules solaires de silicium non cristallines. C'est la première technologie développée afin de déposer une couche mince de silicium sur un support de verre, plastique ou métal. Ils se caractérisent par un faible coût de production et un fonctionnement optimal à faible luminosité. Leur rendement est de l'ordre de 9 à 10%. Les modules à base des cellules en tellure de cadmium (Cd-Te) se constituent d'une couche semi-conductrice dopée P de tellure de cadmium et une couche dopée N de sulfure de cadmium (Cds). Ces modules se caractérisent par un faible coût de production. Leur rendement est de l'ordre de 9%. Les modules à base des cellules CIS/CIGS constitués par un assemblage en couche très fine de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ils se caractérisent par un processus de fabrication complexe et un rendement 11 à 13%.

Les modules de troisième génération sont basés sur des matériaux nano-structurés. Cette génération vise à concevoir des modules qui se caractérisent par un faible coût et un rendement plus important que celui des cellules de première et de deuxième génération. Plusieurs technologies ont été adoptées pour arriver à cette perspective. Comme résultat différent type des cellules ont été proposé. A savoir, les modules à base des cellules DSC électrochimiques, les modules à base des cellules organiques et les modules à base des cellules hybrides.

## 5. Le convertisseur continu-continu

Dans tels systèmes, des convertisseurs continu-continu de type hacheur peuvent être introduits. Ce sont des convertisseurs statiques qui permettent de modifier la valeur de la tension et du courant d'entrée à des valeurs désirées. Ils permettent d'ajuster la valeur de ces grandeurs selon le besoin du système sans changer leur type. Dans la littérature trois types de convertisseurs DC-DC ont été étudiés, à savoir le convertisseur abaisseur, le convertisseur élévateur et le convertisseur abaisseur-élévateur.

### *5.1. Le convertisseur élévateur*

Le convertisseur élévateur permet d'avoir une tension de sortie fixe, supérieure à la tension appliquée à son entrée. Ce convertisseur est composé d'une bobine, d'un

condensateur, d'une diode et d'un commutateur commandé. Le circuit est donné par la figure 9 [9].

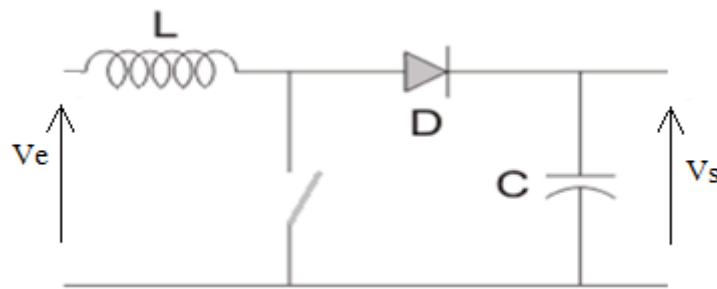


Figure 9 : Hacheur élévateur

La commutation de l'interrupteur commandé du convertisseur élévateur permet d'avoir deux phases de fonctionnement. La phase d'accumulation d'énergie où le courant passe par l'interrupteur commandé et l'inductance se charge par l'énergie. La diode bloque le courant et le condensateur alimente la charge.

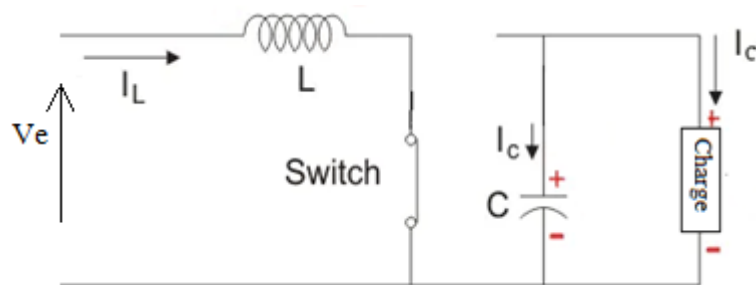


Figure 10: La phase d'accumulation d'énergie

La phase de roue libre où l'interrupteur commandé est ouvert et le courant passe par la diode. L'énergie accumulée précédemment dans l'inductance est ajoutée à l'énergie du générateur et sont transmises au condensateur et à la charge.

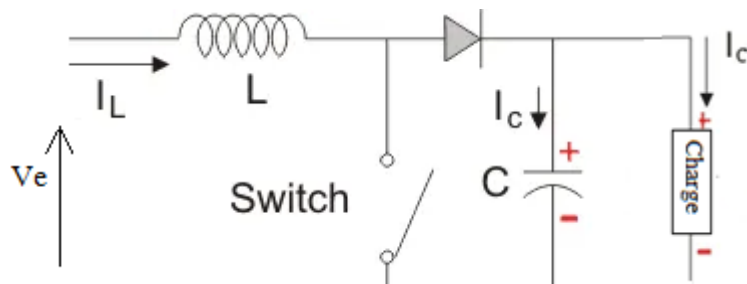


Figure 11: La phase de roue libre

La tension de sortie du hacheur élévateur est liée à la tension d'entrée par la relation ci-dessous.

$$V_s = V_e / (1-D) \quad (1)$$

Où D est le rapport cyclique.

### 5.2. Le convertisseur abaisseur

Le convertisseur abaisseur est un circuit de conversion de puissance qui produit une tension de sortie continue inférieure à la tension d'entrée continue. La configuration de base du convertisseur abaisseur est donnée par la figure 12 [10]:

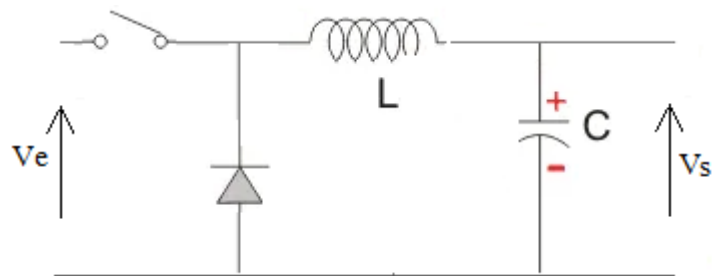


Figure 12 : Hacheur abaisseur

De même que le convertisseur élévateur, le convertisseur abaisseur se compose d'un interrupteur commandé, d'une bobine, d'une diode et d'un condensateur. Le transistor de commutation se met en marche et s'arrête continuellement à haute fréquence.

Pour maintenir une sortie continue, le circuit utilise l'énergie stockée dans l'inductance L pendant les périodes de marche du transistor de commutation. Ceci permet de continuer à alimenter la charge pendant les périodes de coupure. Quand le transistor est passant, le courant circule à travers la charge via la bobine. La bobine emmagasine de l'énergie sous forme du champ magnétique. Lorsque le transistor est bloqué, la diode assure la décharge de l'inductance dans la charge [11].

La tension de sortie du hacheur abaisseur est liée à la tension d'entrée par la relation ci-dessous.

$$V_s = D * V_e \quad (2)$$

$V_e$  : Tension d'entrée

$V_s$  : Tension de sortie

$D$  : Le rapport cyclique

### 5.3. Le convertisseur abaisseur-élevateur

Le convertisseur abaisseur-élevateur peut remplir la fonction du convertisseur élévateur et la fonction du convertisseur abaisseur. Dépend du rapport cyclique, il peut générer une tension supérieure à la tension appliquée à son entrée de même qu'il peut fournir une tension inférieure à la tension d'entrée. La configuration de base du convertisseur abaisseur-élevateur est donnée par la figure 13 [12] [13]:

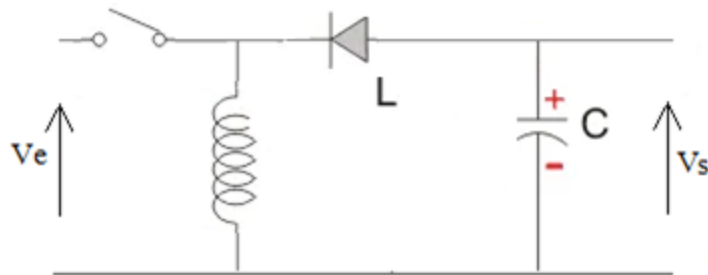


Figure 13 : Hacheur abaisseur-élevateur

Le convertisseur abaisseur-élevateur se compose d'un interrupteur commandé, d'une bobine, d'une diode et d'un condensateur. Il présente deux modes de fonctionnement :

Le premier mode est celui où l'interrupteur commandé est passant et la diode est bloquée, dans ce cas le courant passe par la bobine qui emmagasine de l'énergie.

Le deuxième mode est celui où l'interrupteur commandé est bloqué et la diode est passante, dans ce cas l'énergie emmagasinée dans la bobine est transférée à la charge.

La relation entre la tension d'entrée et de la sortie du hacheur dévolteur-survolteur est donnée par l'équation ci-dessous.

$$V_s / V_e = -D / (1-D) \quad (3)$$

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

Si  $D < 0.5$  la tension de sortie est inférieure à celle d'entrée.

Si  $D > 0.5$  la tension de sortie est supérieure à celle d'entrée.



Si  $D=0.5$  la tension d'entrée est égale à la tension de sortie.

## 6. Recherche du point de puissance maximale

Comme déjà mentionné dans la première partie de ce chapitre, les caractéristiques courant-tension du générateur photovoltaïque sont variables en fonction des conditions météorologiques, telles que l'irradiation solaire et la température. Ainsi, la puissance maximale fournie par le générateur PV n'est pas toujours stable. Mettre en œuvre une commande qui contrôle le module ou le panneau photovoltaïque pour générer une puissance optimale stable pour différentes conditions environnementales est indispensable en raison du changement rapide et imprévisible de la puissance. Le contrôleur de suivi du point de puissance maximale est un élément fondamental pour les applications du photovoltaïque qui assure le fonctionnement du générateur PV au point de puissance maximale. Cette commande s'applique généralement sur le convertisseur d'électronique de puissance, qui reçoit l'alimentation directement du générateur PV. Jusqu'à présent, différentes techniques de contrôle du point de puissance maximale ont été élaborées dans la littérature. On distingue la méthode de perturbation et d'observation, la méthode de conductance incrémentale et la méthode Hill Climbing.

### *6.1. La technique perturbation et d'observation*

Simple, facile à mettre en œuvre et doté d'un équilibre entre performances et simplicité. La technique perturbation et observation est le type de la MPPT le plus fréquemment utilisé dans les applications photovoltaïques. C'est une technique qui ne nécessite que deux paramètres d'entrée à savoir le courant et la tension PV, sans aucune connaissance des caractéristiques du générateur PV ou des conditions météorologiques. Cette commande contrôle un convertisseur d'électronique de puissance alimenté directement via le générateur PV.

Le paramètre de sortie de la MPPT est un rapport cyclique de valeur variable selon le point de fonctionnement. La figure 14 illustre l'organigramme de la MPPT perturbation et observation [13].

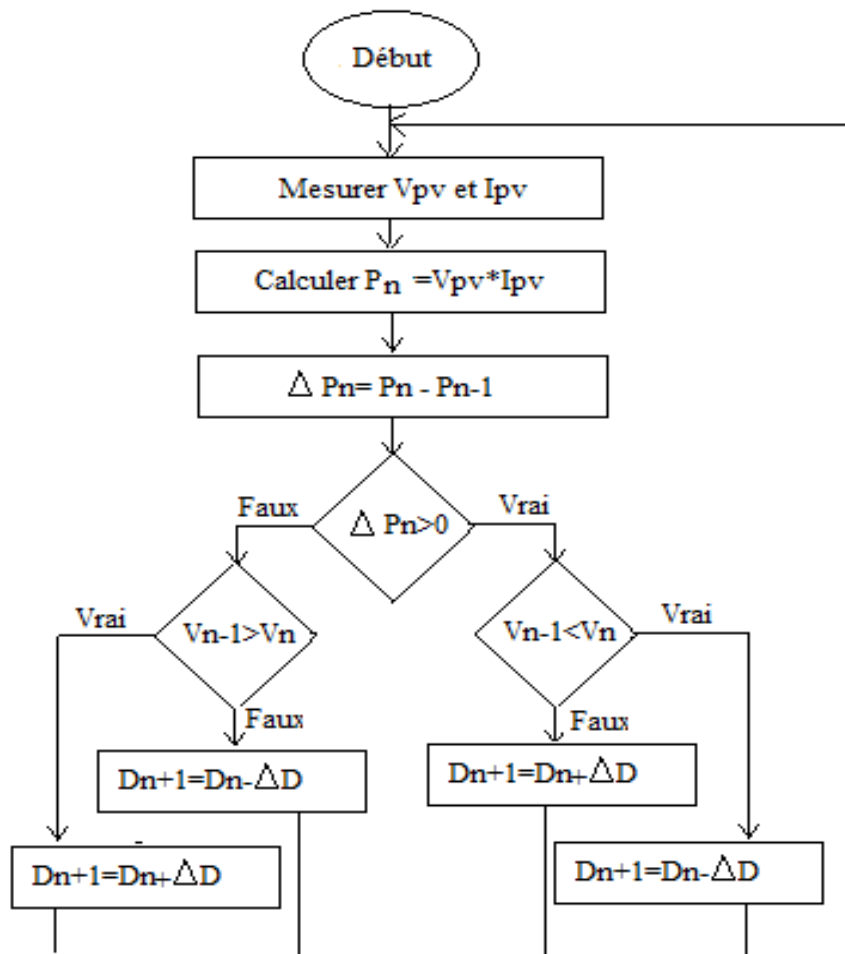


Figure 14 : Principe de la MPPT perturbation et observation

Comme son nom l'indique, cette méthode se base sur la perturbation périodique du point de fonctionnement du système et l'observation de son comportement. Plus précisément, le principe de fonctionnement de la MPPT perturbation et observation se base sur cinq étapes. Préciser des valeurs de référence de la tension et de la puissance de sortie du générateur PV. Perturber (incrémenter ou décrémenter) la tension ou le courant aux bornes du générateur PV. Mesurer les nouvelles valeurs de la tension et de la puissance. Les comparer avec les valeurs déjà stockées. Si la perturbation de la tension entraîne une augmentation de la puissance ( $P \text{ actuelle} > P \text{ précédente}$ ), la perturbation doit être maintenue dans le même sens; sinon la perturbation doit être dans la direction opposée. Le cycle de perturbation est répété jusqu'à atteindre la puissance maximale. La perturbation peut être réalisée par deux manières. L'utilisation d'une tension de référence comme paramètre de perturbation, ce qui nécessite un contrôleur PI pour ajuster le rapport cyclique. Ou bien perturber le rapport cyclique directement et la puissance doit être mesurée à chaque cycle PWM.

## 6.2. La technique conductance incrémentale

L'idée de base de cette technique est que la pente de la courbe du caractéristique puissance-tension du générateur PV est nulle à la puissance maximale. La courbe du caractéristiques P/V permet de saisir que la puissance de sortie du générateur photovoltaïque est proportionnelle à la tension à ses bornes, lorsqu'elle est située dans la zone des courants constants (à gauche du point de puissance maximale). Par conséquent, la puissance PV augmente linéairement avec l'augmentation de la tension. Lorsque la courbe dépasse le point de puissance maximale (à droite du point de puissance maximale), le comportement du générateur est similaire à une tension constante, la puissance PV diminue linéairement avec l'augmentation de la tension. La pente est la dérivée de la puissance du module PV par rapport à sa tension. Alors la dérivée est positive si la puissance augmente, la dérivée est négative si la puissance diminue, si non, si la puissance est maximale, la dérivée est nulle.

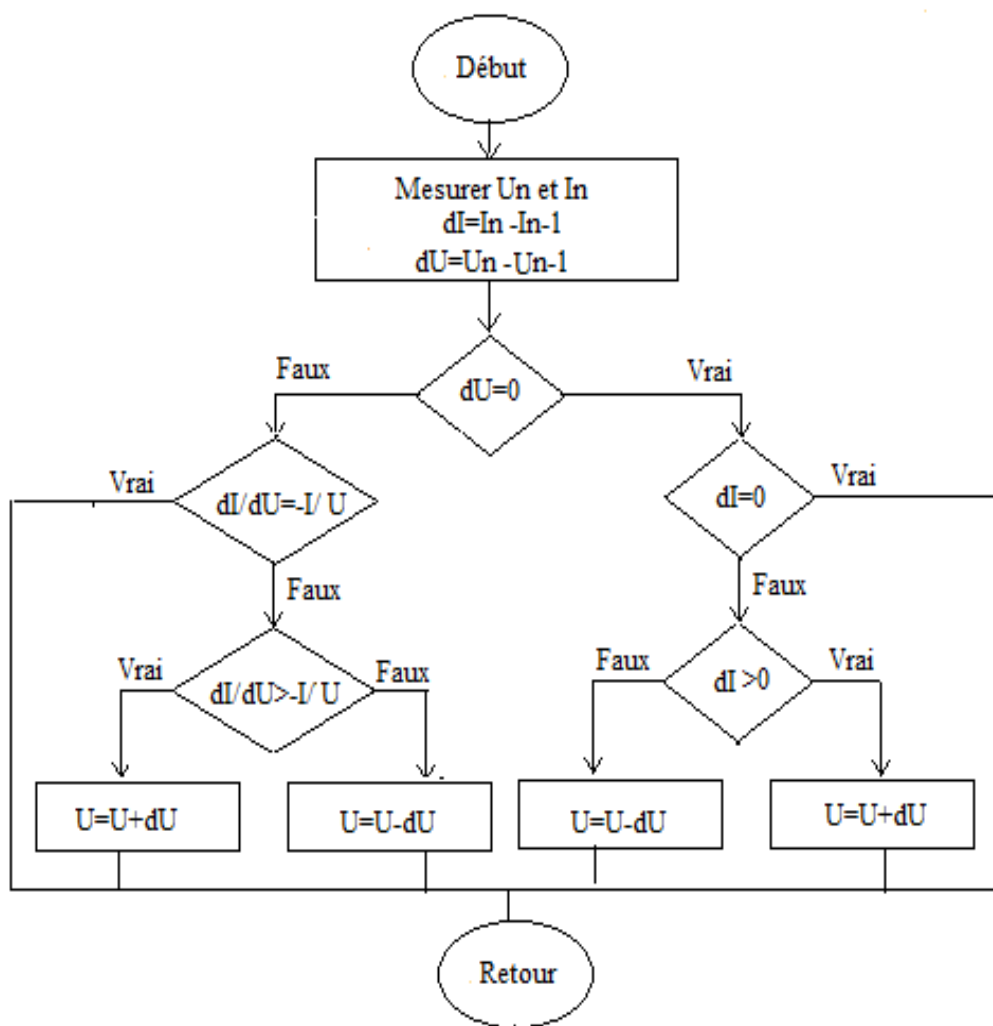


Figure 15 : L'organigramme de la MPPT conductance incrémentale

La figure 15 présente l'organigramme du principe de la MPPT conductance incrémentale [14]. Pratiquement le principe de suivi du point de puissance maximale se fait par la comparaison de la conductance instantanée  $I/V$  avec la conductance incrémentale  $\Delta I/ \Delta V$ . L'algorithme incrémente ou décrémente la référence jusqu'à ce que la conductance incrémentale soit égale à la conductance instantanée. Ainsi, le point de puissance maximale est obtenu. L'algorithme maintient le fonctionnement du générateur photovoltaïque à ce point. Cet algorithme est efficace pour le suivi de la MPP même aux conditions météorologiques extrêmement variables. Elle nécessite seulement deux paramètres (tension et courant).

### 6.3. La technique Hill Climbing

Comparer la puissance de référence avec la puissance mesurée est le concept commun entre cette technique et la MPPT perturbation et d'observation. Cependant, la différence entre les deux techniques se manifeste dans l'idée de base. La figure 16 présente l'organigramme du fonctionnement de cette technique [15].

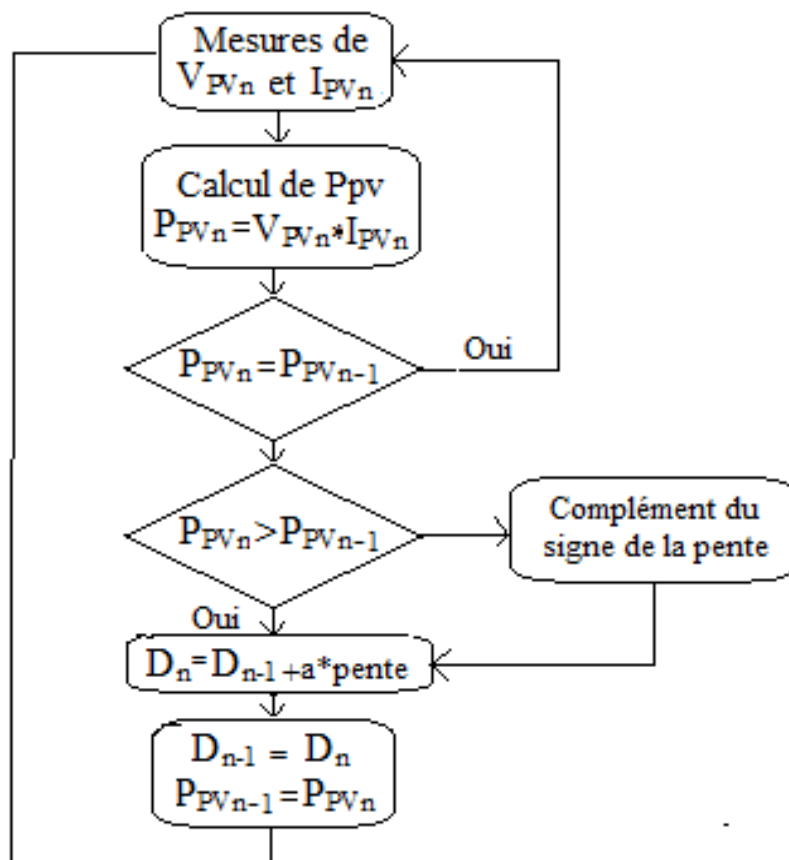


Figure 16 : algorithme de la technique Hill Climbing

. La technique perturbation et observation se base sur la relation entre la puissance en fonction de la tension pour déterminer le point de puissance maximale. Alors que la technique Hill Climbing se base sur la relation entre la puissance et le rapport cyclique. Si  $dP / dD = 0$ , le point de puissance maximale est atteint.

En pratique, le principe de suivi du point de puissance maximale se fait par la comparaison de la puissance mesurée avec la puissance de référence et agir selon le résultat de la comparaison. Si la puissance mesurée est supérieure à la puissance de référence, on ajoute une valeur positive bien déterminée (le pas « a ») au rapport cyclique, si non, si la puissance mesurée est inférieure à la puissance de référence, on ajoute une valeur négative bien déterminée au rapport cyclique, si non, aucune intervention ne doit être faite. Le signe du pas est déterminé par le « Slope » de valeur 1 ou -1.

L'utilisation de ces algorithmes permet d'augmenter l'efficacité de la production d'énergie et les avantages financiers. Le temps de retour sur investissement peut également être amélioré en utilisant ces méthodes, qui sont toujours en cours d'amélioration.

## 7. Le convertisseur continu alternatif

Le convertisseur DC-AC dit onduleur est un circuit d'électronique de puissance qui transforme la tension et le courant continus appliqués à son entrée à des grandeurs alternatifs symétriques d'amplitude et de fréquence souhaitées. La tension de sortie peut être fixe ou variable à une fréquence fixe ou variable. Les onduleurs peuvent être triphasés ou monophasés, le choix de la structure adéquat dépend de l'application et de la charge à alimenter. La sortie d'un onduleur monophasé est une tension alternative symétrique, onde carrée ou sinusoïdale. L'onduleur triphasé peut être considéré comme trois onduleurs monophasés où chaque sortie est déphasée de  $120^\circ$ . La configuration de base du convertisseur continu alternatif monophasé est donnée par la figure 17.

Comme dans la figure 17, la structure de base d'un onduleur met en œuvre au moins deux cellules de commutation bidirectionnelles en courant.

Différents circuits qui remplissent la fonction d'onduleur ont été élaborés. En fonction de leurs caractéristiques de sortie, on distingue trois classes primaires d'onduleurs.

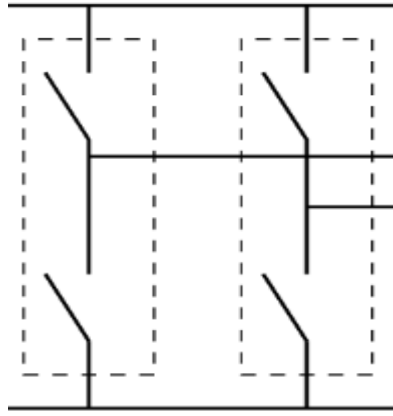


Figure 17 : Structure de base d'un onduleur monophasé

### 7.1. Onduleur à onde carrée :

Un onduleur à onde carrée est l'un des types d'onduleurs les plus simples, et le moins cher. La commutation de la tension aux bornes d'une charge, en se basant sur les interrupteurs, permet d'obtenir une sortie alternative [16] [17] [18]. La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur à onde carrée est illustrée 18.

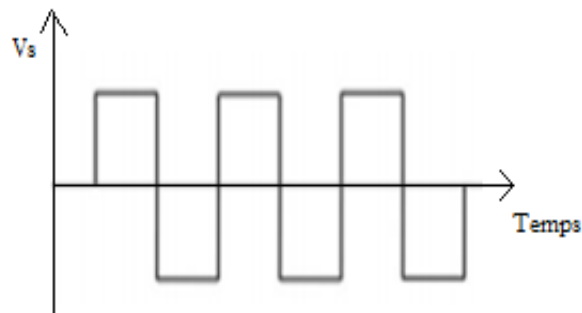


Figure 18 : Forme d'onde de sortie d'un onduleur à onde carrée

La sortie de tel onduleur n'est pas une onde sinusoïdale pure, c'est une onde carrée obtenue par commutation en haut, en bas, sans étape intermédiaire (0 V). Cette onde peut être considérer comme une onde sinusoïdale échantillonnée deux fois par cycle.

### 7.2. Onduleur à onde sinusoïdale modifiée

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée ou l'onduleur quasi sinusoïdal est un type d'onduleur un peu plus complexe par rapport à l'onduleur à onde carrée et plus simple qu'un onduleur à onde sinusoïdale pure [16] [17] [18]. La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur à onde sinusoïdale modifiée est illustrée par la figure 19 [16].

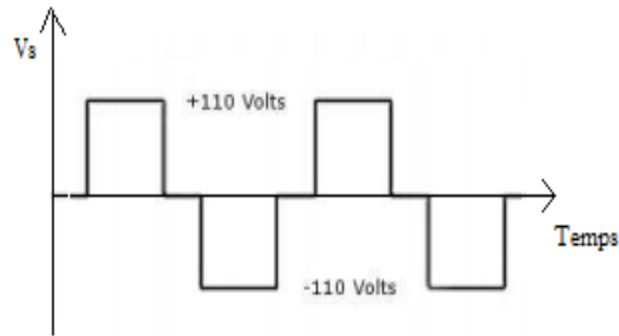


Figure 19 : Forme d'onde de sortie d'un onduleur à onde sinusoïdale modifiée

La sortie du tel type d'onduleur est une approximation plus proche d'une véritable onde sinusoïdale que d'une onde carrée. C'est une onde carrée qui montre une pause avant le décalage de phase. Il ne présente pas une transition douce du positif au négatif comme une onde sinusoïdale et ne change pas brusquement sa phase comme une onde carrée. Les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée sont conçus pour satisfaire aux exigences d'efficacité du système photovoltaïque tout en étant moins chers que les onduleurs à onde sinusoïdale pure. Ces onduleurs sont capables de faire fonctionner une grande variété de charges.

### 7.3. Onduleur à onde sinusoïdale

L'onduleur à onde sinusoïdale est un circuit électrique beaucoup plus complexe que l'onduleur à onde sinusoïdale modifiée et l'onduleur à onde carrée [16] [17] [18]. La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur à onde sinusoïdale est illustrée ci-dessous.

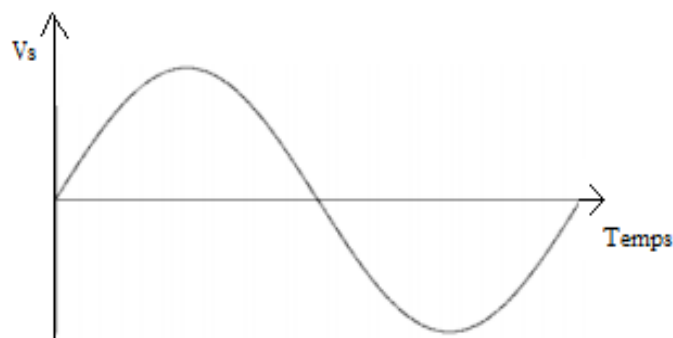


Figure 20 : Forme d'onde de sortie d'un onduleur à onde sinusoïdale

La sortie du tel type d'onduleur est une forme d'onde de tension très similaire à la forme d'onde de tension reçue du réseau. C'est une onde sinusoïdale qui permet d'alimenter des systèmes électroniques sensibles sans causer des problèmes ou du bruit.

Chacun des trois types d'onduleurs cités dans cette partie sert à des applications spécifiques. Ainsi, l'efficacité, la simplicité et le coût varient d'un type à l'autre. L'onduleur à onde carrée est relativement moins cher que les autres types. Il est convenable à des applications de faible et moyenne puissance. Son inconvénient se manifeste dans les harmoniques indésirables. Ce type de convertisseur est de moins en moins utilisé. L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée présente un rapport qualité prix généralement optimale. Il est capable de faire fonctionner une grande variété de charges (éclairage, équipement électronique, moteurs) et présente des harmoniques indésirables suffisamment faibles vu qu'il génère une onde proche d'une sinusoïde. L'onduleur à onde sinusoïdale est plus cher par rapport aux autres types. Il est recommandé pour tous les types d'installation vu qu'il produit un courant électrique similaire à celui du réseau de distribution électrique.

## 8. La Modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique la plus courante pour la génération d'une onde sinusoïdale pure. Le signal MLI est un train d'impulsions avec fréquence et amplitude fixes et largeur d'impulsion variable. Il contrôle la commutation de l'onduleur de telle sorte que la forme d'onde de la tension de sortie correspond à une onde sinusoïdale. Dans cette méthode, une tension d'entrée continue fixe est fournie à l'onduleur et une tension de sortie alternative contrôlée est obtenue en ajustant les périodes de marche et d'arrêt des interrupteurs de l'onduleur. La génération d'un signal MLI se fait par la comparaison d'un signal de référence souhaité (sinusoïdal ou carré) avec un signal porteur (dents de scie ou triangulaire) de fréquence élevée. Cette technique est facile à mettre en œuvre, compatible avec les microprocesseurs numériques et permet de minimiser les harmoniques d'ordre inférieure ce qui minimise les exigences de filtrage. Différentes types de modulation de largeur d'impulsion ont été développés par les chercheurs. A savoir, la modulation de largeur d'impulsion simple, multiple et sinusoïdale [19] [20].



### 8.1. La modulation de largeur d'impulsion simple

Le signal de commande d'une modulation de largeur d'impulsion simple est généré par comparaison d'un signal de référence rectangulaire avec une onde porteuse triangulaire. Le signal de commande de cette technique ainsi que le principe de comparaison sont illustrés par la figure 21.

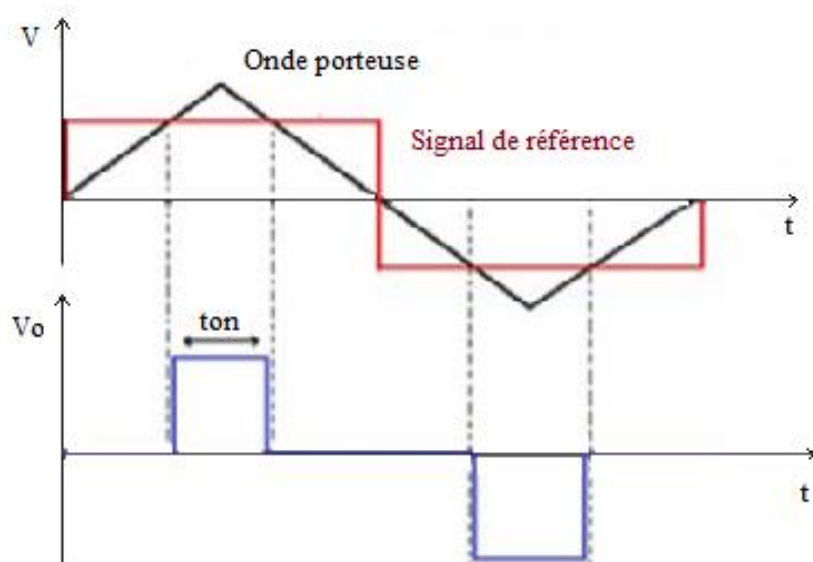


Figure 21 : La modulation de largeur d'impulsion simple

La comparaison résulte une impulsion par demi-cycle comme illustré par la figure 21. Le contrôle de l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur se fait par la variation de la largeur de l'impulsion. La fréquence du fondamentale de la tension de sortie est celle du signal de référence.

### 8.2. La modulation de largeur d'impulsion multiple

Le signal de commande d'une modulation de largeur d'impulsion multiple est généré par la même manière que la modulation de largeur d'impulsion simple (comparaison entre un signal de référence rectangulaire avec une onde porteuse triangulaire) sauf que la valeur de la fréquence de l'onde porteuse est plus élevée. Le signal de commande de la modulation de largeur d'impulsion multiple ainsi que le principe de comparaison sont illustrés par la figure 22.

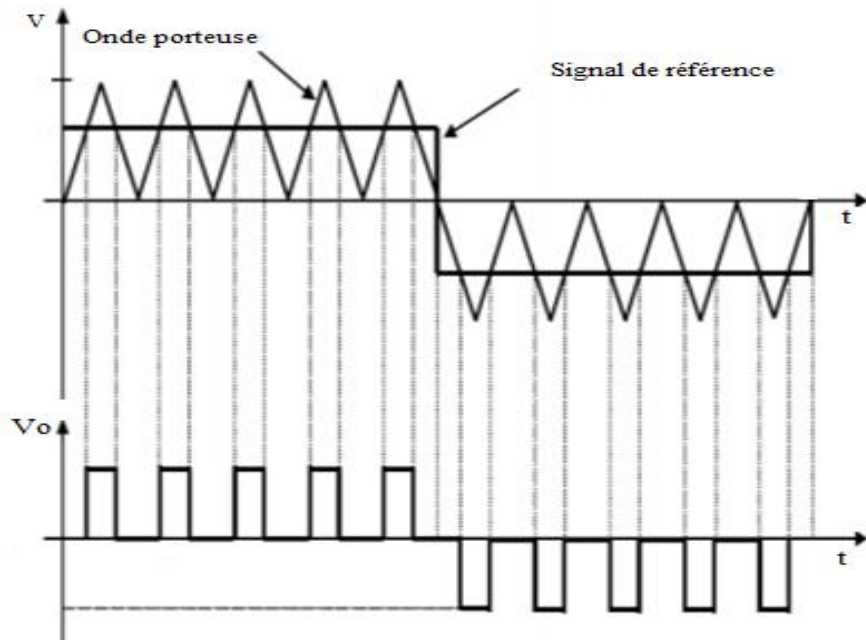


Figure 22: La modulation de largeur d'impulsion multiple

Cette méthode permet d'avoir plusieurs impulsions de même largeur par demi-cycle. Il en résulte une réduction du contenu harmonique. La fréquence du signal de référence définit la fréquence du signal de sortie et la fréquence de la porteuse détermine le nombre d'impulsions par demi-cycle.

### 8.3. La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

Le signal de commande de la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale peut être produit par la comparaison d'un signal de référence sinusoïdale avec un signal porteur triangulaire haute fréquence. Le signal de commande de cette technique ainsi que le principe de comparaison sont illustrés par la figure 23.

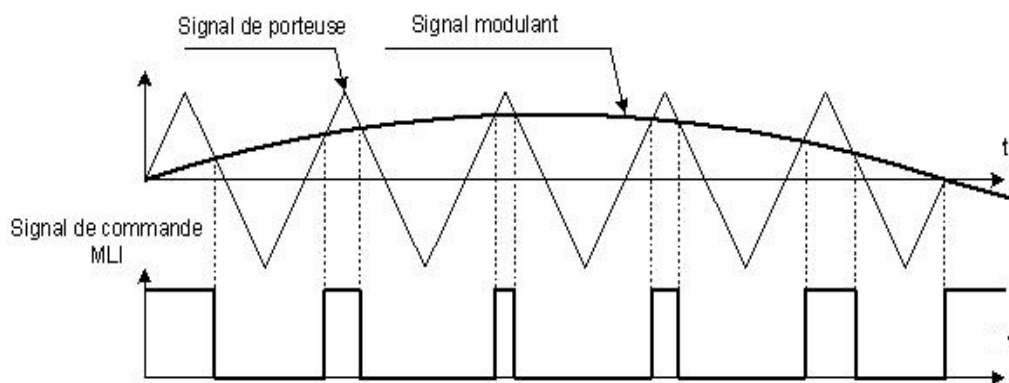


Figure 23 : La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

Le signal de sortie est composé de plusieurs impulsions de largeur variable par demi-cycle. Le nombre d'impulsions par demi-cycle dépend de la fréquence de l'onde porteuse. La largeur de chaque impulsion varie proportionnellement à l'amplitude de l'onde sinusoïdale. La fréquence du signal de référence détermine la fréquence de la tension de sortie et son amplitude crête contrôle l'indice de modulation. Ce dernier permet de modifier la valeur de la tension de sortie. C'est une technique réduit considérablement les harmoniques d'ordre inférieur de la tension de sortie.

Les avantages de la modulation de largeur d'impulsion se manifestent dans la réduction des harmoniques indésirables de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage (les harmoniques d'ordre supérieur peuvent être filtrés facilement). De plus que, la tension de sortie peut être contrôlée facilement par le contrôle du temps de la commutation de l'onduleur en modifiant la largeur des impulsions.

## 9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du potentiel de l'énergie solaire en tenant compte de sa répartition dans le monde. Il a exposé aussi le taux de la participation de cette source d'énergie dans la production mondiale d'électricité et les différents types d'installations utilisées pour son exploitation. Plus de détails sur la production PV a été développé, on outre, une étude des différents étages de conversion d'énergie d'un système PV et différentes types de commande qui améliore la conversion a été développé.

## Chapitre II

### *Etude, dimensionnement et simulation d'un système PV autonome*

#### 1. Introduction

Le système PV dimensionné et simulé vise à alimenter une charge résistive. Il se constitue d'un générateur PV qui débite la puissance nécessaire à la sortie du système. Un hacheur élévateur commandé par un régulateur PI pour réguler sa tension de sortie à une valeur constante égale à 240V. Un onduleur pont monophasé commandé par la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale et un filtre LC.

#### 2. Le générateur photovoltaïque :

Dans cette simulation, le générateur photovoltaïque utilisé produit une puissance crête de 2.252 KW. Les valeurs du courant et de la tension correspondant à la puissance maximale sont  $I_{pv}=24.45A$  et  $V_{pv}=92.1V$  respectivement. Les caractéristiques I/V et P/V du générateur sont données par les figures ci-dessous.

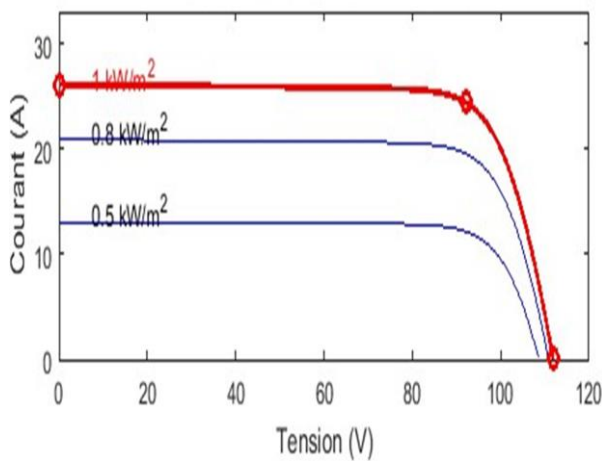


Figure 24 : Les caractéristiques I/V du générateur PV en fonction de la variation de l'irradiation

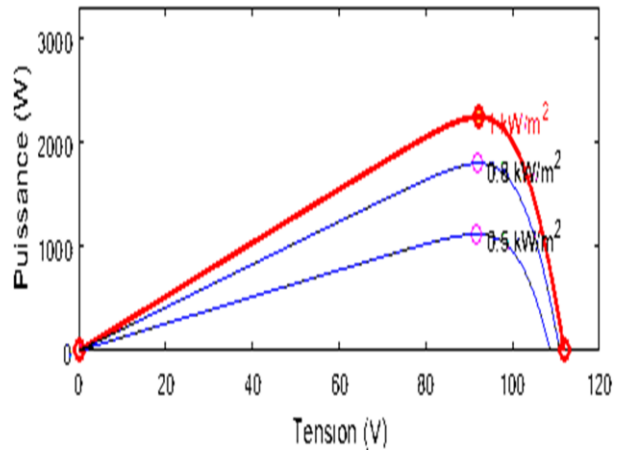


Figure 25 : Les caractéristiques P/V du générateur PV en fonction de la variation de l'irradiation

La chute de l'irradiation cause la diminution de la valeur du courant maximale. Ainsi, la valeur de la puissance chute.

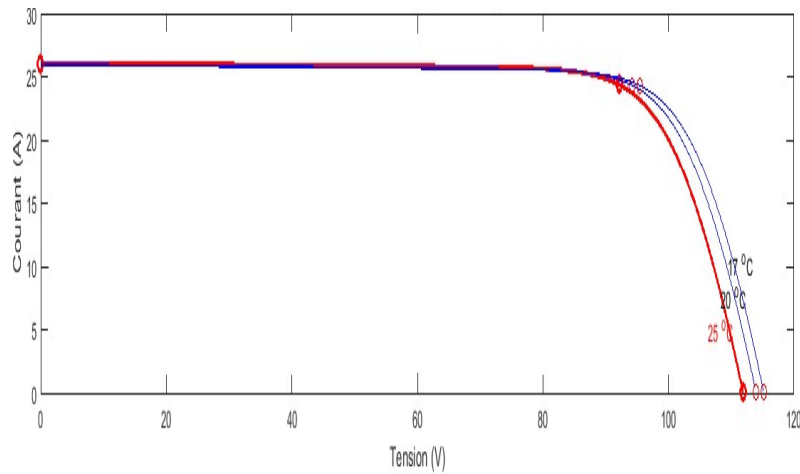


Figure 26 : Les caractéristiques I/V du générateur PV en fonction de la variation de la température

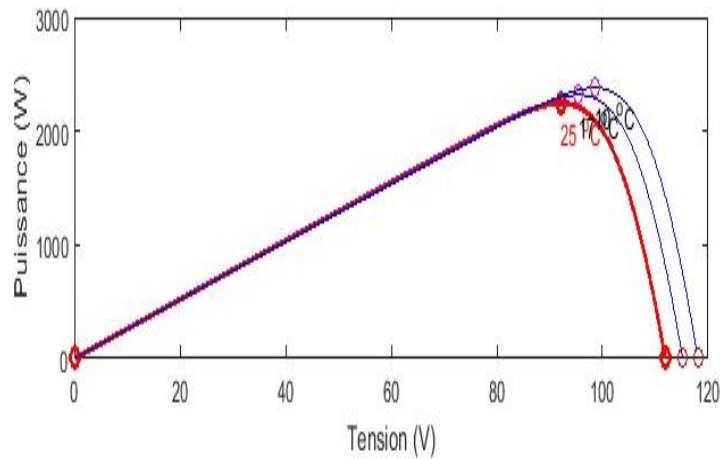


Figure 27 : Les caractéristiques P/V du générateur PV en fonction de de la température

La baisse de la température affaiblit la valeur de la tension. Par conséquent, la puissance maximale du générateur photovoltaïque diminue. La puissance crête du générateur photovoltaïque est affectée par le changement de l'irradiation et de la température.

### 3. Le hacheur élévateur :

Le système étudié contient un hacheur élévateur. C'est un dispositif qui génère une tension de sortie supérieure à celle d'entrée [21]. L'équation qui lie la tension de sortie à la tension d'entrée est donnée par :

$$V_s = V_e / (1-D) \quad (4)$$

La structure du hacheur élévateur est donnée par la figure 28. Il se constitue par une bobine L, un condensateur C, une diode et un interrupteur commandé.

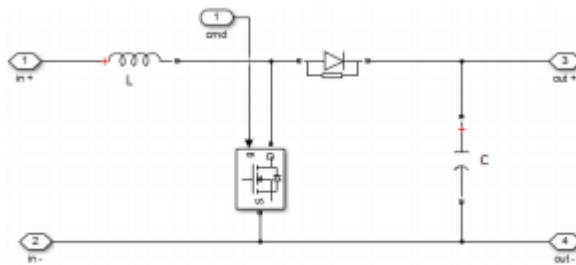


Figure 28 : Hacheur élévateur

En se basant sur l'état du commutateur commandé, le convertisseur élévateur présente deux phases de fonctionnement.

- Phase d'accumulation d'énergie: le commutateur commandé est fermé, le courant le traverse et la bobine stocke de l'énergie. La diode bloque le courant afin que le condensateur alimente la charge.
- La phase de roue libre: le commutateur commandé est ouvert, il bloque le courant. L'énergie stockée dans la bobine est ajoutée à l'énergie du générateur à travers la diode et est transmise au condensateur et à la charge.

La valeur de l'inductance doit être suffisamment grande pour réduire l'ondulation du courant à ses bornes. L'équation ci-dessous a été appliquée pour calculer la valeur de l'inductance nécessaire pour un fonctionnement en mode de conduction continue [21].

$$L = \frac{V_{mp} * D}{\Delta I_L * f_d * I_{mp}} \quad (5)$$

$V_{mp}$  représente la tension de point de puissance maximale,  $D$  désigne le rapport cyclique,  $\Delta I_L$  est l'ondulation du courant aux bornes de la bobine,  $f_d$  est la fréquence d'échantillonnage et  $I_{mp}$  désigne le courant de point de puissance maximale.

Le condensateur doit être dimensionné de telle sorte qu'il réduit l'ondulation de la tension à ses bornes et maintient le niveau de la tension requis pendant les transitions rapides des conditions environnementales et les changements soudains de la charge. Le dimensionnement de sa valeur a été basé sur l'équation ci-dessous.

$$C = \frac{I_s * D}{f_a * \Delta V_s} \quad (6)$$

$I_s$  : Le courant de sortie

$\Delta V_s$  : L'ondulation de la tension aux bornes du condensateur

Le convertisseur élévateur dans ce travail est contrôlé par un régulateur PI. Ce dernier est utilisé pour maintenir la valeur souhaitée de la tension de sortie du hacheur indépendamment des variations de rayonnement et de la température. Sa fonction de transfert est donnée par:

$$C(p) = K_p + K_i / p \quad (7)$$

Le régulateur PI contrôle le temps de la phase d'accumulation d'énergie pour une valeur de fréquence fixe. La fréquence de commande utilisée pour simuler ce système est de 20 KHz. Le dimensionnement des paramètres du régulateur PI se fait via un programme développé dans le logiciel Matlab. Il consiste à calculer la fonction de transfert en boucle fermée constituée à base du modèle mathématique du hacheur élévateur et de la fonction de transfert du régulateur PI. Par identification de l'équation résultante à celle souhaitée, il calcule les paramètres du régulateur. La boucle de régulation est donnée par la figure 29.

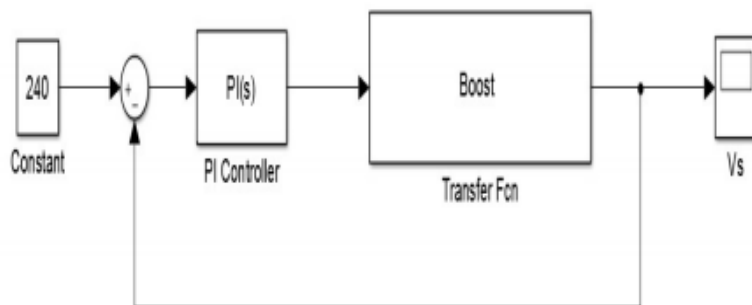


Figure 29 : Boucle de régulation

La fonction de transfert du convertisseur élévateur DC-DC qui relie la tension de sortie au rapport cyclique en mode de conduction continu est donnée par [22]:

$$\frac{V_s}{D} = \frac{V_s^2 (1 - D)^2}{VeLC} * \frac{\left(1 - \frac{LV_s^2}{Rve^2} p\right) (1 + RcCs)}{P^2 + \frac{(1-D)^2}{RC} P + \frac{(1-D)^2}{LC}} \quad (8)$$

#### 4. L'onduleur :

Le schéma de la simulation contient un onduleur pont H afin de convertir la tension d'entrée continue en une tension de sortie sinusoïdale d'amplitude et de fréquence souhaitées. La structure de l'onduleur est donnée par la figure 30.

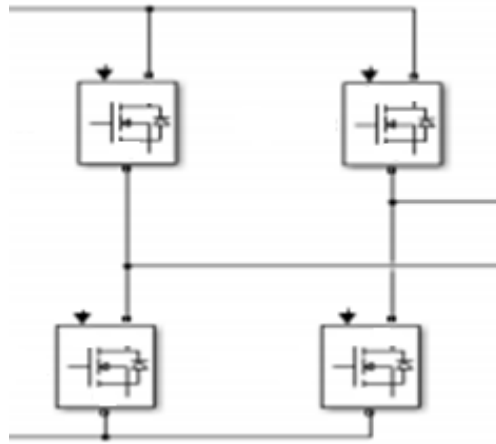


Figure 30 : L'onduleur

Les deux commutateurs du côté haut contrôlent l'accessibilité de la tension continue aux bornes de la charge, tandis que, les deux commutateurs du côté bas contrôlent la connexion de la charge à la terre. La commutation fait référence à l'inversion de la tension de sortie de l'onduleur entre le rail DC positif et négatif. Il en résulte un signal de tension alternative.

L'onduleur est contrôlé par la commande MLIS. Il consiste à comparer une onde sinusoïdale à une onde triangulaire haute fréquence. Cela se réfère à la comparaison de l'amplitude instantanée du signal sinusoïdal avec celle du signal triangulaire à un moment donné. Si l'amplitude du signal triangulaire est inférieure à celle du signal sinusoïdal, la charge sera connectée au côté positif du rail DC, sinon la charge sera connectée au côté négatif du rail DC. Il en résulte plusieurs impulsions de sortie de



largeur différente par demi-cycle. La fréquence de commutation du signal résultant est celle du signal triangulaire. Le schéma de comparaison est donné par la figure 31.

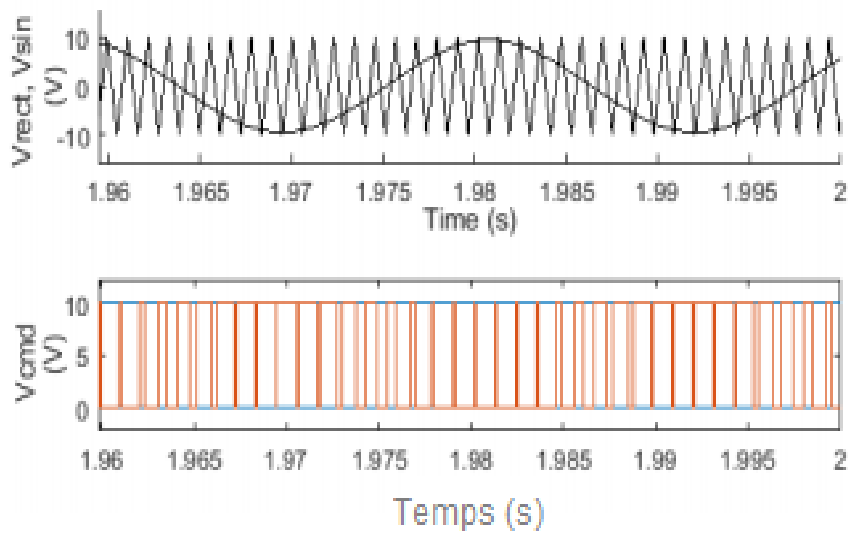


Figure 31 : La commande MLIS

#### 5. Le filtre LC

Le signal de sortie de l'onduleur contient des composants sinusoïdaux indésirables et la commutation des interrupteurs produit une ondulation de la tension. Pour obtenir une sortie sinusoïdale d'ondulation atténuée, un filtre triphasé qui élimine les composants de fréquence indésirables et minimise les ondulations de tension a été introduit à la sortie de l'onduleur. Pour calculer les valeurs d'inductance et du condensateur, l'équation ci-dessous a été utilisée.

$$F_0 = 2\pi\sqrt{LC} \quad (9)$$

#### 6. Simulations de la chaine de pompage adoptée

Afin de prouver le bon fonctionnement du système dimensionné on a procédé par simulation sous le logiciel Matlab Simulink. Pour tester l'efficacité du régulateur PI dimensionné et programmé. Deux systèmes ont été simulés. Un système commandé par un rapport cyclique constant et l'autre est commandé par un rapport cyclique variable généré par le régulateur PI. Les deux systèmes ont été simulés sous irradiation et température variables. Les courbes de la variation de l'irradiation et de la température appliquées sont données par la figure 32 et la figure 33 respectivement.

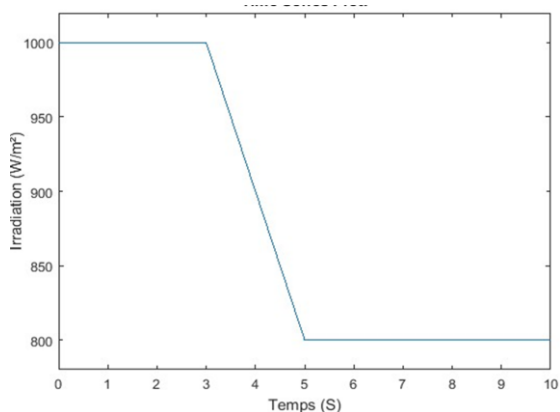


Figure 32 : Variation de l'irradiation

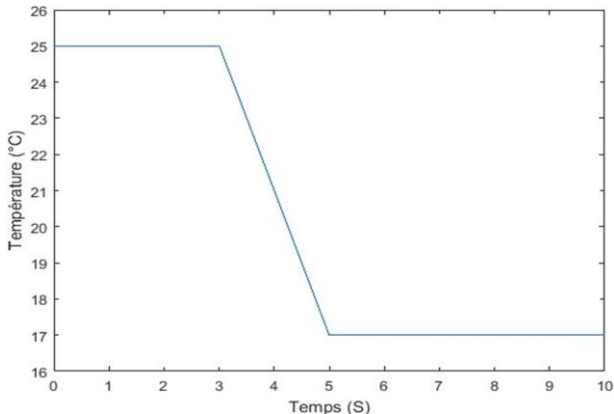


Figure 33 : Variation de la température

La courbe de l'irradiation débute avec la valeur  $1000\text{W/m}^2$ . A l'instant  $t=3\text{s}$  la courbe chute et atteint la valeur  $500\text{W/m}^2$  à l'instant  $t=5\text{s}$ . La courbe de la température débute avec la valeur  $25^\circ\text{C}$  et chute à l'instant  $t=3\text{s}$  pour tendre vers la valeur  $17^\circ\text{C}$  à l'instant  $t=5\text{s}$ .

### 6.1. Simulation du système commandé par rapport cyclique fixe

Le système commandé par un rapport cyclique fixe est donné par la figure 34.

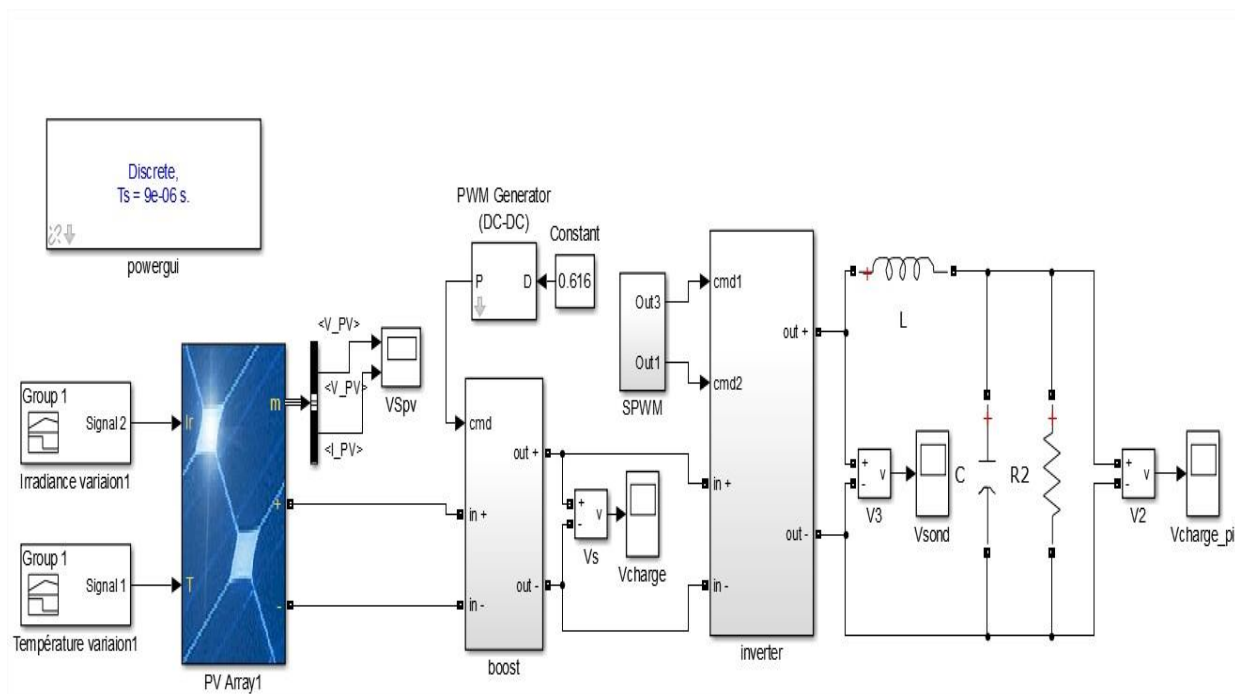


Figure 34 : Système commandé par un rapport cyclique constant

La tension de sortie du hacheur élévateur est donnée par la figure 35.

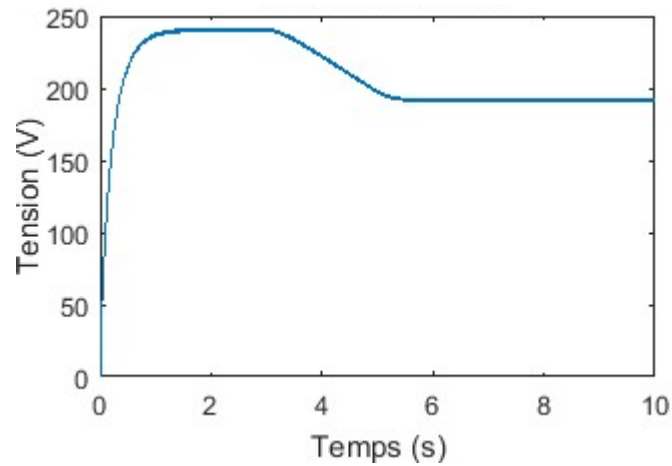


Figure 35: La tension de sortie du hacheur

On remarque que la tension de la sortie du hacheur se stabilise au début à la valeur 240V. La variation de l'irradiation et de la température impose la chute de la tension de la valeur 240V à une valeur plus faible.

## 6.2. Simulation du système commandé par un rapport cyclique variable

Le système commandé par un rapport cyclique variable généré par le régulateur PI est donné par la figure 36.

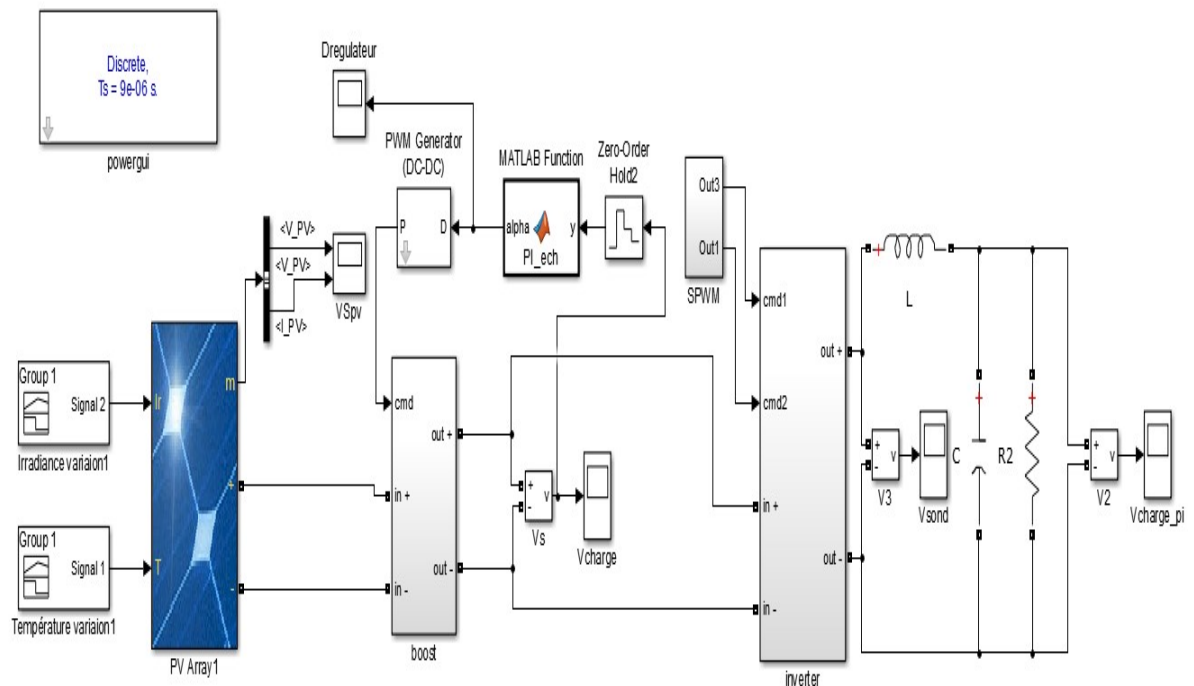


Figure 36 : Système PV commandé par le régulateur PI

La tension de sortie résultant du convertisseur élévateur est donnée sur la figure 37.

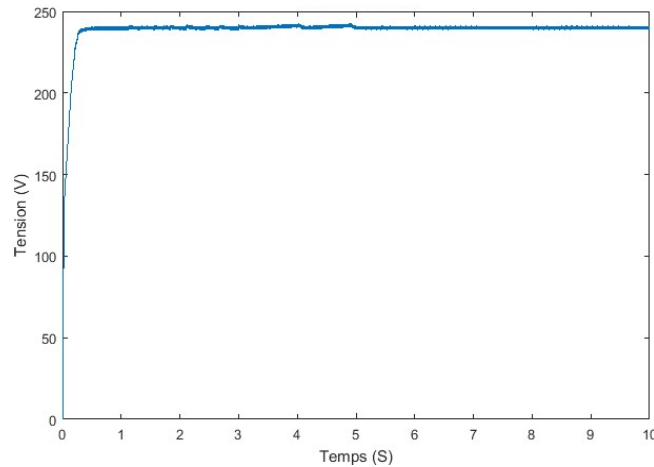


Figure 37 : Tension du hacheur élévateur

La tension de sortie du hacheur élévateur tend vers la valeur souhaitée. Cette valeur est maintenue toute au long de la simulation. On remarque une oscillation de la sortie au moment où la température et l'irradiation sont variables. Le correcteur PI remplit sa fonction.

La courbe du rapport cyclique produit par le régulateur PI est donnée par la figure 38.

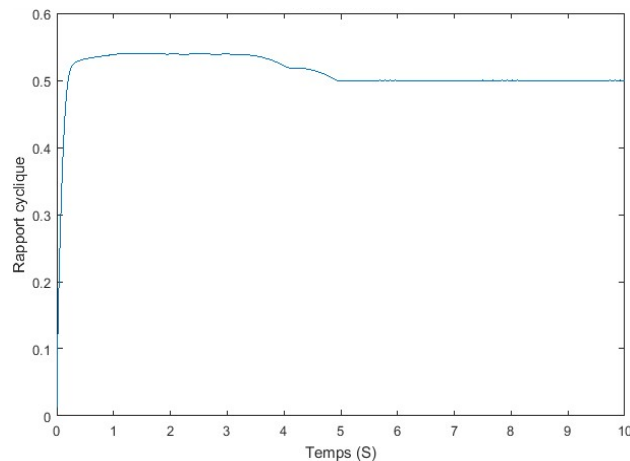


Figure 38 : Rapport cyclique

La courbe du rapport cyclique commence par une valeur nulle et tend vers la valeur 0.54. La variation de l'irradiation et de la température cause le changement du rapport cyclique qui chute. À l'instant où l'irradiation et la température se stabilisent, la courbe du rapport cyclique se stabilise à la valeur 0.5.

La courbe de la tension de sortie de l'onduleur est donnée par la figure 39 :

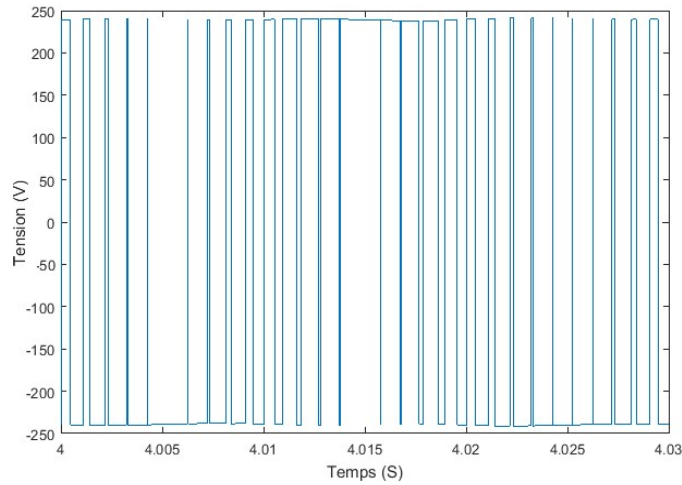


Figure 39 : Tension de sortie de l'onduleur

La tension de sortie de l'onduleur est un signal carré qui oscille autour de 240 et -240. La tension de sortie du système est donnée par la figure 40.

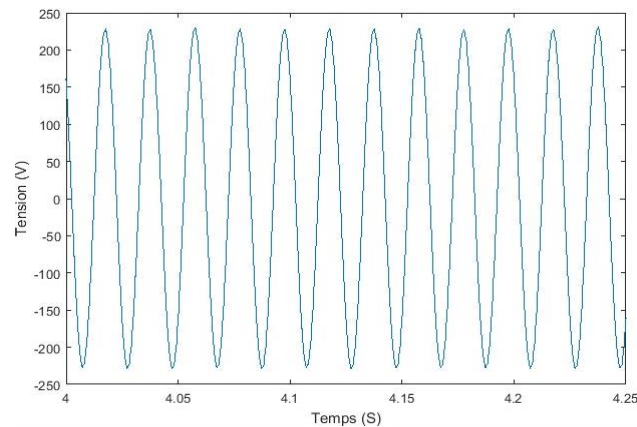


Figure 40 : Tension de sortie du filtre

La tension de sortie du filtre LC est un signal alternatif sinusoïdal de fréquence 50Hz.

## 7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude et le dimensionnement d'une chaîne de production PV qui vise à alimenter une charge résistive. Afin de contrôler la tension du bus continu, un régulateur PI est introduit dans le système pour commander le hacheur. Pour examiner le fonctionnement du régulateur, une simulation sans et avec régulation a été considérée. Les résultats de la simulation prouvent que le fonctionnement du

système est optimal. Le régulateur PI contrôle la tension de la sortie du hacheur à la valeur désirée à partir du rapport cyclique en présence des variations climatiques.

Aujourd'hui les systèmes photovoltaïques sont introduits dans divers secteurs. La fiabilité technique des systèmes PV, leur viabilité économique à long terme et les développements récents dans domaine du pompage nous a stimulés à le choisir comme application. La suite de ce travail s'inscrit dans la dynamique du pompage solaire photovoltaïque autonome.

### *Les systèmes PV autonomes et le pompage*

#### 1. Introduction :

Parmi leurs applications, les systèmes photovoltaïques autonomes apportent une contribution importante au pompage d'eau. En effet, les systèmes de pompage d'eau sont présents depuis longtemps. Au début ils ont été soit manuels, soit basés sur la traction animale. Par la suite l'utilisation des moteurs diesel ou électriques dans telles applications est devenue populaire. Pourtant, le pompage photovoltaïque présente une alternative écologique aux pompes conventionnelles à carburant. De plus le prix élevé du carburant, l'entretien fréquent nécessaire, l'inaccessibilité au réseau de certaines zones et la pollution de l'environnement rendent le pompage photovoltaïque une solution prometteuse. C'est une solution qui améliore considérablement la qualité de la vie des gens vivant dans des collectivités rurales et éloignées sans causer des dégâts à l'environnement. C'est une solution qui répond aux besoins d'irrigation et d'approvisionnement en eau hors réseau.

Le choix de la structure du système de pompage et son dimensionnement sont des étapes très importantes pour la fiabilité et la durabilité du système. Ceci nécessite un traitement des exigences et des conditions dans lesquelles l'eau doit être pompée. En effet, la conception et le processus de dimensionnement de tels systèmes dépendent de plusieurs facteurs. A savoir l'utilité, les ressources en eau, la profondeur à partir de laquelle l'eau est pompée, la saison et l'heure du pompage, et les conditions météorologiques spécifiques dans la zone où l'eau doit être extraite.

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïques sont développés dans le monde entier. Jusqu'à présent, l'optimisation de tels systèmes a été une tâche qui a motivé et mis au défi les chercheurs de domaine de l'ingénierie. Étant donné que différents étages de traitement de puissance doivent être interprétés et différents critères doivent être respectés afin d'avoir une technologie plus efficace, simple, rentable et sophistiquée. Cependant, le nombre de systèmes déjà installés montre que le pompage d'eau photovoltaïque est techniquement mature.

## 2. Performances des systèmes de pompage d'eau PV

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïques ont été largement étudiés pour satisfaire les besoins en eau, soit pour l'irrigation des fermes ou des jardins, soit pour assurer l'eau sanitaire nécessaire. Cette partie de la thèse présente une revue de la littérature afin d'identifier les applications, les outils et les performances de l'utilisation du photovoltaïque dans les systèmes de pompage d'eau PV.

Allouhi, M.S. Buker, H. El-houari, A. Boharb, M. Benzakour Amine, T. Kousksou, A. Jamil [23] ont étudié les systèmes de pompage d'eau PV à usage domestique dans les zones reculées. Ils ont entamé le processus de dimensionnement et l'évaluation économique d'un système de pompage photovoltaïque pour assurer l'approvisionnement nécessaire pour cinq logements voisins. Deux configurations ont été examinées. Le couplage où les panneaux photovoltaïques sont directement liés au moteur continu qui entraîne la pompe, et le couplage par l'intermédiaire du convertisseur DC commandé par la MPPT placé entre les panneaux photovoltaïques et le moteur. L'étude comparative des deux configurations menées a montré que la deuxième configuration a dépassé le couplage direct en termes du nombre de modules PV à installer et la quantité d'eau pompée par unité de temps. L'utilisation du convertisseur DC-DC commandé par la MPPT entraîne une réduction de 30% de la capacité des modules photovoltaïques à utiliser. Ce qui implique une amélioration de la faisabilité économique des systèmes de pompage d'eau photovoltaïques.

Abdulbasit Nasir [24] a étudié la conception, la simulation et l'analyse d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'une ferme de pomme de terre à partir de l'eau de la rivière. Avant la conception, une évaluation des besoins en eau et des ressources solaires disponibles a été élaborée. Ce travail a aussi entamé une comparaison au niveau économique entre un système de pompage d'eau à base du moteur diesel et un système de pompage d'eau photovoltaïque. Il en résulte que l'utilisation de l'énergie solaire pour le système de pompage d'eau est une alternative plus bénéfique, efficace, rentable et adaptée aux investissements à long terme par rapport au diesel. De plus qu'il entraîne une réduction des émissions du gaz CO<sub>2</sub>.

M. Benghanem, K.O. Daffallah, A. Almohammedi [25] ont proposé un modèle pour l'estimation du débit journalier des systèmes de pompage d'eau photovoltaïques en se basant sur des données de rayonnement solaire. Ce travail vise à développer une



méthode d'évaluation des performances des systèmes de pompage photovoltaïques à couplage direct. Pour prévoir les performances des systèmes, ils ont exploité la relation entre le débit d'eau et l'énergie solaire. Cette relation obtenue expérimentalement permet de simuler avec une bonne précision le débit d'eau en fonction des données de rayonnement solaire mesurées. Ils ont constaté que le débit d'eau augmente avec l'augmentation de la puissance de la pompe.

Mokeddem Abdelhamid Midoun b, D. Kadri c, Said Hiadsi c, Iftikhar A. Raja [26] ont étudié les performances d'un système de pompage photovoltaïque à couplage direct. Le système se constitue d'un champ photovoltaïque de puissance 1,5 KW, un moteur à courant continu et une pompe centrifuge. Une étude expérimentale menée pendant 4 mois où les performances du système ont été surveillées sous variable irradiation et température à permet de conclure que la conception du système est simple, et nécessite un faible coût. Ainsi, le système requiert un minimum d'entretien après l'installation. Par contre, après tout changement des conditions climatiques, ce type de système atteint l'état d'équilibre dans un certain temps. En conclusion ce type de système convient aux applications qui nécessitent un faible débit.

Mansur Aliyu, Ghassan Hassan, Syed A. Said, Muhammad U. Siddiqui, Ali T. Alawami, Ibrahim M. Elamin [27] ont présenté un document de recherche nommé « Examen des systèmes de pompage d'eau à énergie solaire » où ils ont exposé les dernières publications concernant les systèmes de pompage d'eau photovoltaïques. Ce travail présente les méthodes de dimensionnement, les applications et la contribution de l'utilisation du pompage solaire à la réduction des émissions de gaz CO<sub>2</sub>. Il en résulte que tels systèmes sont applicables pour des profondeurs qui ne dépassent pas 200 m. Néanmoins qu'ils sont économiques à faible capacité de pompage par rapport aux systèmes de pompage d'eau diesel, éoliens, et qu'ils contribuent à un environnement propre. D'après ce travail, cette technologie est installée dans plusieurs pays à travers le monde, dont le tiers de ces pays est en Afrique.

SS Chandel, M. Niagaraju Naik, Rahul Chandel [28] ont présenté un document nommé : « Examen de la technologie du système de pompage solaire photovoltaïque pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable communautaire » où ils ont examiné les différents travaux menés en ce qui concerne la technologie du pompage photovoltaïque. Ils ont présenté les études d'analyse de performance, les techniques

optimales de dimensionnement, l'évaluation économique, les avancées récentes en matière de matériaux pour l'amélioration de l'efficacité de la technologie photovoltaïque, les aspects environnementaux et l'expérience de l'utilisation de pompes photovoltaïques dans le monde entier. Ils ont conclu que cette technologie est fiable et économique par rapport à l'alimentation électrique et diesel. Aussi, le pompage photovoltaïque est une solution optimale pour les zones reculées qui n'ont pas accès au secteur public de l'électricité. Ils ont noté aussi que des recherches doivent être menées dans le domaine afin d'améliorer les performances de tels systèmes et réduire le coût des panneaux photovoltaïques.

M. Malla.Jagan Mohana Rao, Dr Manoj Kumar Sahu, Dr Pravat Kumar [29] ont élaboré un article nommé : « un système de pompage d'eau PV pour le secteur agricole ». Leur système se constitue d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC, une batterie, un convertisseur DC-AC, un moteur asynchrone et une pompe centrifuge. Dans ce travail deux régulations ont été proposées, à savoir la régulation du débit d'eau, ainsi que le contrôle du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque. Le débit d'eau est contrôlé à travers la régulation de la vitesse de rotation du moteur asynchrone. A partir des résultats de la simulation, ils ont conclu que cette configuration est une solution rentable pour les systèmes de pompage d'eau pour le secteur agricole.

S.S. Chandel, M. Niagaraju Naik, Rahul Chandel [30] ont proposé leur document de recherche nommé « revue des études de performance des systèmes de pompage photovoltaïques à couplage direct, étude de cas ». L'objectif de ce travail est de présenter les dernières études des performances des systèmes de pompage d'eau photovoltaïques à couplage direct, ainsi qu'une étude de cas d'une pompe à courant continu fonctionnelle depuis 28 ans, afin d'évaluer l'efficacité de la technologie et les problèmes liés aux conditions de terrain. Ils ont conclu que les systèmes de pompage photovoltaïques à couplage direct nécessitent un faible coût et peuvent répondre à des applications, où le besoin d'eau est faible. L'ajout des étages de contrôle électroniques et des régulations permet d'optimiser le rendement de ce type de système pour satisfaire un approvisionnement en eau important. Le rendement réel sur terrain des systèmes de pompage photovoltaïques est inférieur à celui prévu par le fabricant à cause du changement des conditions climatiques. Les résultats d'étude de cas montrent qu'une évaluation de l'état du générateur PV est nécessaire de temps en temps, car la

dégradation du générateur à cause des conditions de terrain affecte le rendement du système par le temps.

A partir des travaux présentés dans cette section et d'autres, qui entament le pompage photovoltaïque, on résume que cette technologie nécessite un faible coût comparé au diesel, de même qu'elle est efficace pour prévoir l'approvisionnement en eau nécessaire. Il suffit d'étudier le terrain où le système va être installé et les ressources d'eau disponibles, choisir le type d'installation convenable, établir un dimensionnement optimal et prévoir des étages de traitement d'énergie et des contrôles pour optimiser le fonctionnement.

### 3. Structure des systèmes de pompage photovoltaïques :

Le système de pompage photovoltaïque peut être conçu sous différentes configurations. Il existe plusieurs types de moteurs et de pompes qui peuvent être utilisés. Le type de montage dépend de la pompe et du moteur choisi. Pour déterminer la configuration optimale à une application particulière, plusieurs facteurs doivent être pris en compte. La première configuration possible d'un système de pompage PV est le système DC à couplage direct [31]. Elle est illustrée dans la figure 41.

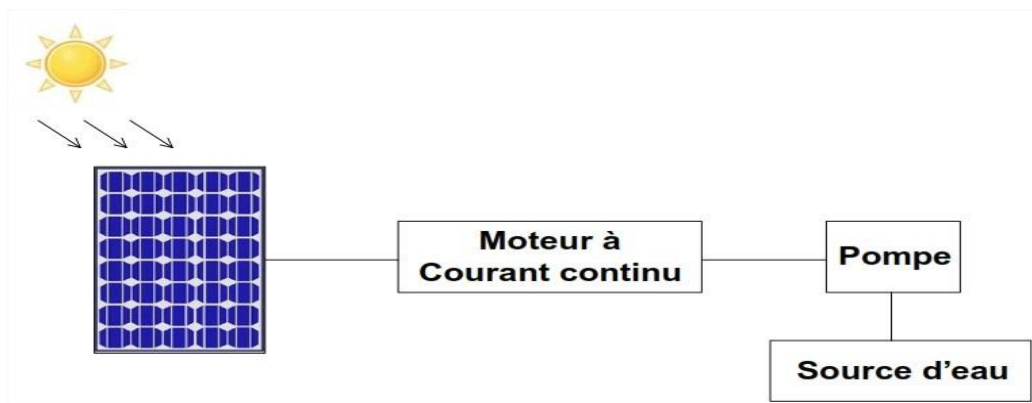


Figure 41 : Système de pompage à couplage direct

Ce type de configuration se compose d'un générateur PV connecté directement à un moteur à courant continu qui entraîne une pompe. Cette dernière pompe l'eau à travers un tuyau à un endroit précis. Ce système est conçu pour pomper l'eau uniquement pendant la journée, et la quantité d'eau pompée dépend totalement de la quantité de la lumière du soleil qui atteint les panneaux photovoltaïques. En effet, des valeurs optimales de l'ensoleillement et de la température permettent un bon rendement

alors que la dégradation de ces conditions implique un rendement faible. Cette configuration se caractérise par la simplicité et le coût faible.

La deuxième configuration à noter consiste à joindre un étage de conversion à la structure citée au début de cette partie. C'est un convertisseur DC-DC introduit entre le panneau PV et le moteur à courant continu. Cette structure est illustrée par la figure 42.

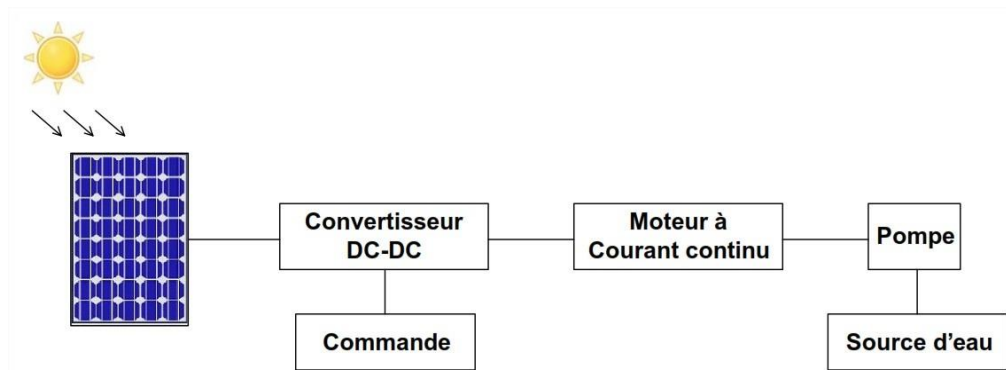


Figure 42 : Système de pompage à couplage direct avec convertisseur DC\_DC

Dans tel cas, le convertisseur DC\_DC est contrôlé par une commande MPPT. Ceci force le système à fonctionner au point de puissance maximale du générateur photovoltaïque. Ce qui rend le générateur capable de produire la puissance maximale correspondante a toute valeur de l'ensoleillement et la température. Par conséquent, le nombre des panneaux solaires à utiliser est réduit et l'efficacité du système est améliorée.

Un système à couplage direct avec convertisseur DC-DC peut contenir des batteries. C'est la configuration présentée par la figure 43.

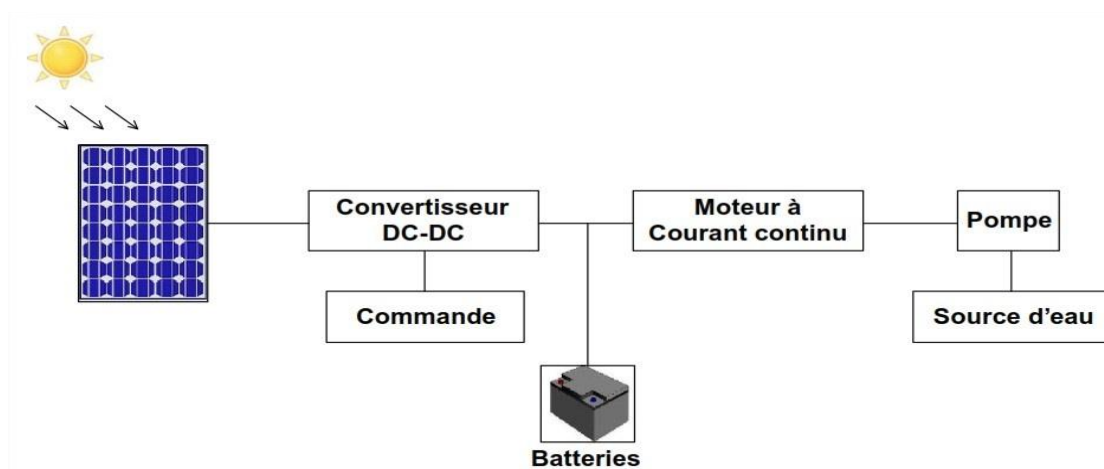


Figure 43 : Système de pompage DC avec stockage d'énergie

La configuration de la figure ci-dessus permet l'optimisation du fonctionnement du système. En effet, l'utilisation des batteries étale le pompage sur une plus longue période du temps. Les batteries stockent de l'énergie lorsque les conditions météorologiques sont favorables afin de la fournir au moteur dans le cas contraire.

La quatrième configuration consiste à utiliser un moteur alternatif. Elle est donnée par la figure 44.

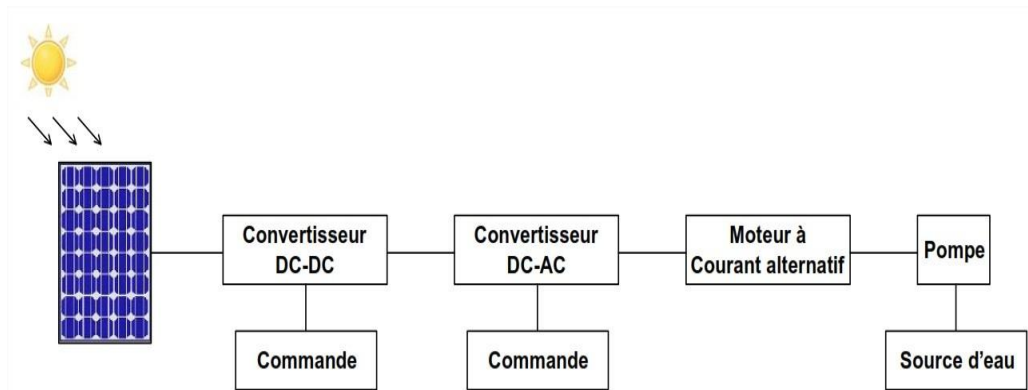


Figure 44 : Système de pompage avec moteur alternatif

Le moteur alternatif utilisé dans telle configuration peut être soit synchrone, soit asynchrone. Un étage de conversion DC-AC est nécessaire pour adapter la puissance continue générée par le panneau photovoltaïque au moteur alternatif. Cette configuration permet plusieurs commandes au niveau du convertisseur DC-AC afin d'optimiser le fonctionnement du système. Cette configuration peut contenir aussi des batteries pour le stockage de l'énergie. La structure du système de pompage avec moteur alternatif et batteries est donnée par la figure 45.

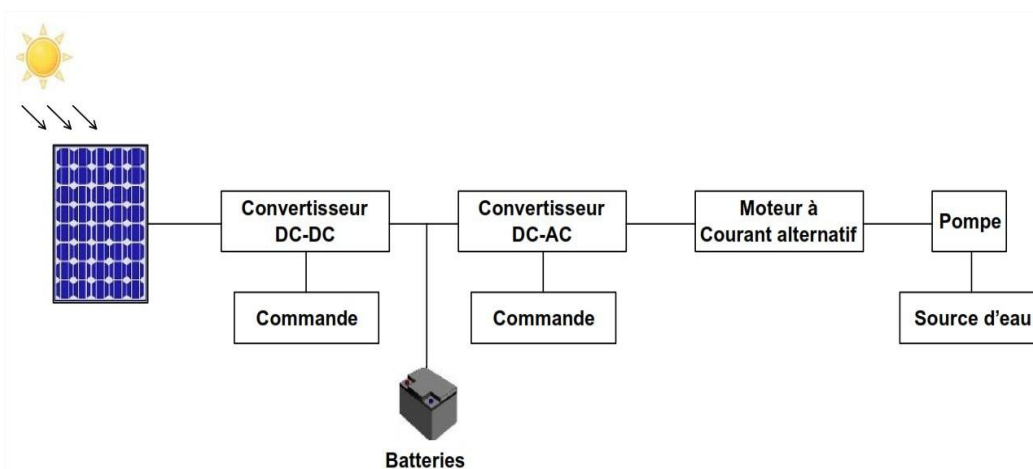


Figure 45 : Système de pompage avec moteur alternatif et stockage d'énergie

En général un système de pompage PV est constitué d'un panneau photovoltaïque qui convertit l'énergie de la lumière du soleil en électricité DC. Cette énergie est ensuite dirigée, via des étages de conversion d'énergie ou non vers le moteur pour entraîner une pompe. La pompe déplace de l'eau de la source jusqu'au point de décharge par l'intermédiaire d'un tuyau.

#### 4. La pompe :

Le progrès technologique a radicalement amélioré les performances des pompes solaires au fil des ans. Aujourd'hui, les pompes solaires peuvent soulever et transférer le liquide dans des plages de pompage allant jusqu'à 500 mètres de profondeur. Ainsi, les pompes solaires photovoltaïques sont conçues pour répondre aux exigences électriques et mécaniques en fonctionnant sous faibles puissances. Il existe différents types de pompes à eau sur le marché, qui ont des principes de fonctionnement différents. Ils peuvent être classés en fonction de leur type de conception (pompes rotatives ou volumétriques), de leur emplacement (en surface ou submersible) ou du type de moteur qu'ils utilisent (AC ou DC). Pour une installation en tant que pompe submersible dans un forage à des fins d'alimentation en eau, deux types de pompes peuvent être utilisés: la pompe centrifuge et la pompe rotative hélicoïdale [32].

##### *4.1. La pompe centrifuge :*

C'est une pompe submersible à puits profonds qui transporte des fluides par énergie de rotation. Elle peut fournir un volume d'eau important pour une vaste gamme de débits. Elle est principalement utilisée pour l'irrigation que pour les applications d'eau potable. Elle peut atteindre un débit max de 240 m<sup>3</sup>/heure et une hauteur de relevage maximum de 140 m. Elle est plus facile à installer et mieux protégées de l'environnement. Elle se caractérise par un rendement relativement élevé et elle est capable de pomper un volume d'eau important. Elle est directement mise en eau afin de le refouler à la surface.

Pour ce type de pompe, le débit varie proportionnellement avec la vitesse de rotation du moteur. L'augmentation de cette vitesse entraîne un accroissement rapide du couple.

#### 4.2. la pompe à rotor hélicoïdale excentré :

C'est une pompe volumétrique rotative composé de deux engrainages hélicoïdaux. Le mouvement tournant du rotor à l'intérieur du stator permet de transporter le liquide. Elle est adéquate pour des hauteurs élevées et des petits débits. Son débit d'eau maximal est d'environ  $3 \text{ m}^3 / \text{h}$  ( $= 18 \text{ m}^3 / \text{jour}$ ). Il est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Son couple varie en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT).

Le choix du type de la pompe à utiliser dépend de la source d'eau et du débit nécessaire. Les pompes centrifuges sont généralement préférées pour les grands besoins en eau et les puits profonds ou les forages. Les pompes volumétriques sont généralement limitées à des faibles volumes.

#### 5. Le moteur

Le moteur électrique est un élément très important dans la chaîne de pompage photovoltaïque. C'est un intermédiaire qui permet la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique pour entraîner la pompe. Plusieurs types de moteurs ont été utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Ils se divisent en deux grandes familles : les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif.

Le moteur à courant continue est facile à installer, il permet une commande de vitesse dans une large gamme par variation de la tension d'alimentation, son couple de démarrage est important et il est entraîné par un courant continu. Par-contre, son coût est élevé et il requiert plus d'entretien.

Le moteur à courant continu se trouve sous quatre types :

- Moteur à excitation série : le stator et le rotor de ce type sont couplés en série. Il permet un contrôle de vitesse par variation de la tension d'alimentation. Cependant, il a une limitation sévère lorsqu'il est entraîné directement par des panneaux photovoltaïques. En effet, une diminution de l'intensité lumineuse produit une chute de courant dans l'enroulement d'induit qui entraîne une baisse des performances du moteur de même que le contrôle de la vitesse est médiocre.

Ce type de moteur est adapté aux applications qui demandent un couple de démarrage élevé.

- Moteur à excitation shunt: le stator et le rotor de ce type sont couplés en parallèle. Son couple est plus élevé. Initialement, la vitesse de ce type de moteur est nulle, alors dans les systèmes où le moteur est directement couplé à des panneaux solaires, le démarrage est limité sur des valeurs élevées de flux lumineux pour obtenir la tension nécessaire. Par conséquent, ce type de moteur se révèle inadapté au couplage direct à des panneaux photovoltaïques, ils doivent être utilisés uniquement en association avec un hacheur.
- Moteur à excitation composée : ce type de moteur possède deux inducteurs, l'un est couplé en série avec l'induit et l'autre est couplé en parallèle. Il combine les avantages du moteur à excitation série et les avantages du moteur à excitation shunt.
- Moteur à aimant permanent : l'inducteur de ce type de moteur est un aimant permanent. Par conséquent, le flux magnétique produit est constant et indépendant du courant d'induit et de l'intensité lumineuse. Les performances sont donc indépendantes des variables externes. Il est utilisé dans des applications qui demandent une puissance et un couple faibles.

Le moteur à courant alternatif est largement employé dans l'industrie, comparé au moteur DC. Il est entraîné par un courant alternatif. Il se caractérise par un faible coût et il fait preuve d'une haute souplesse de contrôle. Il a une faible consommation au démarrage. Il permet l'ajustement de la vitesse, le contrôle du courant de démarrage, le contrôle de l'accélération et la limitation du couple. Il a une bonne efficacité pour une demande de puissance moyenne et élevée. Il y en a deux types du moteur AC. Le moteur synchrone et le moteur asynchrone.

Ainsi nommé moteur à induction, le moteur asynchrone est utilisé dans une large gamme d'application. Son coût est faible par rapport aux autres types. Il couvre une gamme de puissance allant de 5W (moteurs monophasés) à 36.8 MW. Et il se caractérise par sa robustesse. Il se compose d'un circuit magnétique séparé en deux parties par un entrefer. Son fonctionnement se base sur l'induction au niveau du stator pour créer un courant dans le rotor. Le moteur à induction permet la régulation de la vitesse en utilisant des convertisseurs électroniques. L'utilisation d'onduleurs pour



contrôler la vitesse du moteur à induction est très efficace sur de larges plages de vitesse et différent type de charge. Le type de moteur asynchrone le plus simple et le moins cher est le moteur à cage d'écureuil. C'est le moteur le plus utilisé pour les applications PV à cause de son faible coût et sa construction robuste. Le moteur à rotor bobiné est un autre type des moteurs à induction, il est généralement utilisé pour des applications industrielles.

Le moteur synchrone offre un excellent rendement pour les applications de basse vitesse. Il se caractérise par une vitesse de rotation fixe pour des charges variables. Sa vitesse est synchronisée avec la fréquence du courant d'alimentation. Il permet aussi la variation de la vitesse en variant la vitesse de synchronisme par le biais de la fréquence d'entrée.

Enfin, le choix de type de moteur pour entraîner la pompe dépend de nombreux facteurs, notamment l'application, la taille, le prix, la fiabilité et le rendement. Les moteurs à courant continu sont généralement efficaces et sont plus faciles à assortir avec le générateur photovoltaïque. D'autre part, les moteurs à courant alternatif sont moins chers et plus facilement disponibles. De plus, qu'ils offrent différentes approches de contrôle par rapport aux moteurs à courant continu dans de telles applications.

## 6. Conclusion

Le pompage d'eau PV est une solution incontournable pour les zones éloignées où aucune source d'énergie n'est disponible. Les systèmes de pompage PV sont présents sous plusieurs configurations. Chaque structure répond à des exigences spécifiques. Le type de la pompe à installer dépend de la source d'eau. Si c'est un puits, il est préférable d'utiliser une pompe submersible avec le moteur en surface ou intégré dans la pompe comme un seul composant.

### *La chaîne de pompage adoptée*

#### 1. Introduction

L'objectif principal de ce travail est de présenter une méthode simple et précise pour la conception et le choix optimal des composants d'une installation de pompage solaire au fil du soleil et l'optimisation de son fonctionnement. Le système de pompage à concevoir sera utilisé à des fins d'irrigation à partir d'un puits de profondeur 60 m. Pendant la saison estivale, la demande en eau est plus importante. Le débit journalier requis durant cette saison a été estimé de 25 m<sup>3</sup>/jour. Parmi les mois de cette saison, août se caractérise par l'irradiation la plus faible qui est égale à 750W / m<sup>2</sup>. Pendant ce mois, le système fonctionne en moyenne 7 heures par jour. Le débit horaire à assurer doit être égale à 3,5 m<sup>3</sup> / h. La profondeur du puits considérée est de 60 m. Les pertes totales de la charge sont estimées à 5 m. La hauteur totale Ht est alors de 65m.

#### 2. La structure du système de pompage adoptée :

La structure du système de pompage choisie contient plusieurs étages de traitement d'énergie, chacun d'eux est choisi en tenant compte du lieu de l'installation, des conditions climatiques de la région et des spécifications du cahier des charges. Chaque étage intégré dans le système de pompage joue un rôle important dans l'optimisation de son fonctionnement et/ou dans le dimensionnement de l'installation.

Le système se compose d'un générateur photovoltaïque dont les caractéristiques I – V dépendent non linéairement de l'énergie solaire. Un hacheur élévateur commandé par la technique MPPT P&O pour maintenir le fonctionnement du générateur PV au point de puissance maximale. Une pompe entraînée par un moteur à induction triphasé. C'est un moteur de faible coût qui fonctionne à vitesse variable, il offre différentes approches de contrôle par rapport aux moteurs à courant continu dans de telles applications [33] et ne nécessite pas d'entretien régulier. Ce qui en fait le type le plus utilisé dans le domaine du pompage solaire. Le moteur est alimenté par un onduleur triphasé qui produit une tension alternative de fréquence et d'amplitude variables à partir d'une tension continue.

Un filtre LC branché entre l'onduleur et le moteur afin d'éliminer les harmoniques. La structure est donnée par la figure 46.

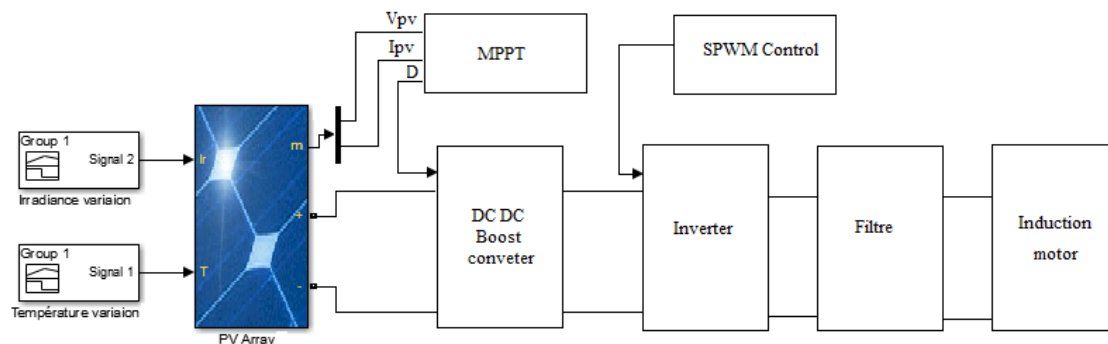


Figure 46 : Structure du système de pompage adoptée

### 3. Le dimensionnement de la chaîne de pompage :

Le dimensionnement d'un système de pompage doit être réalisé avec une grande précision. Les composants choisis du système doivent respecter la compatibilité entre eux. Un système sous-dimensionné reste moins fiable, tandis qu'un système surdimensionné présente un coût d'investissement élevé.

#### 3.1. La pompe :

L'un des principaux composants des systèmes de pompage PV est la pompe solaire. Elle est conçue pour fonctionner efficacement dans des conditions de faible luminosité, à tension réduite, sans calage (lorsque la pompe s'arrête, généralement à cause d'une surcharge) ou sur-chauffage. Certaines pompes solaires sont entièrement submersibles, tandis que d'autres ne le sont pas. La plupart des pompes à eau solaires sont conçues pour utiliser l'énergie solaire le plus efficacement possible.

##### 3.1.1. Choix de la pompe :

Le choix du type de la pompe à utiliser doit répondre aux spécifications mentionnées dans le cahier des charges. En fait, Le type de la pompe à installer dépend de la hauteur de la source d'eau et des besoins quotidiens en eau. La figure 47 présente les types des pompes et leurs plages de fonctionnement en rapport avec la hauteur de la source d'eau et les besoins quotidiens en eau.

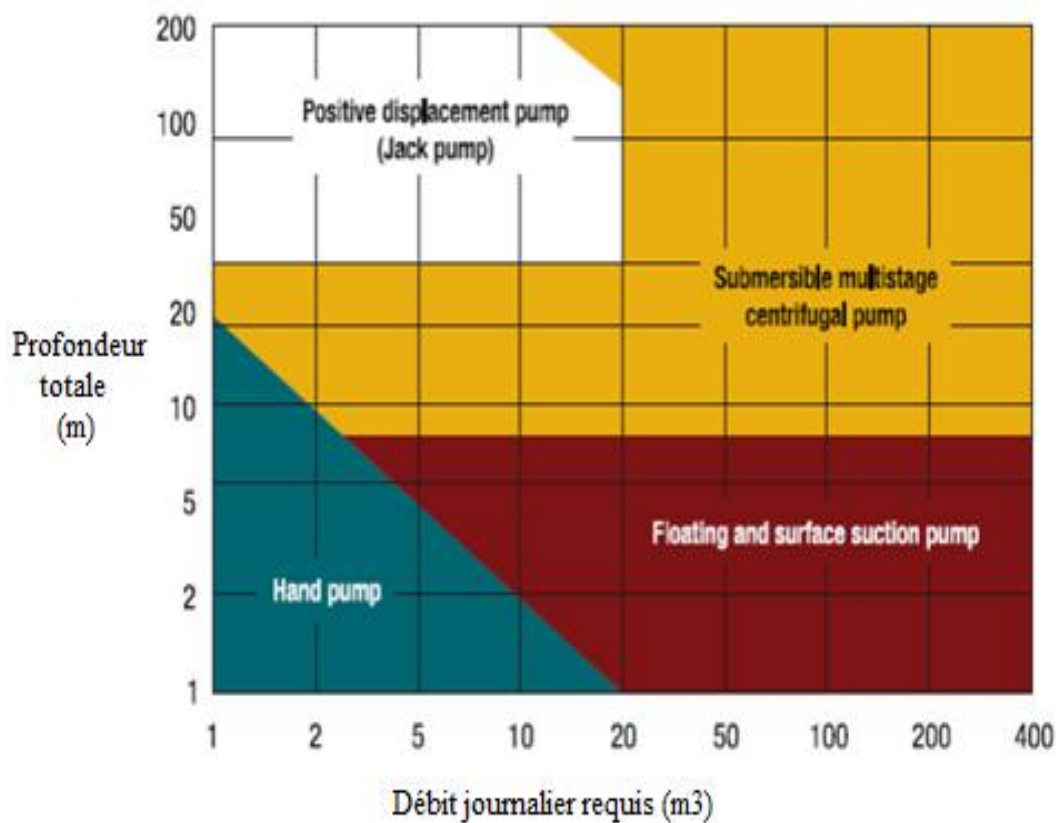


Figure 47: Les types des pompes et leurs plages de fonctionnement en rapport avec la hauteur de la source d'eau et les besoins quotidiens en eau.

En se basant sur la figure 47 ci-dessus, pour un débit journalier égal à 25 m<sup>3</sup>/j et une hauteur totale égale à 65 m, la pompe centrifuge est le choix optimal. Ce type de pompe se caractérise par un couple de démarrage et un coût faibles. Elle peut tourner pour des éclairages très faibles et accepte une vitesse de rotation variable, ce qui le rend très approprié pour un système de pompage photovoltaïque.

### 3.1.2. Dimensionnement de la pompe :

Pour calculer la puissance électrique requise par le moteur, il faut tout d'abord calculer la puissance hydraulique correspondante au débit horaire nécessaire en se basant sur l'équation (10) [34] [35].

$$E_h = C_h * Q_h * H_t \quad (10)$$

C<sub>h</sub>: la constante hydraulique (C<sub>h</sub>=2.725 Kg.s.h/m<sup>2</sup>)

Q<sub>h</sub>: le débit horaire

H<sub>t</sub>: la hauteur totale

Comme déjà mentionné dans la première partie de ce chapitre, le débit horaire est égal à 3.5 m<sup>3</sup>/h et la hauteur totale est égale à 65 m. L'application numérique donne une puissance hydraulique égale à 620 W. À partir de la valeur de la puissance hydraulique, on peut calculer la puissance électrique en utilisant l'équation (11) [36].

$$P_e = \frac{E_h}{\eta_{mp}} \quad (11)$$

$\eta_{mp}$  : le rendement du moteur et de la pompe

La plupart des pompes hydrauliques ont un rendement qui varie entre 45% et 65% [36] et la plupart des moteurs ont un rendement allant de 75% à 85%. Ainsi, le groupe moteur-pompe a un rendement qui varie entre 54% à 75%. Pour une valeur de rendement égale à 58%, la puissance électrique égale à 1069 W.

La relation entre le couple de la charge T et la vitesse de rotation du rotor  $\omega_r$  est une équation parabolique non linéaire [37] :

$$T = K * \omega_r^2 \quad (12)$$

K : constante de la pompe

La puissance mécanique du moteur est donnée par :

$$P_m = T * \omega_r \quad (13)$$

$$K = P_m / \omega_r^3 \quad (14)$$

### 3.2. Le moteur :

Comme mentionné auparavant, la pompe à eau est entraînée par un moteur asynchrone triphasé de type cage d'écureuil. Son faible coût et sa construction rugueuse le rendent le plus utilisé pour les applications PV. Il convertit l'énergie électrique reçue par le générateur PV en énergie mécanique pour entraîner la pompe. Les caractéristiques du moteur utilisé sont données par le tableau ci-dessous :

Puissance	1100 W
Vitesse	2830 tr/min
Fréquence	50 hz
Tension	230 V

Tableau 1 : Caractéristiques du moteur asynchrone

### 3.3. L'onduleur :

La conversion continue alternative est assurée par un onduleur de type pont H triphasé. Il est formé de six interrupteurs, deux interrupteurs en série par branche, chaque interrupteur est branché en antiparallèle avec une diode, sa structure est donnée sur la figure 48.

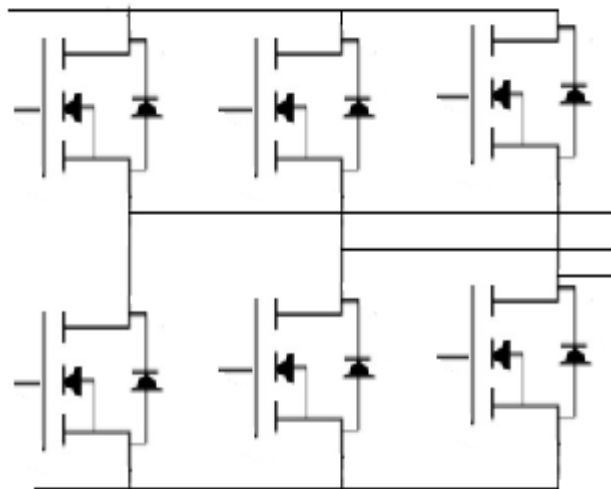


Figure 48 : Onduleur pont H triphasé

La commutation des commutateurs fait référence à l'inversion de la tension de sortie de l'onduleur entre le rail continu positif et négatif. Il en résulte un signal de tension alternative d'amplitude et de fréquence variable à partir d'une entrée continue. Chacune des trois jambes de l'onduleur produit une sortie décalée de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre. La sortie de chaque jambe dépend de l'état du commutateur et de la tension d'entrée. Les deux commutateurs de la même branche sont complémentaires.

Les commutateurs d'une jambe de l'onduleur ne peuvent pas être activés ou désactivés simultanément. Activer les commutateurs de même jambe entraînera un court-circuit à travers l'alimentation en tension de la liaison DC. Désactiver les commutateurs de même jambe entraînera des tensions qui dépendront de la polarité du courant de ligne.

La structure choisie se base sur le transistor MOSFET. C'est un interrupteur qui convient au fonctionnement à faible et moyenne puissance avec une fréquence de commutation élevée. En outre, le transistor MOSFET présente des pertes plus faibles lors d'une commutation rapide. Le dimensionnement des commutateurs MOSFET a été effectué en fonction des calibres de tension et du courant. En fait, les semi-conducteurs des onduleurs à deux niveaux maintiennent toute la tension du bus DC, ce qui est le cas de notre système. Cela nécessite un interrupteur supportant une valeur de tension égale à la tension du bus DC 240V et une valeur de courant égale au courant nominal de la phase 5 A. Pour surmonter les surtensions et les surintensités, les calibres du courant et de tension doivent être doublés à 480 V / 10 A. Par conséquent, nos MOSFETS doivent prendre en charge une source de tension de drain égale à 480V et un courant  $I_d$  égal à 10 A.

L'onduleur est commandé par la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale MLIS. Cette technique permet de se rapprocher du signal sinusoïdal, de faire varier la valeur fondamentale de la tension de sortie et d'éloigner les harmoniques de tension de sortie à des fréquences plus élevées. Son principe consiste à comparer une onde de référence sinusoïdale avec une onde porteuse triangulaire haute fréquence. Cela se réfère à la comparaison instantanée de l'amplitude du signal sinusoïdal avec celle du signal triangulaire à un moment donné. Si l'amplitude du signal triangulaire est inférieure à celle du signal sinusoïdal, la charge sera connectée au côté positif du rail DC, sinon la charge sera connectée au côté négatif du rail DC. Il en résulte plusieurs impulsions de largeur différente par demi-cycle. La fréquence de commutation du signal résultant est celle du signal triangulaire. La fréquence fondamentale du signal de sortie est la même que celle de l'onde sinusoïdale. Un filtre LC est branché à la sortie de l'onduleur. Il permet d'éliminer les harmoniques et de produire un signal sinusoïdal d'ondulations réduites [38]. L'inductance du filtre est liée à la capacité et à la fréquence de coupure par l'équation suivante :

$$LC=2\pi \quad (15)$$

### 3.4. Le hacheur élévateur :

Le hacheur élévateur est introduit dans le système afin de remplir plusieurs fonctions. C'est un dispositif qui délivre une tension de sortie supérieure à celle appliquée à son entrée. Ceci permet d'optimiser le dimensionnement du système en diminuant le nombre des modules solaires mis en série (la valeur de la tension des modules photovoltaïques est faible). De plus, le générateur photovoltaïque dispose des caractéristiques V/P variables en fonction de l'irradiation ou/et la température comme déjà noté dans le chapitre précédent. Le hacheur élévateur commandé par un programme MPPT permet la recherche du point de puissance maximale et le contrôle du générateur PV pour y fonctionner. Le circuit du hacheur élévateur et son principe de fonctionnement sont donnés dans le chapitre 2.

En se basant sur les équations de dimensionnement du hacheur élévateur du chapitre 3. Le rapport cyclique  $D=0.6$ . La valeur de l'inductance  $L=10\text{mH}$  et la valeur de la conductance est  $C=13\text{mF}$ .

Afin d'ajuster la tension du générateur solaire à la valeur optimale, le signal de commande de la commutation du Mosfet est généré par le programme de suivi du point de puissance maximale « perturbations et d'observations ». C'est un contrôle qui permet à chaque changement climatique de chercher la puissance maximale qui correspond aux valeurs de l'irradiation et de la température et contrôler le système pour y fonctionner.

Le programme MPPT a été implémenté sous 'matlab function block'. Le programme MPPT a été testé sous rayonnement et température variable.

### 3.5. Le générateur photovoltaïque :

La puissance crête du générateur PV dépend de plusieurs facteurs. A savoir, la puissance nominale  $P_n$  du groupe motopompe, le nombre d'heures de fonctionnement  $N_h$ , l'irradiation journalière  $E_{irr}$  utilisée pour la conception, le facteur de perte  $f_p$  du générateur PV et le rendement  $\eta_{ond}$  de l'onduleur sélectionné.

La puissance crête  $P_{cc}$  du générateur PV est donnée par la relation ci-dessous [39], [40]:



$$P_{cc} = \frac{P_n * N_h * P_i}{E_{irr} * f_p * \eta_{ond}} \quad (16)$$

Aujourd'hui les onduleurs atteignent un rendement supérieur à 98%, pour notre cas on considère un rendement égal à 95%. Le facteur de perte  $f_p$  est dû à la température, à la poussière, aux câbles de connexion et à l'orientation. Ce facteur est bien choisi égal à 87%. Le nombre d'heures de fonctionnement  $N_h$  du système de pompage est d'environ 7 heures. Le pire mois de la saison estivale est le mois d'août. En ce mois, le rayonnement  $E_{irr}$  est estimé à  $776 \text{Wh} / \text{m}^2 / \text{j}$ .  $P_i$  est la puissance d'éclairage dans les conditions de test standard, sa valeur est de  $1000 \text{W} / \text{m}^2$  [40]. La puissance de crête du générateur PV à prendre en compte dans ce projet est  $P_{cc} = 1.2 \text{ kW}$ .

Le générateur photovoltaïque dimensionné doit couvrir la puissance nécessaire au fonctionnement du moteur asynchrone dans toutes les conditions climatiques. À cette fin, le dimensionnement a été établi sur la base de la température critique et des conditions d'irradiation réelles de la région de Béni-Mellal [40]. Cette dernière se caractérise par un climat souvent chaud en été. Moins chers et supportent des températures élevées, les modules photovoltaïques poly-cristallins sont le type le plus approprié à installer.

Le générateur photovoltaïque utilisé contient 6 modules. Trois modules connectés en série constituent une chaîne. La combinaison de 2 chaînes en parallèle forme la structure du générateur PV a installé. Le raccordement des modules solaires est donné par la figure 49.

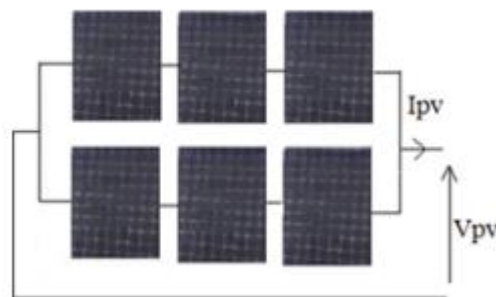


Figure 49: Branchement des modules photovoltaïques

Chaque module a une puissance maximale de 204,9 W qui correspond à une valeur de tension de 30 V et une valeur de courant de 6,83 A. Les caractéristiques du module utilisé sont données par le tableau 2.

Puissance maximale	204.9W
Tension de circuit ouvert Voc	36.4V
Tension en point de puissance maximale Vmp	30V
Coefficient de température en Voc	-0.3364 %/deg.C
Cellules par modules	60
Courant de court-circuit Isc	8.03A
Courant en point de puissance maximale Imp	6.83A
Coefficient de température en Isc	0.038468 %/deg.C

Tableau 2 : Les caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques du générateur PV utilisé sont données par le tableau 3.

Puissance maximale	1230W
Tension de circuit ouvert Voc	109V
Tension en point de puissance maximale Vmp	90V
Courant de court circuit Isc	16.06A
Courant en point de puissance maximale Imp	13.66A

Tableau 3 : Spécifications du générateur PV

#### 4. Simulations de la chaîne de pompage adoptée

Le système de pompage PV adopté a été simulé sous le logiciel Matlab Simulink. Le schéma du système est donné par la figure 50 :

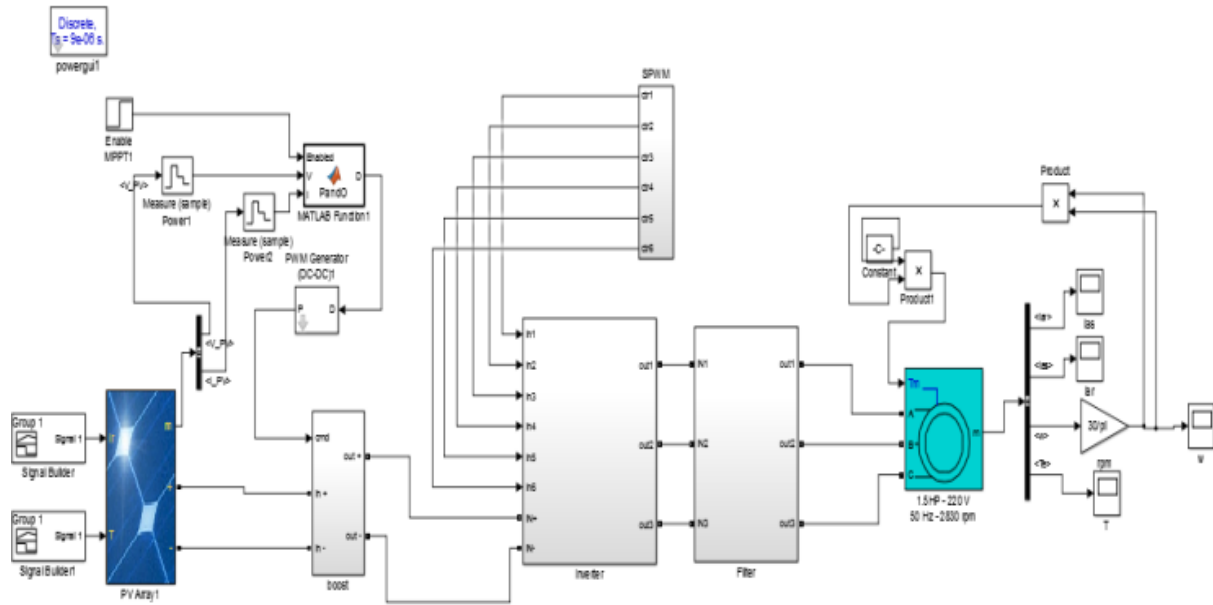


Figure 50 : Le système de pompage adopté

La chaîne de pompage dimensionnée a été testée par simulation en appliquant une variation de l'irradiation et de la température à l'entrée du générateur solaire. La variation du rayonnement est donnée par la figure 51. La variation de température est donnée par la figure 52. Le modèle du moteur à induction utilisé est donné par Simulink. Les paramètres du moteur utilisés pour simuler la chaîne de pompage sont pris à partir d'un moteur réel de la puissance requise.

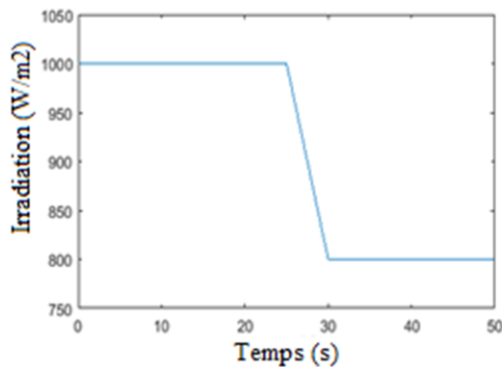


Figure 51 : Variation de l'irradiation

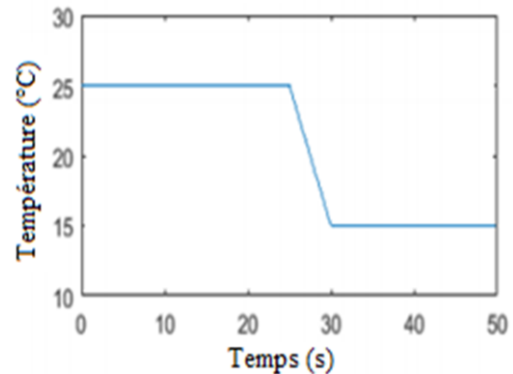


Figure 52 : Variation de la température

La courbe de l'irradiation commence par la valeur  $100\text{W/m}^2$ . A l'instant  $t=25\text{s}$ , l'irradiation chute. La courbe arrive à la valeur  $800\text{W/m}^2$  à l'instant  $t=30\text{s}$ . Cette valeur est gardée le reste du temps de la simulation.

La courbe de la température commence par la valeur  $25^\circ\text{C}$ . A l'instant  $t=25\text{s}$ , la température chute. La courbe arrive à la valeur  $15^\circ\text{C}$  à l'instant  $t=30\text{s}$ . Cette valeur est gardée le reste du temps de la simulation.

Le comportement du générateur PV a été simulé sous les conditions de la température et de l'irradiation appliquées au système. Le circuit de la simulation du générateur est donné par la figure 53.

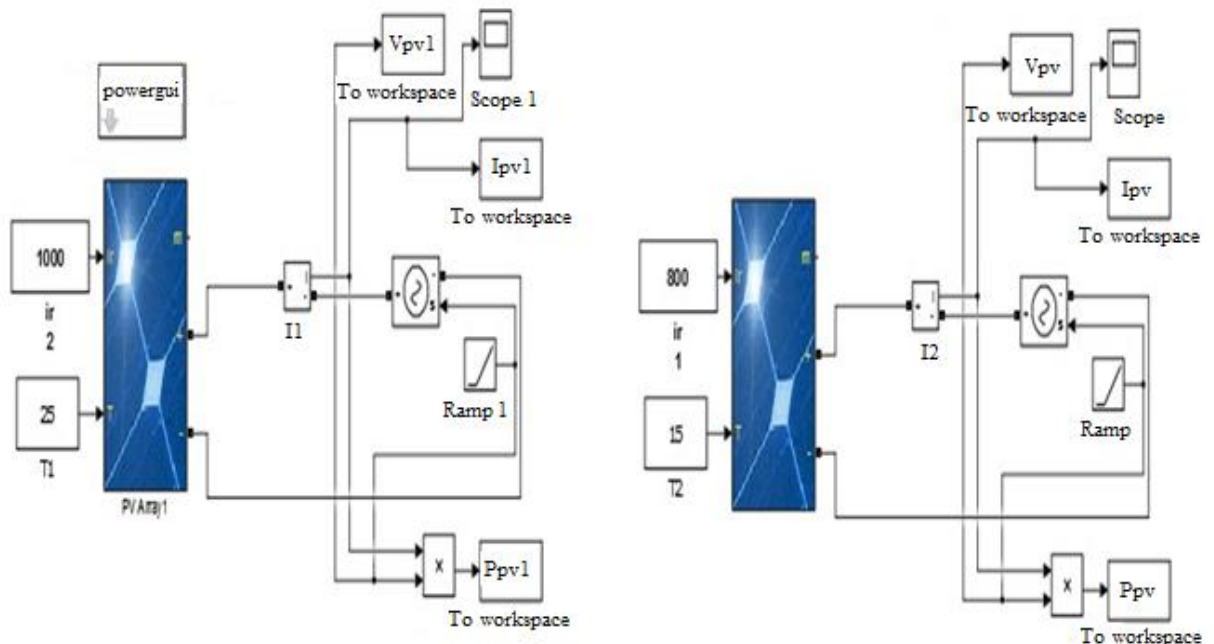


Figure 53 : Schéma de la simulation du comportement du générateur PV

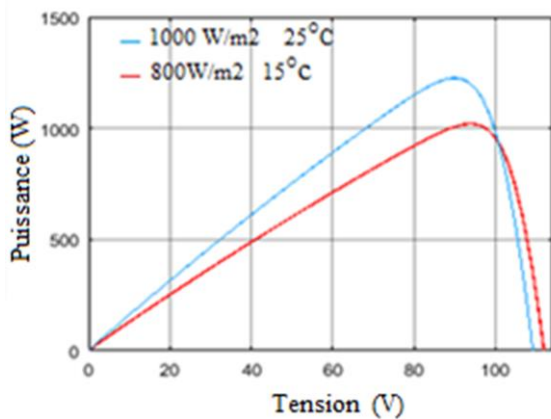


Figure 54 : Caractéristiques P/V du générateur PV choisi

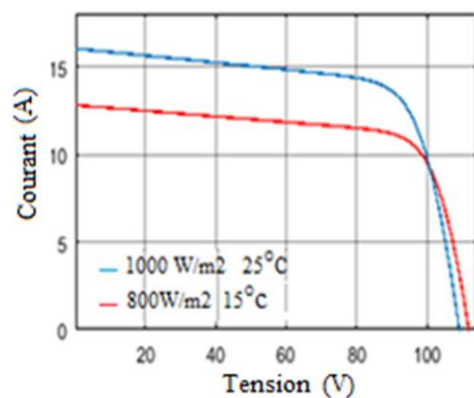


Figure 55 : Caractéristiques I/V du générateur PV choisi

Les courbes P-V et V-I du générateur PV résultantes sont données par les figures 54 et 55 respectivement. Le générateur photovoltaïque utilisé présente une puissance maximale de 1,2KW sous  $1000\text{W/m}^2$  et  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . La chute de l'irradiation et de la température entraîne une dégradation de la puissance du générateur à la valeur 1KW.

Pour un rayonnement de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , le générateur PV peut fournir une tension maximale de valeurs  $90,652\text{V}$  et un courant maximal de valeur  $13,5\text{A}$ . Alors que pour une température de  $15\text{ }^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $800\text{W/m}^2$ , la tension et le courant maximaux du générateur PV sont de  $94\text{V}$  et  $10,86\text{A}$  respectivement.

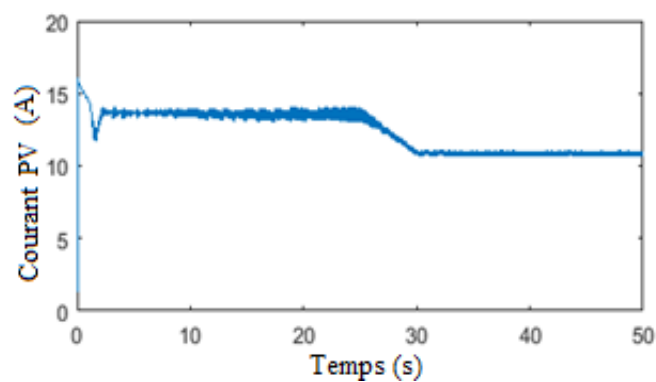


Figure 56 : Courant de sortie du générateur PV

Le courant de sortie du générateur PV est donné par la figure 56, Il atteint la valeur maximale correspondante au rayonnement  $1000\text{W/m}^2$  et à la température  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . La variation du rayonnement et de la température impose la variation de la courbe de courant. Le programme de suivi du point de puissance maximale contrôle le courant pour atteindre la nouvelle valeur maximale correspondante aux nouvelles conditions météorologiques.

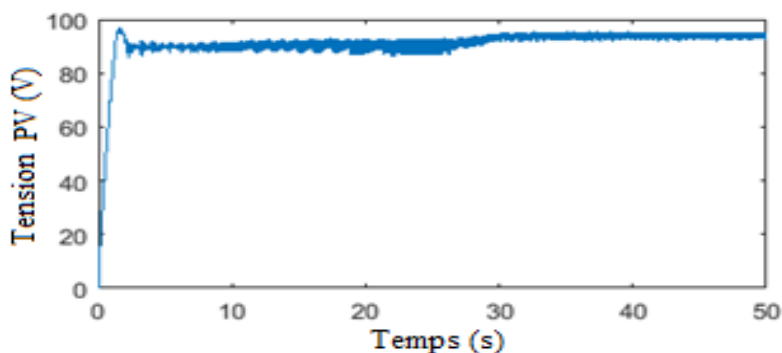


Figure 57 : Tension de sortie du générateur PV

La tension de sortie du générateur PV est donnée par la figure 57. Il varie avec la variation de l'irradiation et de la température pour atteindre la valeur maximale. La commande de suivi du point de puissance maximale régule également la tension à la  $V_{MPP}$  correspondante.

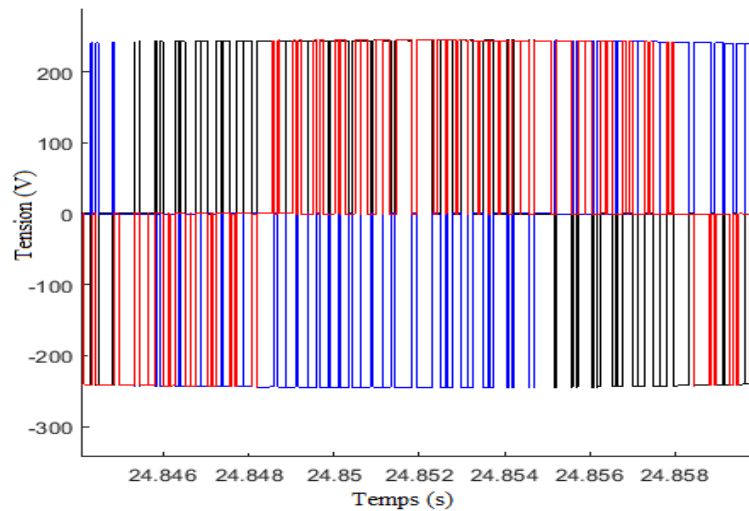


Figure 58 : Tensions de sortie de l'onduleur

Le signal de sortie de l'onduleur est donné par la figure 58. Il alterne entre les valeurs 240 V et -240 V.

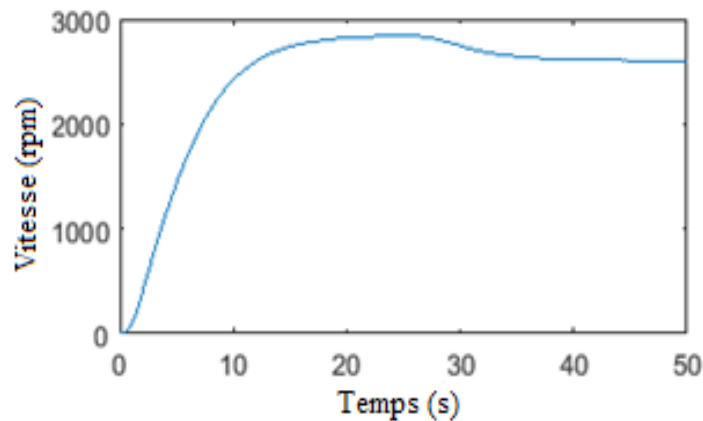


Figure 59: Vitesse du moteur asynchrone

La courbe de vitesse du moteur est donnée par la figure 59. Le moteur atteint la vitesse nominale dans le cas où les valeurs de l'irradiation et de la température sont optimales. La variation du rayonnement et de la température cause la chute de la vitesse du moteur de la valeur nominale.

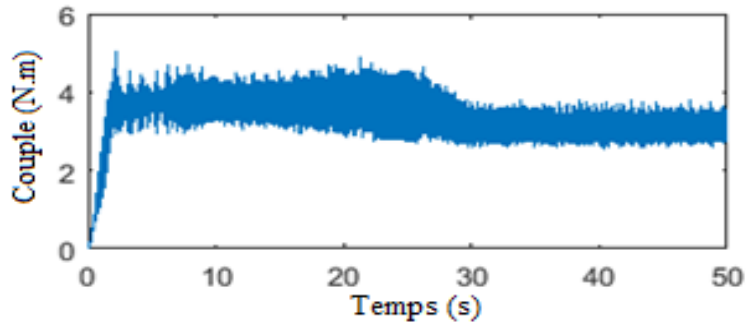


Figure 60 : Couple du moteur asynchrone

La courbe du couple est donnée par la figure 60. Pour les valeurs de l'irradiation et de température optimales le couple atteint sa valeur nominale. Le changement de rayonnement affecte le couple qui chute de sa valeur nominale.

Les résultats de la simulation montrent que la tension et le courant de sortie du générateur PV convergent vers les valeurs qui correspondent à la puissance maximale et se stabilisent à ces valeurs pour le reste du temps de la simulation. La vitesse et le couple du moteur atteignent les valeurs nominales pour les valeurs de l'irradiation et de la température optimales. Les changements météorologiques entraînent la dégradation de la vitesse et du couple du moteur.

### 5. Régulation de la vitesse du moteur asynchrone

L'objectif de cette partie est d'optimiser le fonctionnement du système de pompage dimensionné et simulé dans la partie précédente par le contrôle de la vitesse du moteur asynchrone. L'idée est de calculer la vitesse maximale correspondante à la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque à chaque changement climatique, et de contrôler le moteur pour y fonctionner. Le contrôle de la vitesse du moteur va être réalisé par la régulation de la fréquence de l'alimentation du moteur à partir d'un régulateur PI.

La puissance utile du moteur asynchrone est liée à la vitesse angulaire par la relation :

$$P_u = T_u \cdot \Omega \quad (17)$$

$$\Omega = (2 \cdot \pi \cdot n) / 60 \quad (18)$$

$$T_u = K \cdot n^2 \quad (19)$$

En remplaçant la vitesse angulaire et le couple utile par leurs expressions, on aboutit à l'expression de la vitesse de rotation.

$$n = [(P_u * 60) / (2 * \pi * K)]^{1/3} \quad (20)$$

$$P_u = \eta * P_{pv} \quad (21)$$

L'expression utilisée pour le calcul de la vitesse de référence à partir de la puissance maximale du générateur PV est donnée par l'équation ci-dessous.

$$n = [(\eta * P_{pv} * 60) / (2 * \pi * K)]^{1/3} \quad (22)$$

Le contrôle de la fréquence de la tension d'alimentation du moteur asynchrone se fait par le biais d'un régulateur PI. Ce dernier génère la valeur correspondante de la fréquence à la fonction sinus de la commande MLIS en se basant sur la comparaison entre la vitesse du moteur est celle de référence. Le calcul de la vitesse de référence se fait par le biais d'un code programmé sous un bloc de fonction Matlab. Le circuit du système élaboré est donné par la figure 61.

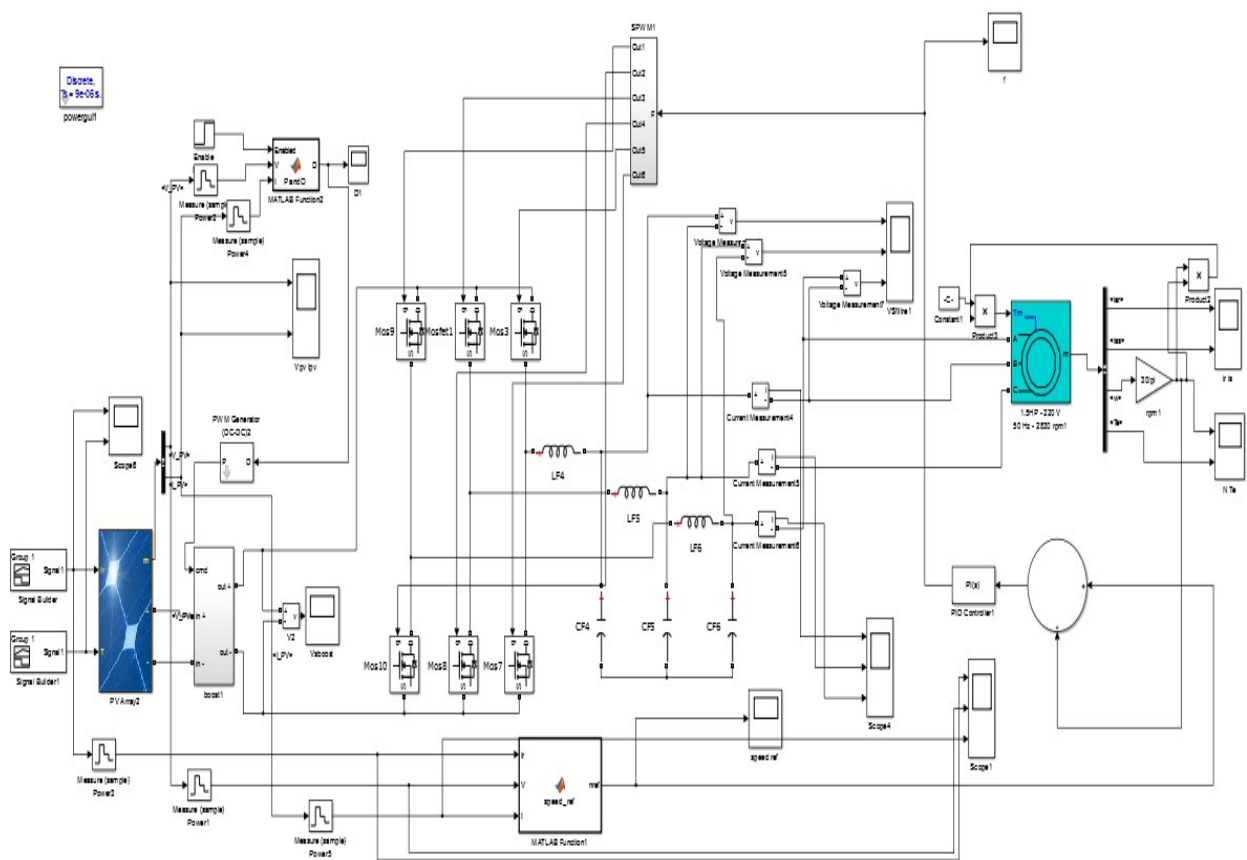


Figure 61 : Circuit de régulation du système de pompage



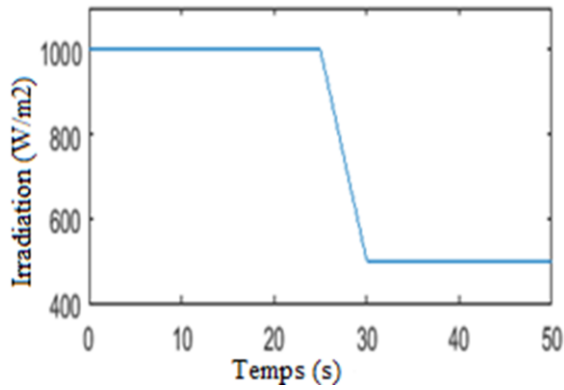


Figure 62 : La variation de l'irradiation appliquée à l'entrée du générateur PV

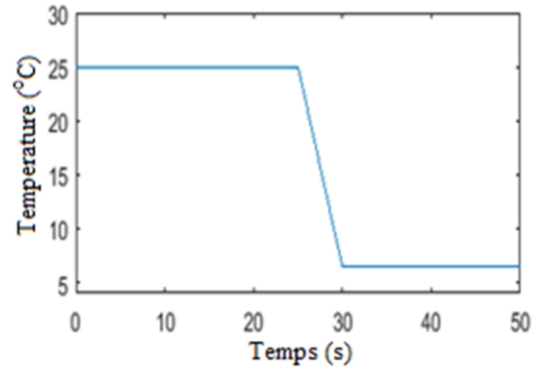


Figure 63 : La variation de la température appliquée à l'entrée du générateur PV

Le système régulé a été simulé en appliquant une variation de l'irradiation et de la température à l'entrée du panneau solaire. La variation de rayonnement est donnée par la figure 62. La variation de température est donnée par la figure 63.

La courbe de l'irradiation commence par la valeur de  $1000\text{W/m}^2$ . A l'instant  $t=25\text{s}$ , le changement est appliqué. La courbe arrive à la valeur  $500\text{W/m}^2$  à l'instant  $t=30\text{s}$ . La courbe de température commence avec une valeur de  $25\text{ °C}$ . A l'instant  $t=25\text{s}$ , le changement est appliqué. La courbe diminue à la valeur  $6,4\text{ °C}$  à l'instant  $t=30\text{s}$ . Les courbes P-V et V-I résultantes du générateur photovoltaïque sont données par les figures 64 et 65.

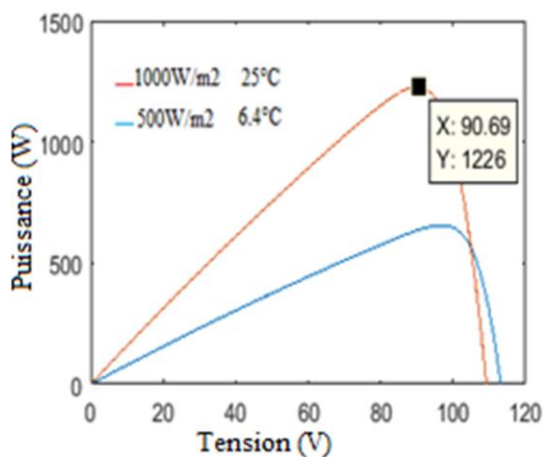


Figure 64 : Caractéristiques P/V du générateur PV sous la variation de l'irradiation et de la température

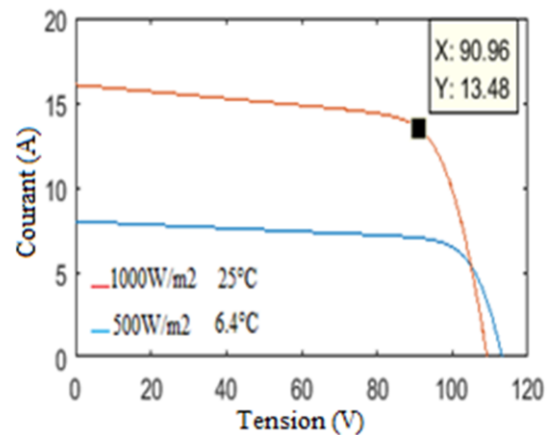


Figure 65 : Caractéristiques I/V du générateur PV sous la variation de l'irradiation et de la température

Le générateur photovoltaïque utilisé présente une puissance maximale de 1,2KW sous  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Une diminution de l'irradiation et de la température entraîne une dégradation de la puissance à  $643,3\text{W}$ .

Le courant et la tension maximale qui peuvent être fournis par le générateur PV pour un rayonnement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et une température de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  sont de  $13,5\text{A}$  et  $90,652\text{V}$  respectivement. Alors que les valeurs maximales de la tension et du courant sous  $6,4\text{ }^\circ\text{C}$  et  $500\text{W}/\text{m}^2$  sont de  $90,92\text{V}$  et  $7\text{A}$  respectivement.

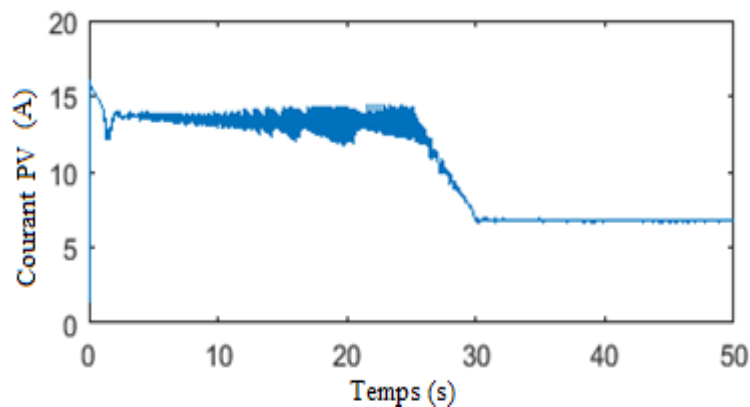


Figure 66 : Courant de sortie du générateur PV

Le courant de sortie du générateur PV est donné sur la figure 66. Il atteint la valeur maximale correspondante au rayonnement  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et à la température  $25\text{ }^\circ\text{C}$  au début de la simulation. La variation du rayonnement solaire et de la température impose la variation de la courbe du courant. Le programme de suivi du point de puissance maximale contrôle le courant pour atteindre la nouvelle valeur maximale correspondante au rayonnement  $500\text{W}/\text{m}^2$  et à la température  $6,4\text{ }^\circ\text{C}$ .

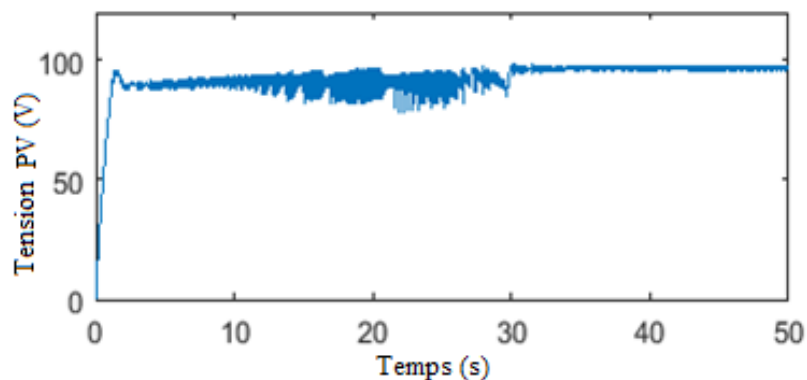


Figure 67 : Tension de sortie du générateur PV

La tension de sortie du générateur PV est donnée par la figure 67. Elle varie avec la variation de l'irradiation et de la température. Le programme de suivi du point de puissance maximale contrôle également la tension pour tendre vers la valeur maximale correspondante à  $V_{MPP}$ .

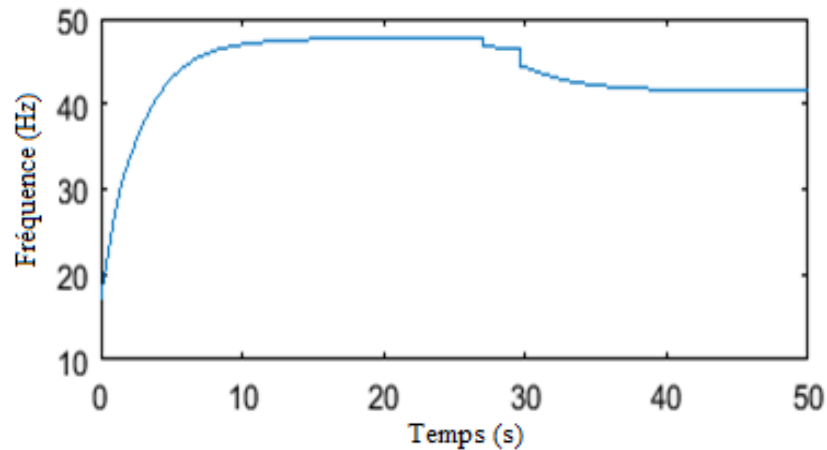


Figure 68 : La fréquence du signal de sortie de l'onduleur avec régulation PI

La fréquence générée par le régulateur PI est donnée sur la figure 68. Il génère une fréquence égale à 47,7 Hz à la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale au début de la simulation. La variation des valeurs d'irradiation et de température cause le changement du signal de commande généré par le régulateur PI. La valeur de la fréquence générée est égale à 41,61 Hz.

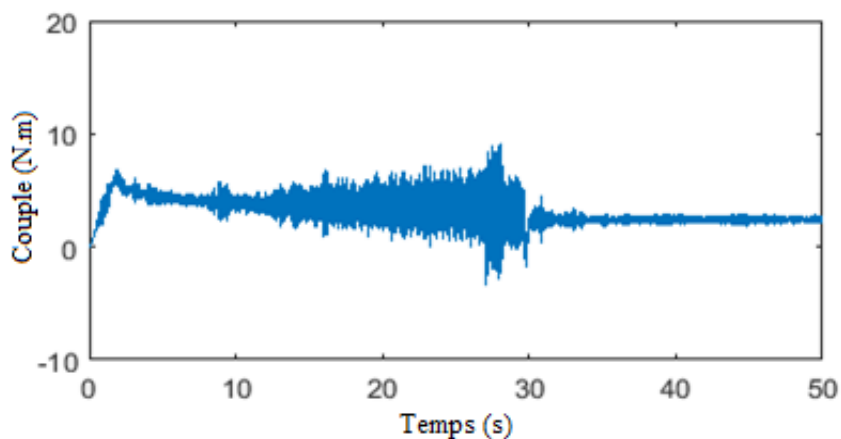


Figure 69 : Courbe du couple du moteur asynchrone

La courbe du couple est donnée sur la figure 69. Elle oscille autour de la valeur nominale lorsque les valeurs de l'irradiation et de la température sont optimales. Le

changement du rayonnement et de la température affecte le couple qui chute vers une valeur plus faible.

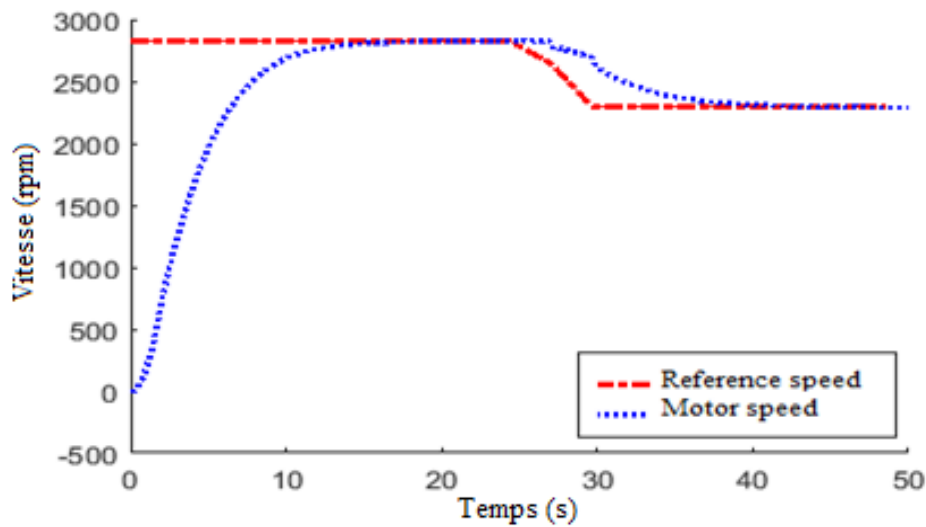


Figure 70 : La courbe de la vitesse du moteur asynchrone et la courbe de la vitesse de référence

D'après la figure 70, la vitesse du moteur suit la vitesse de la référence même en présence de la variation de l'irradiation et de la température.

## 6. Conclusion :

Ce chapitre a présenté le choix des composants de la chaîne de pompage, le dimensionnement de tous les étages de la chaîne, la simulation du système avec un programme de recherche du point de puissance maximale et une optimisation par régulation de vitesse du moteur. D'après les résultats de la simulation, le système fonctionne au point de puissance maximale. Une dégradation de l'irradiation et de la température affecte le fonctionnement du moteur, sa vitesse de rotation et son couple diminuent. La régulation de la vitesse appliquée au système optimise le fonctionnement du moteur dont la vitesse de rotation tend vers une valeur plus optimale.

### *Réalisations pratiques*

#### 1. Introduction

Le présent chapitre présentera la mise en œuvre expérimentale de certaines parties du système étudié et simulé dans les chapitres précédents. Il contiendra des tests sur maquettes et des réalisations des circuits de commande, de protection et de suivi de la température des interrupteurs des convertisseurs.

#### 2. Réalisation d'une carte de commande programmable

L'objectif de cette partie est de réaliser un circuit de commande à base de deux microcontrôleurs PIC16F876A. L'un d'eux est dédié à la commande de l'onduleur. Il est programmable à partir de l'ordinateur sans l'utilisation d'un programmeur externe. L'autre permet le suivi de l'évolution de la température aux bornes des MOSFETs, ainsi que la commande MPPT. Il traite la mesure donnée par le capteur de la température et affiche la valeur correspondante par le biais d'un afficheur 7 segments. La carte réalisée permet aussi une connexion entre les deux microcontrôleurs qui peut être utilisée afin de communiquer des données entre eux. La carte réalisée intègre aussi un circuit de protection réalisé par des optocoupleurs qui permettent une isolation entre le circuit de puissance et le circuit de commande. L'amplification des signaux de commande délivrés par la carte a été assurée par l'utilisation des drivers qui permettent une adaptation de niveau de signaux de commande. Le circuit imprimé de la carte de commande réalisée est donné dans l'annexe 5.

La communication entre le pic et le PC a été réalisée par la mise en place d'une communication série entre l'ordinateur et le microcontrôleur. Le protocole de communication utilisé est le RS232. Le microcontrôleur PIC16F876A a un module UART intégré utile pour la communication série. C'est une interface de communication utilisée pour transmettre et recevoir des données. Il est couramment utilisé dans les ports série d'ordinateurs. Les niveaux de tension du protocole RS232 (0 : 3 jusqu'à 25V, 1 : -3 jusqu'à -25V) sont différents de ceux de UART (0 : 0V, 1: 5V). Le convertisseur de niveau MAX232 est mis en place afin de convertir les signaux RX, TX, CTS et RTS du

port série du PC aux niveaux TTL (5 v). La connexion entre l'ordinateur et le microcontrôleur a été assurée par un connecteur DB9 femelle coté microcontrôleur qui va être lié à la partie mâle de l'ordinateur. Le circuit de communication est illustré dans la figure 71.

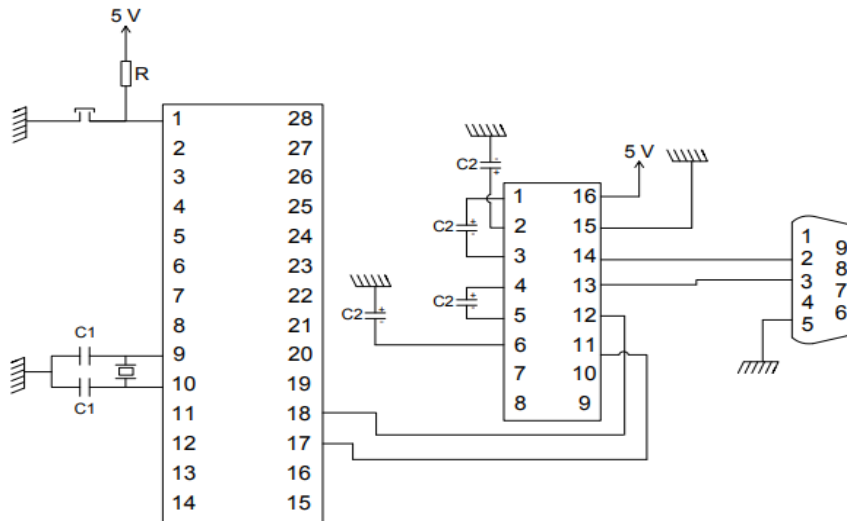


Figure 71 : Circuit de communication pic pc

Les broches RC6/ TX et RC7/RX du microcontrôleur sont respectivement connectées aux broches T1IN et R1OUT du MAX232. De même, les broches T1OUT et R1IN du MAX232 sont connectées aux broches RX et TX du DB9 respectivement.

Programmer le pic à partir de l'ordinateur via la connexion série nécessite le chargement d'un programme Bootloader dans la mémoire du pic et l'installation d'un logiciel de programmation sur PC. Le Bootlaoder est un programme qui doit être chargé dans la mémoire du microcontrôleur avec un programmeur externe une seule fois. Après, le pic démarre sur le Bootloader qui teste la liaison entre le PC et le pic. Si ce dernier est connecté, l'interface de la programmation reçoit un programme utilisateur du PC et l'écrit dans la mémoire programme du pic, puis lance ce programme en exécution. Le logiciel utilisé dans notre cas est le micro C. Le programme Bootloader est donné dans l'annexe.

Test du circuit de communication pic pc :

Afin de tester son fonctionnement, le circuit de communication pic pc a été réalisé sous LABDEC. Il est donné par la figure 72.

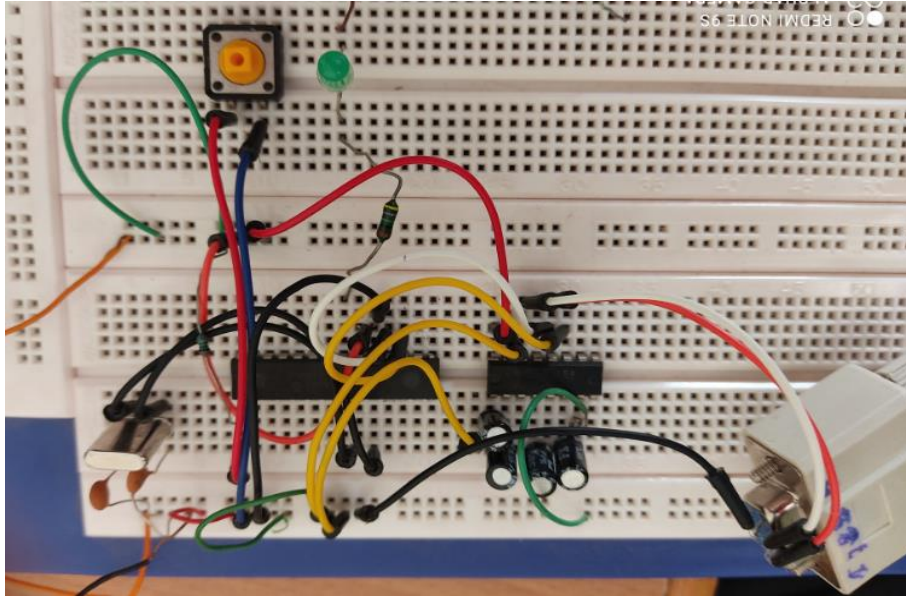


Figure 72 : Réalisation pratique du circuit de communication pic pc

Après avoir alimenté le microcontrôleur et connecté le circuit avec le pc. On lance l'interface MikroBootloader du logiciel Micro afin de charger le programme désiré.

Le circuit qui mesure et affiche la valeur de la température est donné par la figure 73. Il est constitué d'un capteur de température, d'un microcontrôleur pic16f876a et d'un afficheur 7 segments.

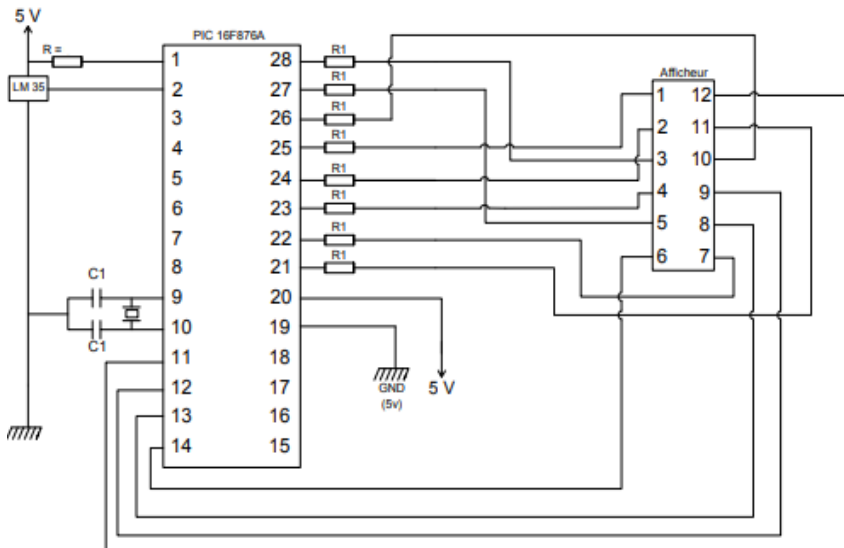


Figure 73: Circuit de mesure et d'affichage de la température

Le capteur de la température utilisé est le LM35. C'est circuit intégré conçu pour une plage de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+150^{\circ}\text{C}$ . Il mesure la valeur de la température et

l'envoi au microcontrôleur. Le capteur Lm35 présente la valeur de la température sous une plage variant de -1V jusqu'à 5V.

Test du circuit d'affichage de la température :

Un test sous LABDEC a été réalisé afin de vérifier le fonctionnement du circuit. L'afficheur 7 segments affiche une température de 21°C comme indique la figure 74.

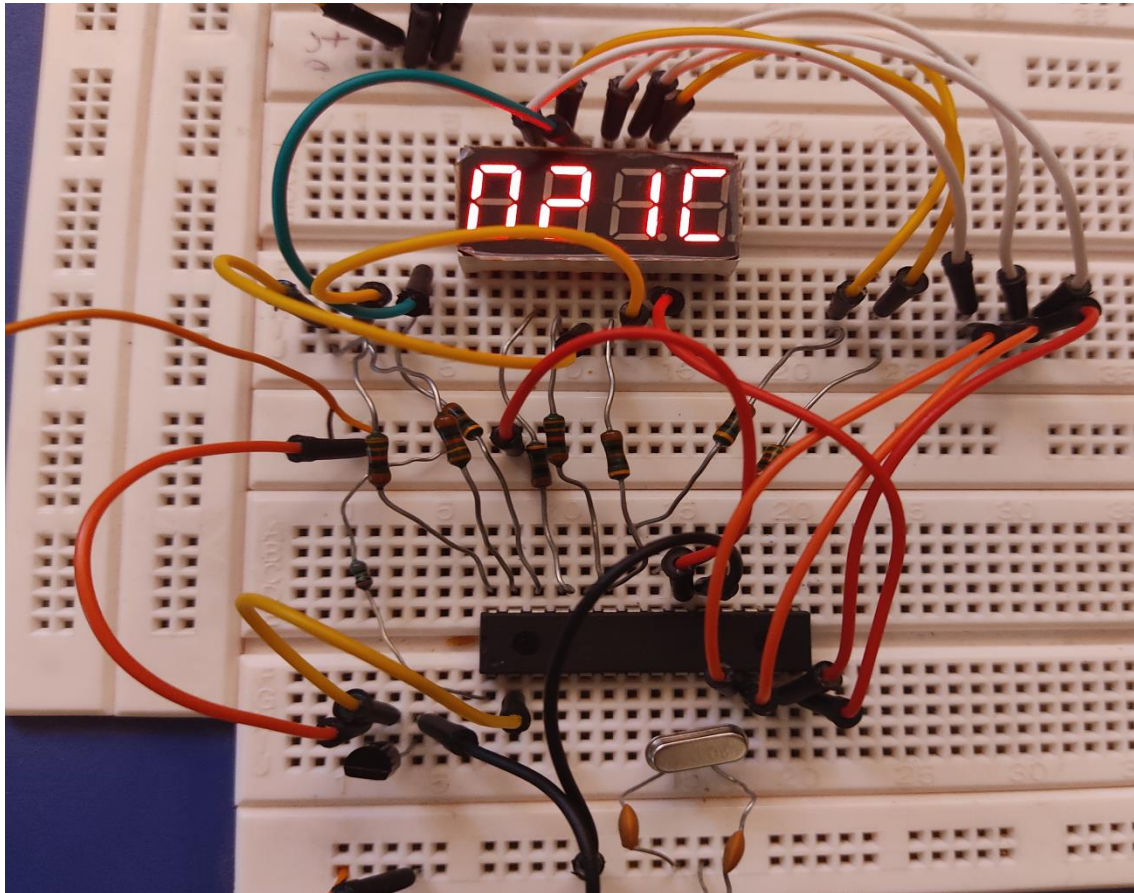


Figure 74 : Réalisation pratique du circuit d'affichage de la température

Une carte de commande nécessite la mise en place d'une isolation entre le circuit de puissance et le circuit de commande. Ceci permet de protéger le circuit de commande. Afin d'achever cet objectif, la carte réalisée contient l'optocoupleur HCPL2631 qui réalise une isolation galvanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance. Ainsi, les signaux de sortie du microcontrôleur sont des impulsions de tension de 0V ou de 5V. Cependant, le courant de sortie de tout microcontrôleur n'est pas suffisant. Afin d'amplifier ces signaux, un driver IR2113 est intégré dans le circuit. L'inverseur



74LS04N a été intégré dans le circuit dans l'objectif est d'avoir deux sorties de commande complémentaires. Le circuit est donné par la figure 75.

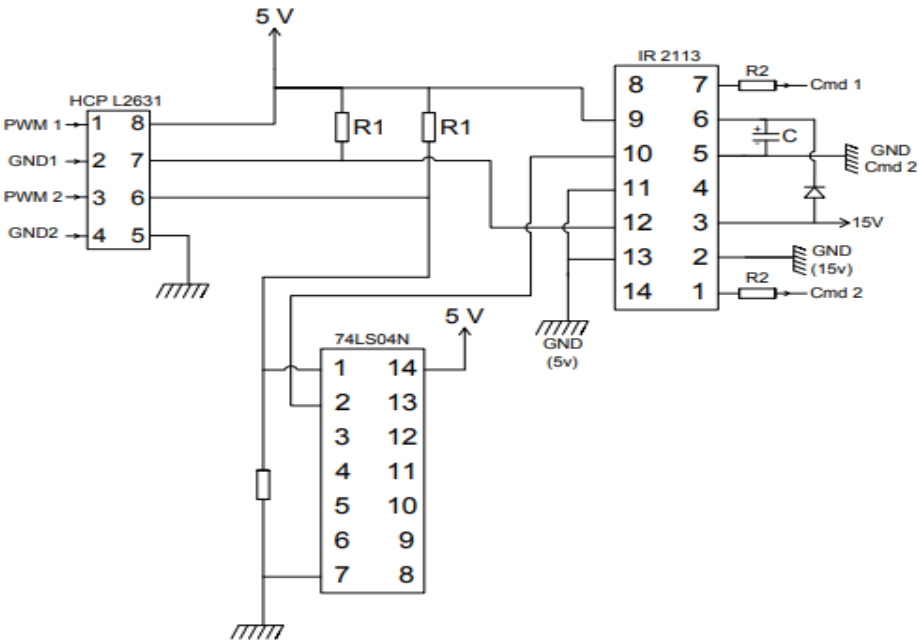


Figure 75 : Circuit de protection et d'amplification

Le circuit d'isolation et d'amplification réalisé est donné par la figure 76:

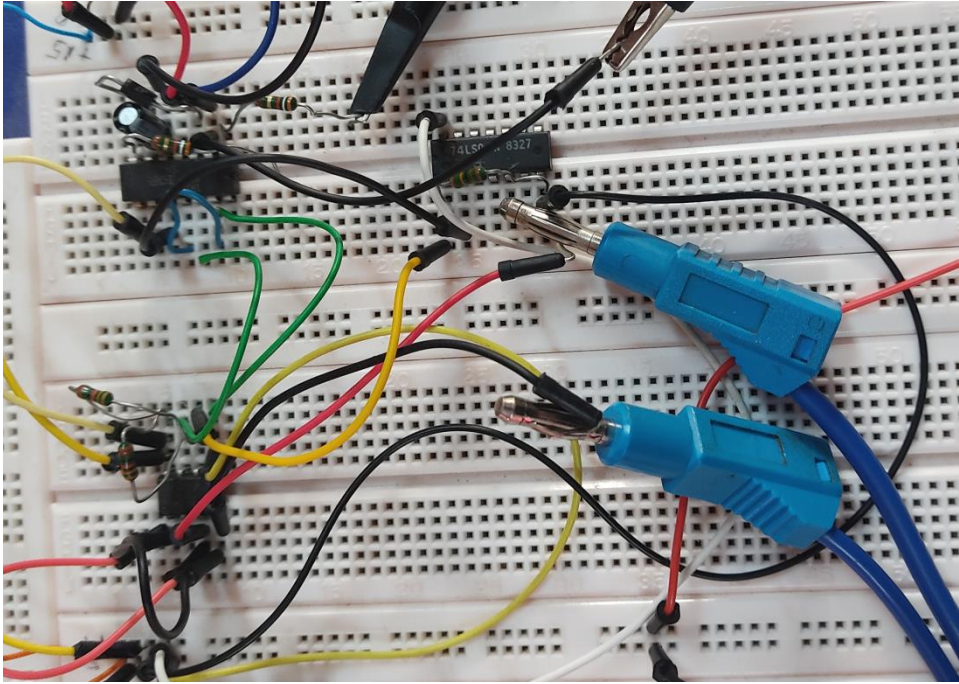


Figure 76 : Réalisation pratique du circuit de protection et d'amplification

Afin de tester le circuit, un signal carré de fréquence 1Khz généré par un générateur d'impulsion a été appliqué aux deux entrées de l'optocoupleur. Il est donné par la figure 77.

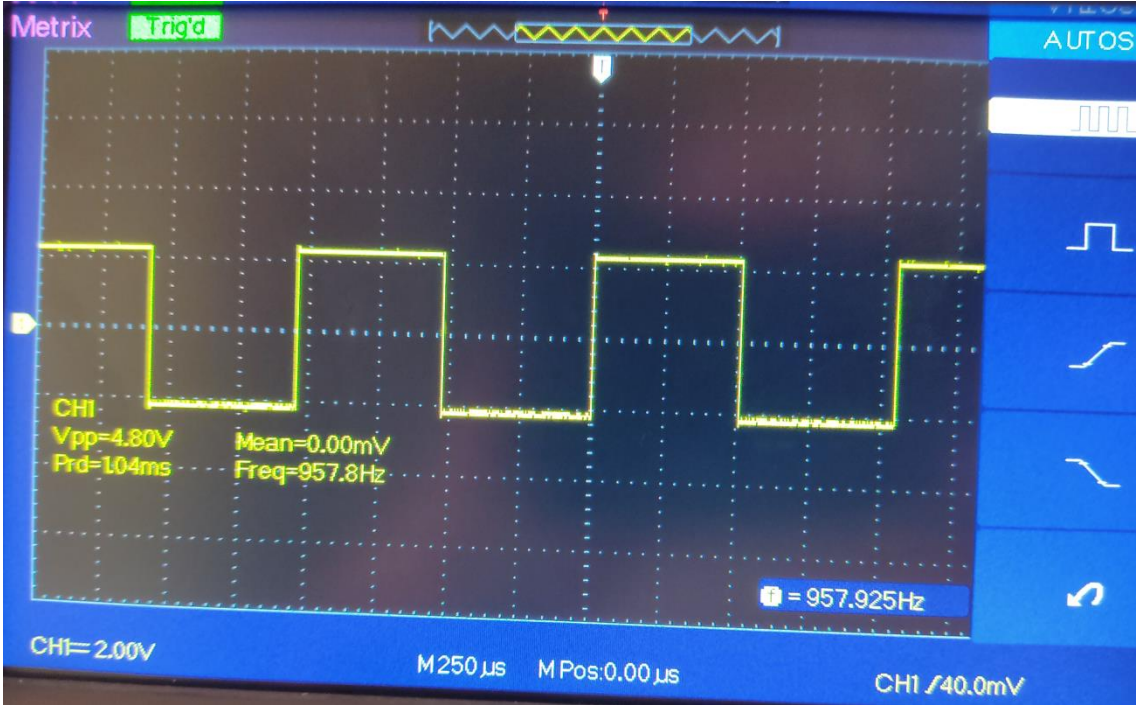


Figure 77 : signal de commande appliqué aux entrées de l'optocoupleur

Les sorties de l'optocoupleur sont données par la figure 78.



Figure 78 : Tensions de commandes générées par l'optocoupleur

A l'entrée du driver l'un des signaux a été inversé. Les deux sont donnés par la figure 79.

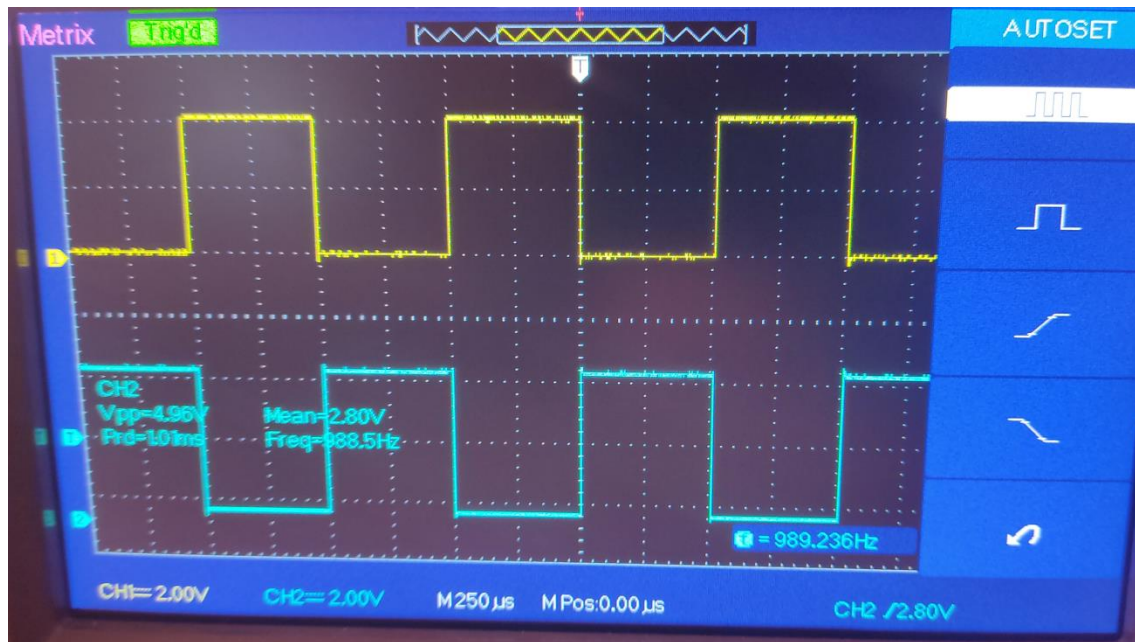


Figure 79 : Tensions d'entrée du driver

Les signaux amplifiés générés par le driver sont donnés par la figure 80.

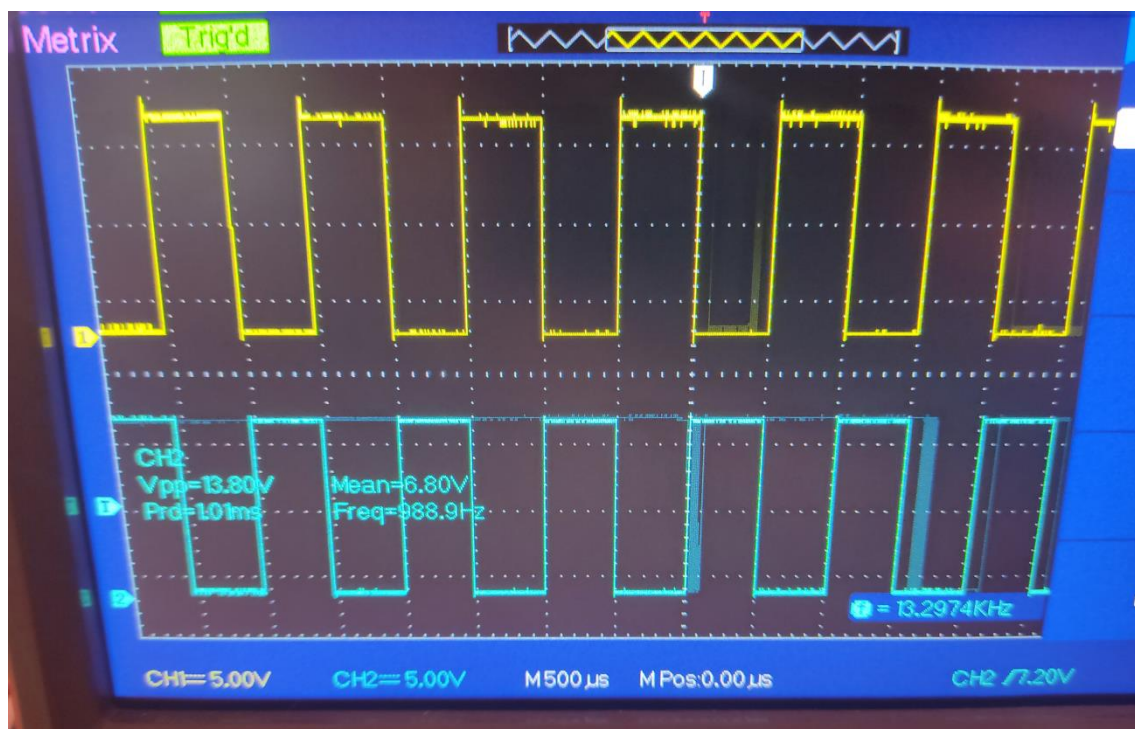


Figure 80 : Signaux de commande amplifiés par le driver

### 3. Conclusion

Ce chapitre a présenté la réalisation pratique et des tests sur maquette de trois circuits électroniques. Le premier permet de programmer le pic par l'intermédiaire d'ordinateur sans l'utilisation d'un programmeur externe. Il est constitué d'un microcontrôleur PIC16F876A, un connecteur DB9 et le MAX232 pour l'adaptation des niveaux des signaux de sortie du microcontrôleur au niveau TTL. Le deuxième permet la mesure de la température et l'affichage de la valeur mesurée. Il est constitué d'un PIC16F876A, un capteur de température LM35 et un afficheur 7 segments. Le troisième circuit permet l'isolation et l'amplification des sorties du microcontrôleur. Il est constitué d'un driver IR2113, un optocoupleur HCPL2631 et un inverseur 74LSO4N. Ceci constitue une réalisation partielle du projet pour la mise en œuvre pratique des commandes et algorithmes proposés.

## Conclusion générale et perspectives

---

Cette thèse a été consacrée à l'étude, la simulation et la réalisation d'une chaîne de production d'électricité à partir de l'énergie solaire par conversion photovoltaïque. Avant d'entamer les systèmes développés pendant les années de recherches, cette dissertation présente une étude de l'énergie solaire reçue par la terre qui prouve que le soleil est une source d'énergie énorme capable d'assurer les besoins de l'humanité en permanence. Elle présente aussi une étude des différentes installations photovoltaïques développées par les chercheurs au cours du temps ainsi qu'une étude des étages de traitement de puissance intégré dans chaque système. A savoir, le générateur photovoltaïque, le convertisseur continu continu, les algorithmes de la recherche du point de puissance maximale, le convertisseur continu-alternatif et les techniques de la modulation de largeur d'impulsion.

La suite de la thèse a été consacrée à la présentation du choix, de dimensionnement et de la simulation sous Matlab-Simulink des différents systèmes élaborés.

Le premier système est dédié à l'alimentation d'une charge résistive triphasée. Il est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un hacheur élévateur, d'un onduleur et d'un filtre LC. Le hacheur a été commandé par l'algorithme de la recherche du point de puissance maximale « perturber et observer » et l'onduleur a été commandé par la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale. Une régulation de la tension de sortie du hacheur a été adoptée en se basant sur le régulateur PI. Les résultats de la simulation prouvent un bon fonctionnement du système.

Le deuxième système est dédié au pompage d'eau. Il est constitué du générateur photovoltaïque, du hacheur élévateur, de l'onduleur, du filtre LC et d'un moteur asynchrone triphasé. Le hacheur est commandé par la MPPT perturber et observer et l'onduleur est commandé par la MLIS. Les résultats de la simulation confirment le bon fonctionnement du système. Les changements météorologiques entraînent la dégradation de la vitesse et du couple du moteur.

Afin de surmonter la dégradation des performances du moteur asynchrone causée par les changements météorologiques, une optimisation par régulation de débit d'eau en fonction de l'éclairement et la température a été intégrée au système élaboré. Les

résultats de la simulation du système avec régulation du débit d'eau prouvent que les performances du système ont été améliorées.

La dernière partie de cette thèse a été consacrée à la réalisation pratique d'une carte de commande de l'onduleur et du hacheur. C'est une carte programmable par ordinateur réalisé à base des microcontrôleurs. Elle contient un circuit de communication entre l'ordinateur et le microcontrôleur, un circuit de protection et d'amplification et un circuit d'affichage pour le suivi de la température au niveau des interrupteurs de puissance.

D'après l'étude menée dans ce travail, on peut conclure que le pompage d'eau photovoltaïque est une alternative efficace pour assurer l'approvisionnement en eau nécessaire. Envisager des étages de traitement d'énergie et des contrôles comme le programme de recherche du point de puissance maximale et la régulation de débit d'eau par le contrôle de la vitesse du moteur permettent d'optimiser le fonctionnement du système.

En perspective, nous désirons nous intéresser à l'amélioration du fonctionnement du système adopté par introduire d'autres types de régulation avec d'autres structures d'onduleurs. Ainsi, nous allons poursuivre les travaux pratiques présentés au dernier chapitre et réaliser les circuits de puissance de la chaîne de pompage adoptée.

## Références

---

- [1] KANNAN, Nadarajah et VAKEESAN, Divagar. Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 62, p. 1092-1105.
- [2] LEWIS, Nathan S. Toward cost-effective solar energy use. *Science*, 2007, vol. 315, no 5813, p. 798-801.
- [3] Géoliens Géographie et FGS
- [4] KADDOUR, Mr MILOUDI, EDDINE, Mr CHAOUCH Djamel, YI, Mr DJILANI KOBIBI, et al. Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau: Contrôle des puissances active et réactive, 2018.
- [5] HAMZA, Gadisa. Design and Analysis of Solar Powered Water Pumping System Using DC to AC Converter For Garbicha Kebele. 2019. Thèse de doctorat. ASTU.
- [6] DEBNATH, Anjan. Design and simulation of battery-less effective water pumping system using new MPPT algorithm. 2018.
- [7] B. H. Fatima Ezzahra. "Investigation of the applications of solar energy to AUI campus". 2017.
- [8] MAMBRINI, Thomas. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. 2014. Thèse de doctorat. Paris 11.
- [9] TANGERINO, Bruno Henrique Boschetti. Power converters control for photovoltaic water pumping system. 2019. Thèse de doctorat.
- [10] SAHARIA, Barnam Jyoti, MANAS, Munish, et SEN, Subir. Comparative study on buck and buck-boost DC-DC converters for MPP tracking for photovoltaic power systems. In : 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT). IEEE, 2016. p. 382-387.
- [11] SHARMA, Himanshu, SHARMA, Madhav, SHARMA, Chetan, et al. Performance analysis of solar powered DC-DC buck converter for energy harvesting IoT nodes. In : 2018 3rd International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH). IEEE, 2018. p. 26-29.
- [12] KIM, Eung-Seok, KIM, Cherl-Jin, et SHIN, Heung-Kyo. Nonlinear state feedback controller design for buck-boost converters. In : 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2018. p. 2418-2422.

- [13] A. Molla. "Design of intelligent and hybrid based mppt controller for photovoltaic water pumping system".2018.
- [14] BIRUK, Larago. Design, Modeling and Simulation of P&O Algorithm with Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic Water Pumping System. 2018. Thèse de doctorat. ASTU.
- [15] BAHARI, Mohammad Iman, TARASSODI, Pouya, NAEINI, Yousef Mazaheri, et al. Modeling and simulation of hill climbing MPPT algorithm for photovoltaic application. In : 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2016. p. 1041-1044.
- [16] BAROI, Sunnie George, DIP, S., et al. Study of different types of inverters and FFT analysis of output of SPWM inverter with change in modulating index and carrier frequency. In : Proc. IJRSI. 2017. p. 22-29.
- [17] AKHIKPEMELO, A., MATSUNDE, P., et EBENSO, F. P. Simulation of Inverter Circuit Using Multism and Proteus. Continental J. Engineering Sciences, 2016, vol. 11, no 2, p. 1-11.
- [18] BUSWIG, Yonis M., AFFAM, Azuka, ALBALAWI, Hani, et al. Development and Modelling of Three Phase Inverter for Harmonic Improvement using Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Control Technique.
- [19] SINGH, Sandeep Kumar, KUMAR, Harish, SINGH, Kamal, et al. A survey and study of different types of PWM techniques used in induction motor drive. International journal of engineering science & advanced technology, 2014, vol. 4, no 1, p. 18-22.
- [20] SHARAF, Farok Y. Designing power inverter with minimum harmonic distortion using fuzzy logic control. 2014.
- [21] DAVE, Mitulkumar R. et DAVE, K. C. Analysis of boost converter using PI control algorithms. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2012, vol. 3, no 2, p. 71-73.
- [22] NAIM, Rami, WEISS, George et BEN-YAAKOV, Shmuel. H/sup/spl infin//control applied to boost power converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, vol. 12, no 4, p. 677-683.
- [23] ALLOUHI, A., BUKER, M. S., EL-HOUARI, H., et al. PV water pumping systems for domestic uses in remote areas: Sizing process, simulation and economic evaluation. Renewable Energy, 2019, vol. 132, p. 798-812.
- [24] NASIR, A. Design, Simulation and Analysis of Photovoltaic Water Pumping System for Irrigation of a Potato Farm at Gerenbo. 2016.



- [25] BENGHANEM, M., DAFFALLAH, K. O., et ALMOHAMMEDI, A. Estimation of daily flow rate of photovoltaic water pumping systems using solar radiation data. *Results in Physics*, 2018, vol. 8, p. 949-954.
- [26] MOKEDDEM, Abdelmalek, MIDOUN, Abdelhamid, KADRI, D., et al. Performance of a directly-coupled PV water pumping system. *Energy conversion and management*, 2011, vol. 52, no 10, p. 3089-3095.
- [27] ALIYU, Mansur, HASSAN, Ghassan, SAID, Syed A., et al. A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 87, p. 61-76.
- [28] CHANDEL, S. S., NAIK, M. Nagaraju, et CHANDEL, Rahul. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, p. 1084-1099.
- [29] RAO, Malla Jagan Mohana, SAHU, Manoj Kumar, et SUBUDHI, Pravat Kumar. Pv based water pumping system for agricultural sector. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no 1, p. 1008-1016.
- [30] CHANDEL, S. S., NAIK, M. Nagaraju, et CHANDEL, Rahul. Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 76, p. 163-175.
- [31] MERLINI, Maurizio. Implementation and validation of a design model for photovoltaic water pumping system (PVPS). 2012.
- [32] BEXIGA, Maria Inês Cardoso. Photovoltaic Powered Water Pumping Systems: Design and optimization of an irrigation system. 2014. Thèse de doctorat.
- [33] V.C. Sontak, and V. R. Kalamkar. "Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1038-1067, 2016.
- [34] AL-HAMDANI, Ali H., HASSAN, Majed, et AHMAD, Roshen Tariq. Optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping system in Samara. *Engineering and Technology Journal*, University of Technology, 2013, vol. 31, no 16, p. 3067-3077.
- [35] CHIKUNI, Edward. Program-assisted sizing of a photovoltaic-powered water pumping system. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2012, vol. 23, no 1, p. 32-38.
- [36] M. Jayakumar and V. Rajini, "Investigation of photovoltaic water pumping system," in *International Conference Circuit Power and Computing Technologies ICCCPCT*, IEEE conference, (Nagercoil, India, 2013), pp. 275-282.
- [37] KHIAREDDINE, Abla, SALAH, Chokri Ben, et MIMOUNI, Mohamed Faouzi. Control water level of a photovoltaic pumping system. In : 2013 International

Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE, 2013. p. 435-440.

[38] PATIL, Manoj D. et RAMTEKE, Rohit G. LC filter design implementation and comparative study with various PWM techniques for DCMLI. In : 2015 International Conference on Energy Systems and Applications. IEEE, 2015. p. 347-352.

[39] KISHOR VERMA, Jai et DONDAPATI, Raja Sekhar. Techno-economic sizing analysis of solar PV system for Domestic Refrigerators. Energy Procedia, 2017, vol. 109, p. 286-292.

[40] ADAR, M., BAZINE, H., ABOUNADA, A., et al. Simulation and comparative study of different PV Modules technologies of silicon (Monocrystalline, polycrystalline and Amorphous) in Beni Mellal.

ANNEXE 1 : PROGRAMME DE CALCUL DES PARAMETRES DU REGULATEUR PI

```
function alpha = PI( y )

    y0=0;
    alpha=0.61625;

persistent U0 E0

    if isempty (U0, E0)
        U0 = 0;
        E0 = 0;
    end

ts=10;
te=9e-6;
    for i = 0:te:ts
        if (y -y0 ~= 0 )
            E = 240 - y ;
            alpha = U0 + 4.68e-8 * (E - 0.4 * E0)
            U0 = alpha ;
            E0 = E ;
            y0 = y;
        end
    end
end
```

ANNEXE 2 : PROGRAMME DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE MPPT

```
function D = PandO(Enabled, V, I)

    Dinit = 0.65;
    Dmax = 0.85;
    Dmin = 0.1;

persistent Dprev Pprev Vprev

    if isempty (Dprev)
        Dprev = Dinit ;
        Vprev = 0 ;
        Pprev = 0;
    end

deltaD = 0.001;
p = V*I;
```

```

if (p-Pprev)~=0 & Enabled ~=0
    if (p-Pprev)>0
        if (V-Vprev)>0
            D = Dprev - deltaD ;
        else
            D = Dprev + deltaD /2;
        end
    else
        if(V - Vprev)>0
            D = Dprev + deltaD/2;
        else
            D = Dprev - deltaD;
        end
    end
end
else D=Dprev;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dprev;
end

```

```

Dprev = D;
Vprev = V;
Pprev = p;

```

ANNEXE 3 : PROGRAMME DU CALCUL DE LA VITESSE DE REFERENCE DU MOTEUR ASYNCHRONE

```

function nref = speed_ref( V, I)

    Irref=1000;
    rendement=0.92;
    k=4.63e-7;

    persistent Ppvref

    if isempty (Ppvref )
        Ppvref = 710;
    end

    Ppv = V*I;

    if (Ppv-Ppvref)<=0.1
        Pu=Ppv*rendement;
        n=(Pu*60)/(2*pi*k);
        nref1=n^(1/3);
    else
        nref1=2830;
    end
end

```

```
nref=nref1;
Ppvref=Ppv;
end
```

### ANNEXE 3: PROGRAMME BOOT LOADER

```
void Susart_Init(char Brg_reg);
void Susart_Write(char data_);
void Start_Bootload();
void Start_Program();
char Susart_Write_Loop(char send, char recieve);

//----- Bootloader main for PIC16's
void main() org 0x1E7D {
    Susart_Init(51);          // Init USART at 9600
    if (Susart_Write_Loop('g', 'r') != 255) { // Send 'g' for ~5 sec, if 'r'
        Start_Bootload();    // received start bootload
    }
    else {
        Start_Program();     // else start program
    }
}
```

### ANNEXE 4 : PROGRAMME DE LECTURE ET D’AFFICHAGE DE LA VALEUR DE LA TEMPERATURE

```
unsigned long int adc_value;
unsigned dix, unit, cent, affdix, affunit, affcent;
int tab [10] = {192,249,164,176,153,146,130,248,128,144};
int tab2 [1] = {198};
```

```

void main()
{
    TRISB=0x00;

    portb=0x00;

    TRISC=0x00;

    portc=0x00;

    adc_value=0x00;

ADC_Init();

    for (;;)
    {
        adc_value = ADC_Read(0);
        adc_value =(adc_value*5000)/1023;
        adc_value=(adc_value*100)/5000;
        cent=adc_value/100;
        affcent=tab[cent];
        dix=(adc_value%100)/10;
        affdix=tab[dix];
        unit=(adc_value%100)%10;
        affunit=tab[unit];

portb=affcent;

portc.F0=1;

Delay_ms(6);

        portc.F0=0;

        portb=affdix;

        portc.F1=1;

Delay_ms(6);

```

```
portc.F1=0;
portb=affunit;
portc.F2=1;
Delay_ms(6);
portc.F2=0;
portb=tab2[0];
portc.F3=1;
Delay_ms(6);
portc.F3=0;
}
```

ANNEXE 5 : CIRCUIT IMPRIME DE LA CARTE DE COMMANDE DU HACHEUR ET DE L'ONDULEUR

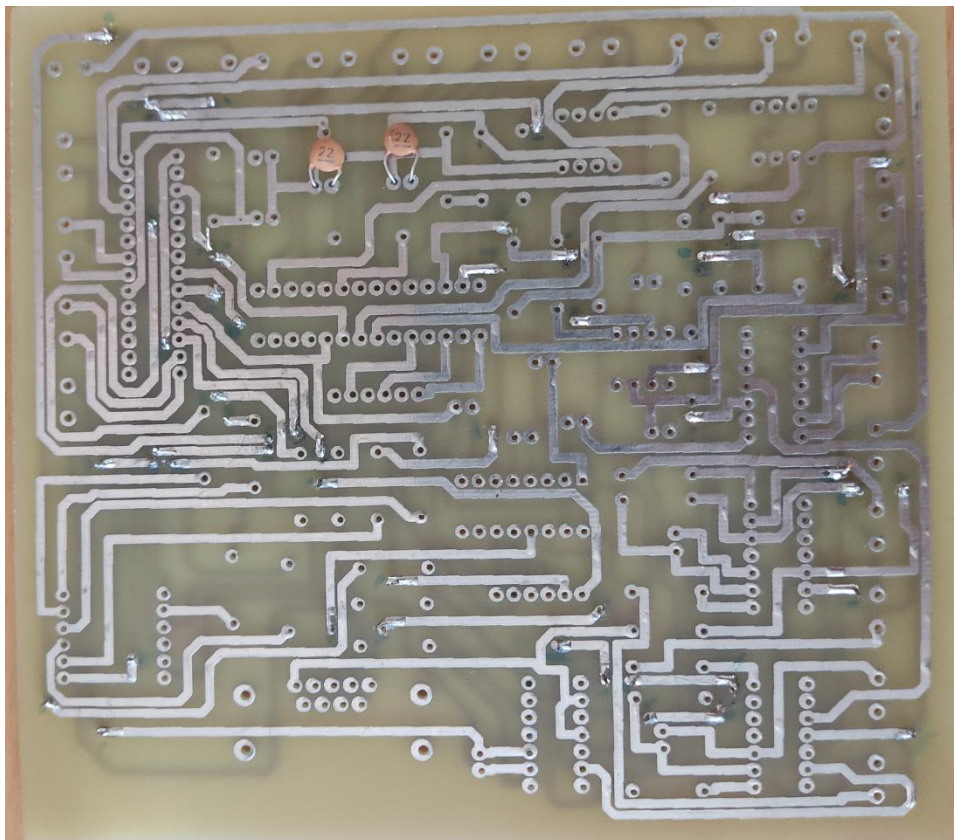


Figure 5.1: Face haut du circuit imprimé de la carte de commande

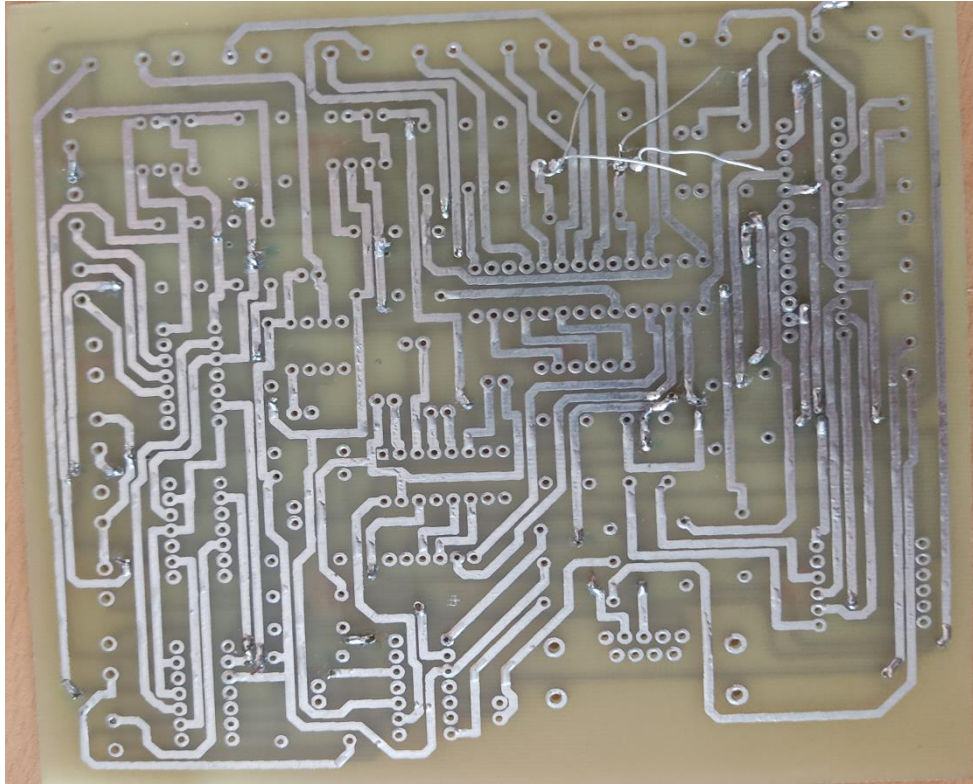


Figure 5.2 : Face bas du circuit imprimé de la carte de commande

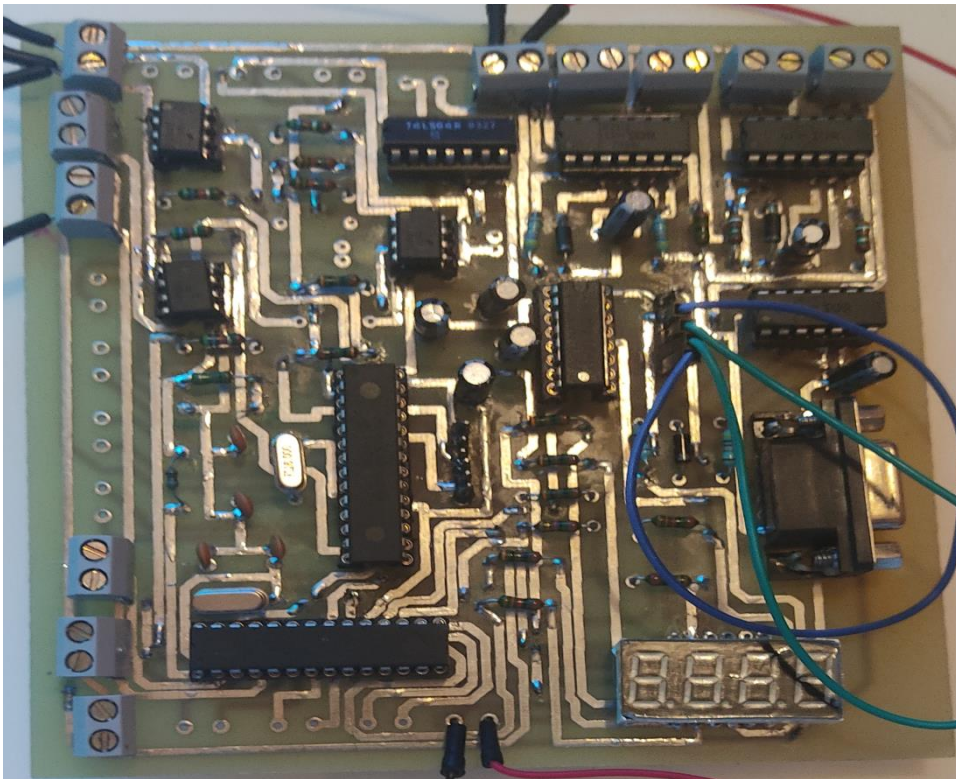


Figure 5.3 : circuit après soudage



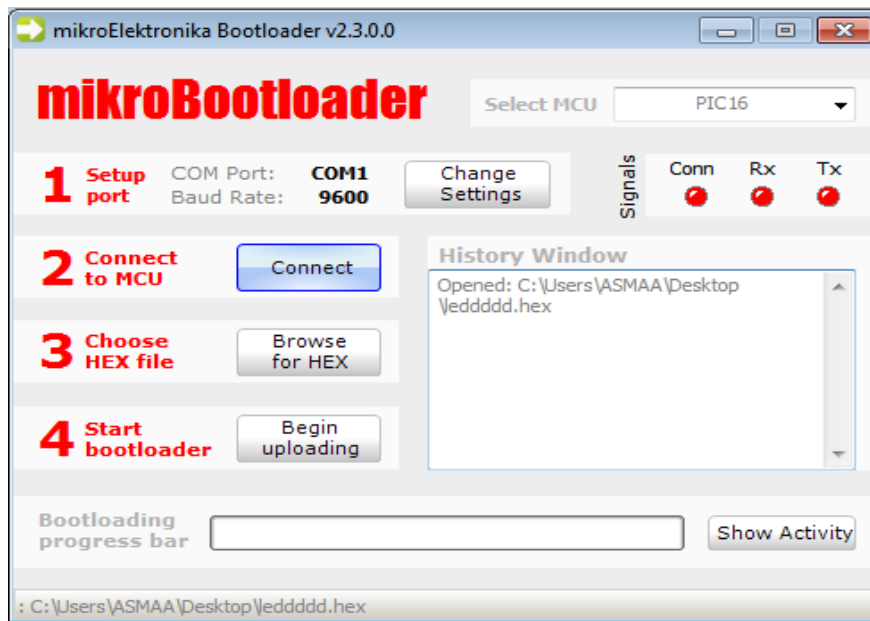


Figure 6.1 : l'interface MikroBootloader du logiciel MicroC

On choisit la vitesse de transmission et le port connecté à la carte. On connecte l'interface avec la carte on cliquant sur CONNECT. L'interface MikroBootloader affiche un message qui affirme que le pc et connecté à la carte comme dans la figure 6.2.

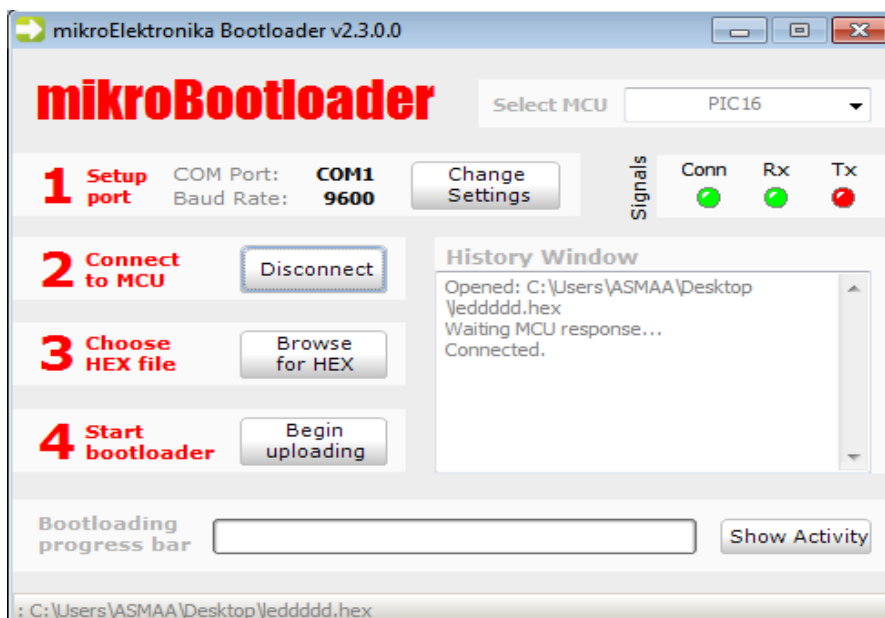


Figure 6.2 : l'interface MikroBootloader affirme la connexion pic pc

Afin de charger le programme désiré, on utilise BROWSE FOR HEX. La fenêtre donnée par la figure 6.3 permet de choisir le programme.

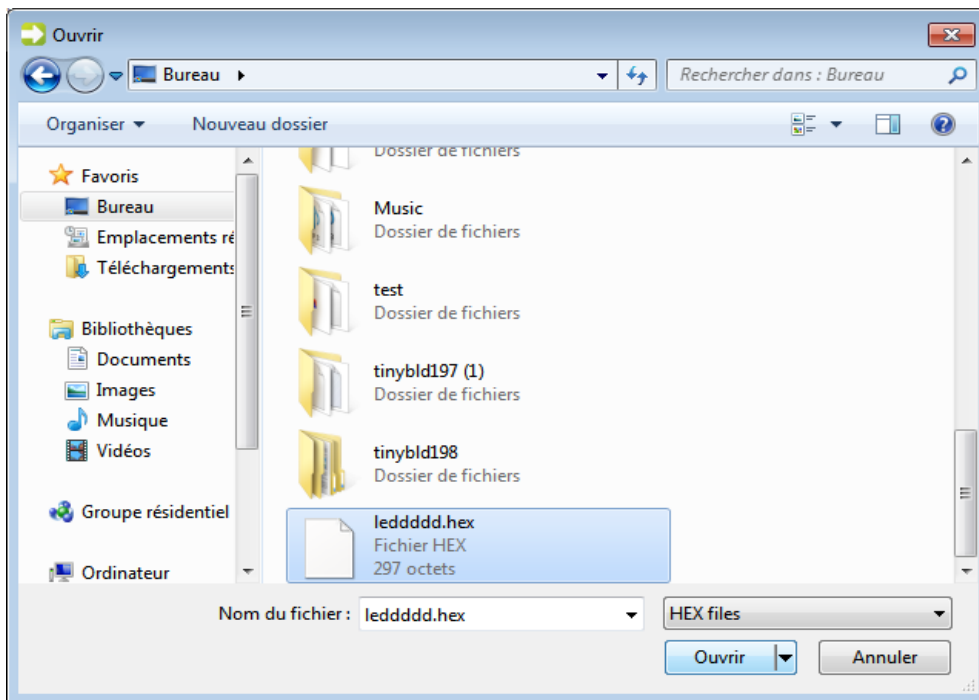


Figure 6.3 : Fenêtre du chargement du programme désiré

Après avoir choisir le programme, l'interface MikroBootloader affiche un message qui affirme le chargement du programme.

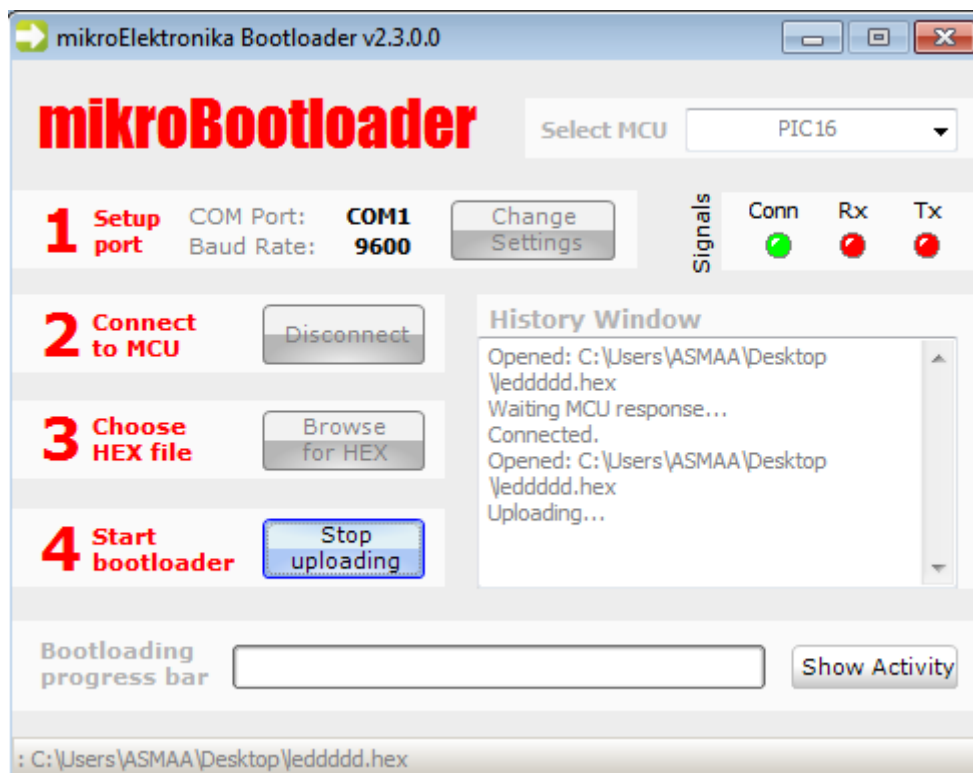


Figure 6.4 : Fenêtre de chargement du programme désiré

La fenêtre donnée par la figure 6.5 s'apparait pour prouver le chargement réussi du programme.

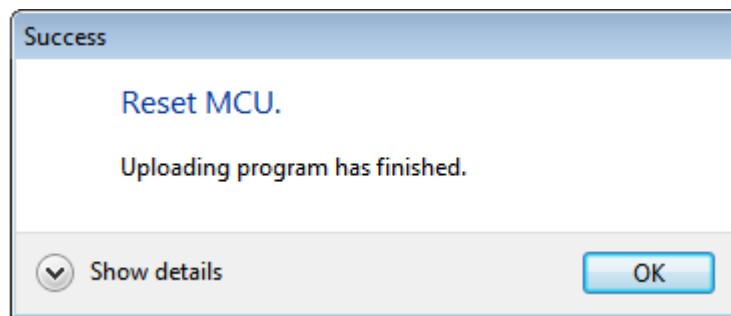


Figure 6.5 : Fenêtre de validation du chargement du programme