



Université ABDES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Présenté par /

- Bensizerara Abderrezzaq
- Marred Beleid

Diriger par /

Dr.BOUTABBA Tarek

THEME

***Commande d'une chaine de pompage
photovoltaïque***

Soutenu le : 29/06/2022 devant la commission d'examen composée de :

Prof. CHAIBA A

à L'Université Abdes Laghrou de Khenchela

Président

Dr. BOUTABBA Tarek

à L'Université Abdes Laghrou de Khenchela

Encadrant

Mr. REZZAK D

à L'Université Abdes Laghrou de Khenchela

Examineur

Promotion 2021/2022

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer la commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, un hacheur survolteur, alimentant un système de pompe immergé constituée d'une pompe centrifuge. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques. L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC. La technique de commande MPPT est développée et présentée dans ce mémoire, Une simulation sous l'environnement de simulation du logiciel MATLAB et l'implémentation en temps réel sous environnement dSpace 1104 résulte effectuée.

Mots clés : Photovoltaïque, Contrôle MPPT, Pompe DC, Hacheur(Boost).

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو توفير التحكم في سلسلة مرتبطة بمضخة كهربائية غاطسة، يشتمل تكوين هذا النظام على مولد كهربائي ضوئي ومحول (مكيف توتر)، يوفر التغذية لآلة DC مقترنة بمضخة طرد مركزي. الهدف من هذا النظام هو ضمان التشغيل الأقصى لطاقة النظام الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية. تم إجراء التكيف بين المولد الكهروضوئي والحمل باستخدام محول DC / DC، تم تطوير تقنية التحكم MPPT وتقديمها في هذه الأطروحة، محاكاة تحت بيئة برنامج MATLAB والتنفيذ في الوقت الفعلي ضمن بيئة dSpace 1104.

الكلمات الدلالية: كهروضوئي، آلية تحكم MPPT، محرك تيار مستمر، محول التوتر.

Abstract

The objective of this memory is to ensure a control of a photovoltaic pumping chain. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, a booster chopper, supplying a submerged pump system consisting of a centrifugal pump. The objective of this system is to ensure maximum power operation of the photovoltaic system for various climatic conditions. The adaptation between the photovoltaic generator and the load was carried out using the DC/DC converter. The MPPT control technique is developed and presented in this memory, a simulation under the simulation environment of the MATLAB software and the real-time implementation under the dSpace 1104 environment resulted.

Keywords: Photovoltaic, MPPT control, machine direct continuous, booster chopper.

REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie le bon dieu tout puissant qui me donne de la foi, du courage et de patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces années d'étude.

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Dr « **BOUTABBA Tarek** » pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continué durant toute cette période. Qui n'a pas cessée de me donner ses conseils.*

Je remercie vont aussi à tous les enseignants d'Electrotechnique qui a contribué à notre formation par ailleurs, ainsi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

En fin je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes amis pour le soutien moral et matériel.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, en guise de reconnaissance et de gratitude pour

tous les

Sacrifices qu'ils ont faits.

A mes enfants

A mes amies, à qui je souhaite le succès, pour l'amitié qui nous

a toujours unis.

A tous ceux qui me sont trop Chers et que j'ai omis de citer.

Enfin à toute la Promotion électrotechnique : commande

électrique.

Sommaire

Sommaire. Nomenclature.

Introduction Générale 11

Chapitre I : Description générale d'un Système de pompage photovoltaïque

I-1 Introduction	14
I.2. Le gisement solaire.....	14
I.2.1. Le soleil.....	14
I.2.2. Rayonnement solaire.....	15
I.2.2.1. Spectre solaire.....	15
I.2.2.2. Potentiel Solaire.....	16
I.3. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque.....	18
I.3.1. Généralité sur les systèmes photovoltaïques.....	18
I.3.2. L'effet photovoltaïque.....	19
I-3-3 Le panneau solaire.....	20
I.4 Regroupement des cellules.....	21
I.4.1 Regroupement en série.....	21
I.4.2 Regroupement en parallèle.....	22
I.4.3 Regroupement Mixte (série & parallèle).....	22
I.5 Installation des panneaux.....	24
a- Disposition des panneaux.....	24
b- Fixation des panneaux.....	24
c- L'orientation des panneaux.....	24
I.6 Système de conversion	24
I.6.1 Types de convertisseurs	25
I.6.2.1 Le convertisseur continu -continu	25
I.6.2.2 Le convertisseur continu- alternatif.....	25
I.6.2.3 Caractéristiques de convertisseurs.....	26
I.7 La Charge.....	26
I.8 Conclusion.....	27

Chapitre II : Simulation d'un système de pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink

II-1 Introduction.....	29
II.2 Générateur photovoltaïque.....	29
II.2.2 Effet de l'éclairement.....	31
II.2.3 Influence de la température.....	32
II.2.4 Interprétations des Résultats.....	33
II.2.5 Rendement énergétique maximum η_{max}	33
II.2.6 Facteur de forme FF.....	33
II.2.7 Fonctionnement optimale du générateur	33
II.3 Convertisseurs DC-DC.....	34
II.3.1 Hacheur dévolteur.....	34
II.3.2 Hacheur élévateur.....	35
II.3.3 Avantage du convertisseur élévateur.....	36
II.4 Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT.....	36
II.4.1 Principe du MPPT	36
II.5 Pompe immergée.....	38
II.5.1 Modélisation d'un Moteur à Courant Continu (MCC).....	39
II.5.2 Différentes type des pompes.....	40
II.5.2.1 Pompe centrifuge	40
II.5.3 Classification des pompes	40
II.5.4 Les avantages et Les inconvénients de la pompe immergée	42
II.5.5 Modélisation de la pompe	42
II.6 Simulation sous Matlab/Simulink	43
II.6.1 Introduction du MPPT dans la chaine PV.....	43
II.6.2 Le générateur photovoltaïque « G PV ».....	44
II.6.2.1 Modèle de la cellule PV.....	44
II.6.3 Convertisseur DC-DC (Hacheur survolteur).....	45
II.6.4 La pompe.....	47
II.7 Les résultats de simulation	47
II.8 Interprétation des résultats	51
II.9 Conclusion.....	51

Chapitre III : Essai expérimentale d'un système de pompage photovoltaïque sous dSpace 1104

III.1.Introduction.....	53
III.2. Description du système	53
III.2.1 Un générateur PV	55
III.2.2 Capteur de tension ou de courant	55
III.3 Carte de la mesure1104.....	56
III.4 Les résultats expérimentale avec Matlab /dSPACE	56
III.5 Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	66
Références Bibliographies.....	69
Annexes.....	71

Nomenclature

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

FF : Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

MAS : Moteur asynchrone.

MCC : Moteur à courant continu.

CVFO : Commande vectorielle par flux orienté.

MLI : Modulation par largeur d'impulsions.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée dans diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible.

L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque(PV) est le pompage de l'eau, en particulier dans les zones rurales qui ont une quantité considérable de rayonnement solaire et n'ont pas accès aux réseaux électrique. Les systèmes PV de pompage utilisent généralement des pompes de faible puissance allant de 200-2000 W. Ils sont largement utilisés pour l'approvisionnement en eau potable pour les ménages, l'apport en eau pour les bétails et l'irrigation à petite échelle.

Le ment composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

Deux types de systèmes peuvent être utilisés, le premier est constitué d'un générateur PV couplé directement à un groupe motopompe, le deuxième est composé d'un générateur PV couplé à une motopompe CC ou AC à travers un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la machine continue et toujours un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT couplé à un convertisseur continu alternatif pour la machine alternative.

La configuration la plus usuelle dans le pompage photovoltaïque et à base d'un moteur à courant continu vue la simplicité de son couplage direct avec le générateur photovoltaïque. En effet, les moteurs à courant continu exigent une maintenance continue.

Due au coût élevé du générateur photovoltaïque et à la désadaptation existante entre les caractéristiques $I=f(V)$ du générateur et de la charge, une grande importance est donnée à leur conception et à leur utilisation optimale qui permettent un fonctionnement fiable et économique.

L'objet de notre mémoire porte sur la présentation de la technique d'adaptation et commande de ces systèmes en vue d'un meilleur rendement d'utilisation du générateur PV.

L'étude effectuée est axée et orientée vers l'optimisation de la puissance du générateur PV, et sur l'incorporation d'un convertisseur continu-continu commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (**MPPT**).

Cette étude concerne la commande, l'analyse et l'optimisation du système de pompage photovoltaïque comportant un générateur PV, un convertisseur continu-continu et une pompe.

Le document présenté est rédigé en trois chapitres principaux résumés dans ce qui suit :

Dans le **premier chapitre**, on va faire une description générale, et le principe de fonctionnement de chaque élément constituant le système photovoltaïque.

Le deuxième **chapitre** est consacré à l'étude des éléments du système de pompage photovoltaïque (champ photovoltaïque, convertisseur et pompe). Dans une première étape, en exposant d'une manière détaillée la commande avec technique MPPT et la simulation du système sous MATLAB/SIMULINK.

Enfin dans le **dernier chapitre**, on va présenter les résultats des performances des composants de la chaîne de conversion photovoltaïque (panneaux solaires, hacheur, MPPT,) obtenues sous par dspace 1104.



Chapitre I

Description générale d'un système pompage photovoltaïque

I.1 Introduction

Dans nos jours, la demande d'eau est de plus en plus très importante, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. Dans ce chapitre nous allons présenter le système photovoltaïque en général et on s'intéressera à la méthode de pompage au fil du soleil [2].

I.2. Le gisement solaire :

I.2.1 Le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 392 000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2 1027 tonnes. Au centre du soleil, la température atteint 15 millions de degrés Celsius. A titre d'exemple, si l'on faisait chauffer un grain de sable à cette température, sa chaleur enflammerait tout ce qui se trouve dans un rayon de 100 kilomètres. [3]

Toute l'énergie du soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Ces réactions transforment à chaque seconde 564 106 tonnes d'hydrogène en 560106 tonnes d'hélium. La différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale du soleil de 3.81020 MW. Cette énergie rayonne vers l'extérieur dans toutes les directions mais seule une infime fraction, 1.7 1014 kW, du rayonnement total émis est interceptée par la terre située à 150 millions de kilomètres du soleil [4]. Environ 60% de cette énergie, soit 1.02 1014kW, atteint la surface de la terre, le reste est réfléchi dans l'espace et absorbé par l'atmosphère.

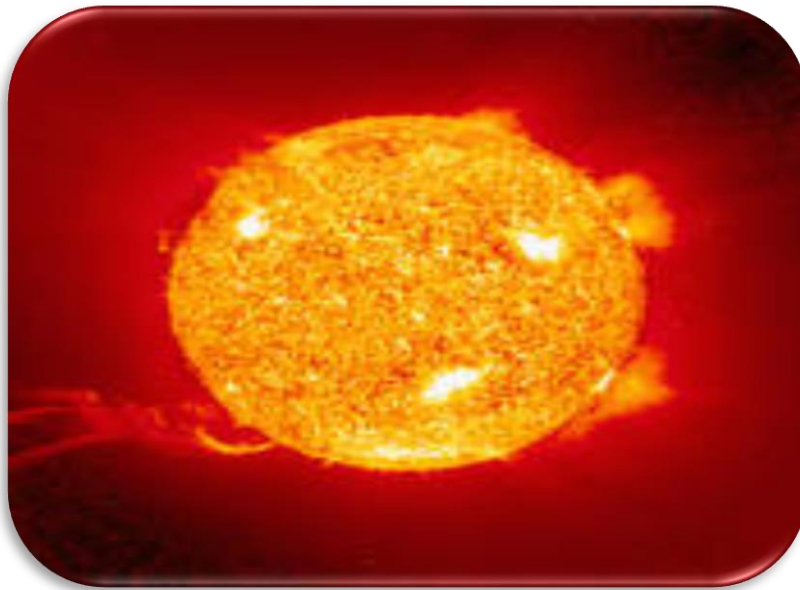


Figure I.1 : Une énergie renouvelable, inépuisable à l'échelle humaine.

I.2.2. Rayonnement solaire :

I.2.2.1. Spectre solaire :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, **quatre types** de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature à savoir :

- **Rayonnement direct :**

Le rayonnement direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages [5].

- **Rayonnement diffus :**

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit [4].

- **Rayonnement réfléchi :**

Appelé au même titre Albédo, c'est la capacité d'une surface à réfléchir une lumière notamment celle du soleil. Il est exprimé par un chiffre compris entre 0 et 1. Le « 1 » s'affecte à un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue [6].

▪ Rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements direct, diffus, et reflété par le sol [6].

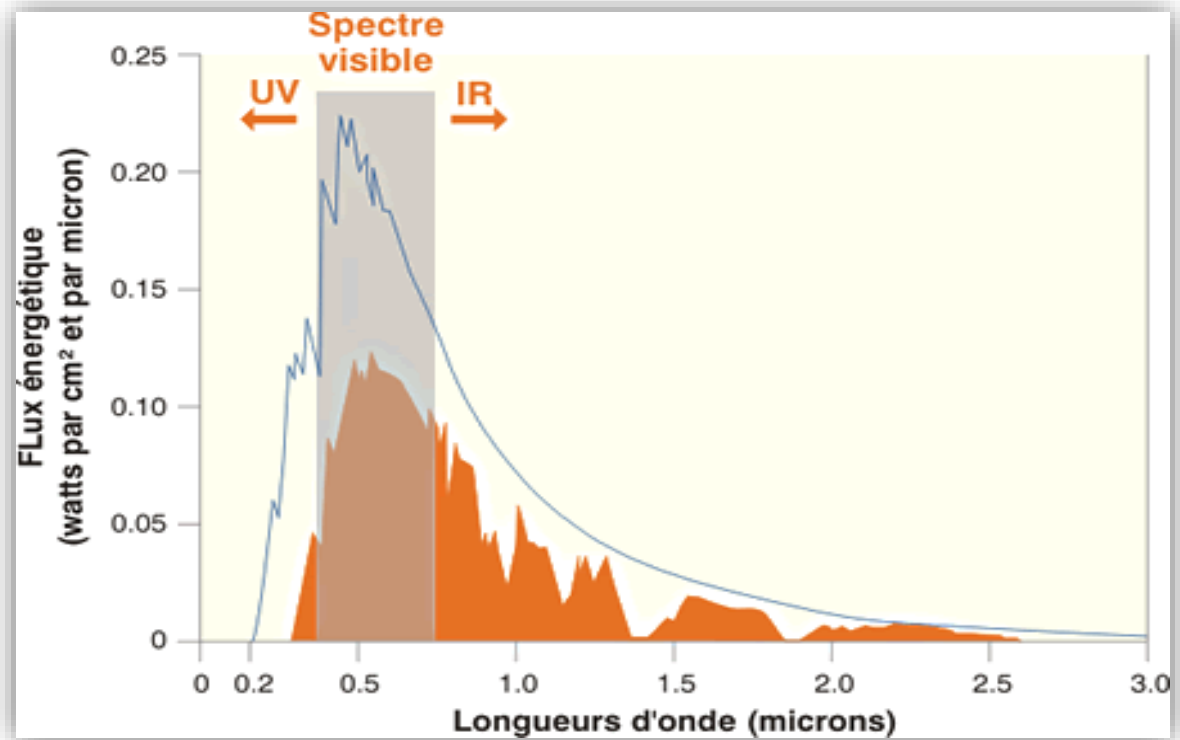


Figure I.2 : La répartition énergétique des différentes longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du Soleil est appelé spectre solaire.

I.2.2.2 Potentiel Solaire :

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m^2 soit près de 3 KWh/m^2 au nord et dépasse $5,6\text{ KWh/m}$ au Grand Sud (TAMENRASSET).

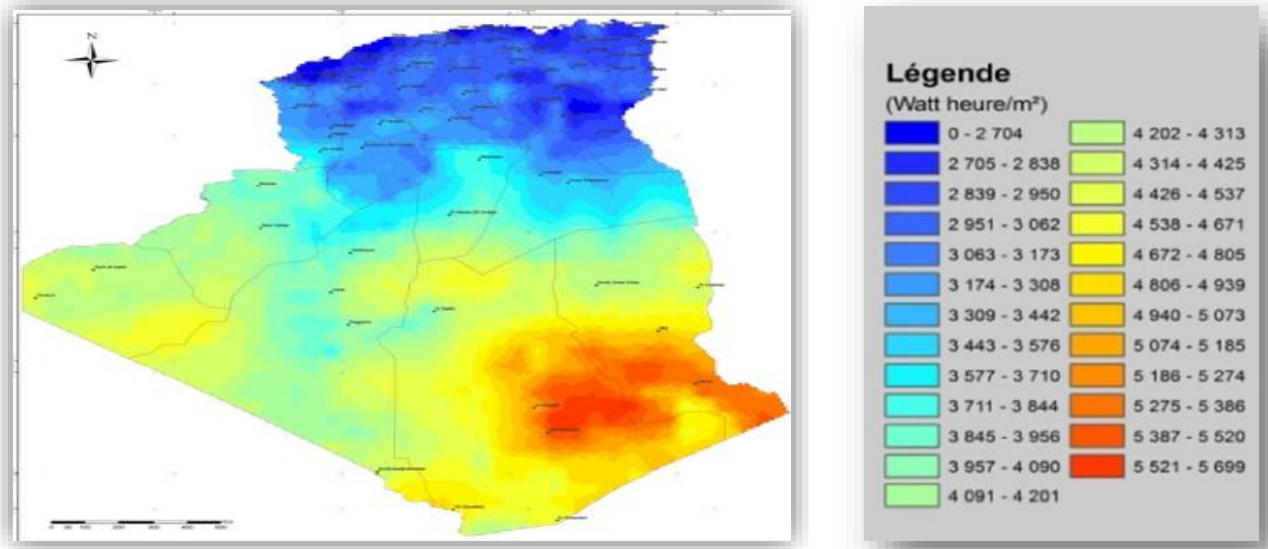


Figure I.3 : Carte de l'Irradiation Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011)

➤ **Programme d'électrification Solaire :**

La figure ci-dessous montre le différent projet à caractère solaire en Algérie

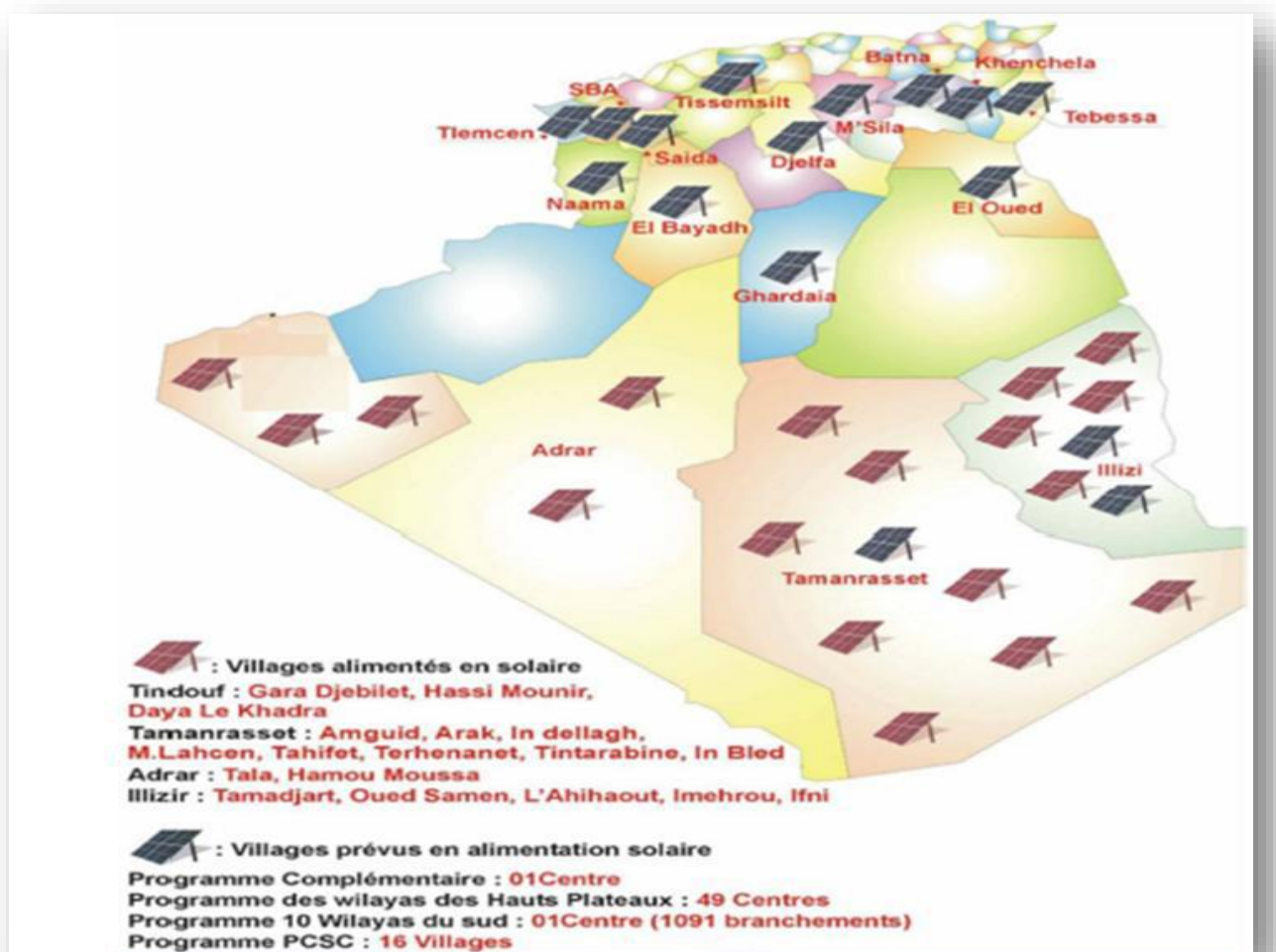


Figure I.4 : Carte de programme d'électrification solaire.

I.3 Description de l'élément d'un système de captage photovoltaïque :

I.3.1 Généralité sur les systèmes photovoltaïques :

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV.

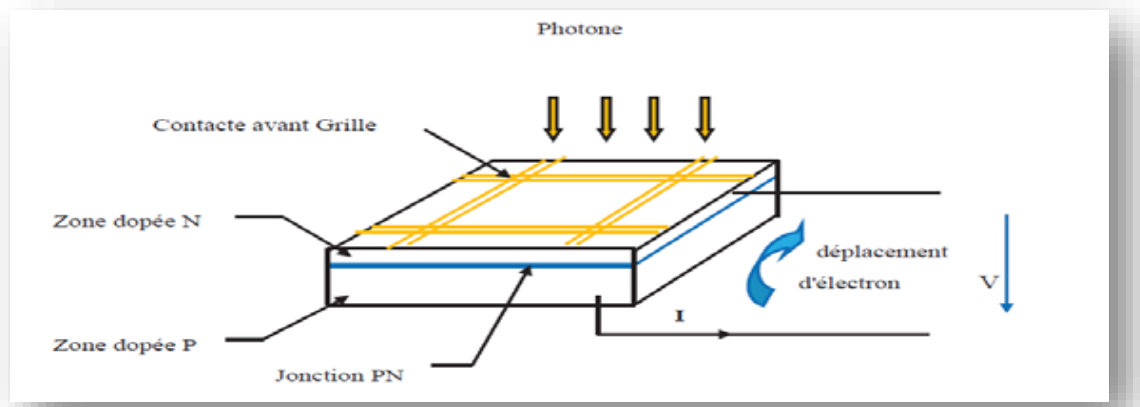


Figure I.5 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.[7]

Un panneau solaire est composé de cellules solaires intercalées entre des couches de **film adhésif** transparent. Le devant de cet assemblage est recouvert d'une couche de verre maintenue par un cadre. L'arrière comporte une couche d'aluminium appelée **feuille de fond** qui peut conduire l'électricité. L'électricité générée par les cellules solaires quitte le panneau solaire à la **boîte de jonction**.

Le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint actuellement 15 à 19% pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium poly-cristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe.

Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques.

I.3.2 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la

connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, voir la figure (I.6) :

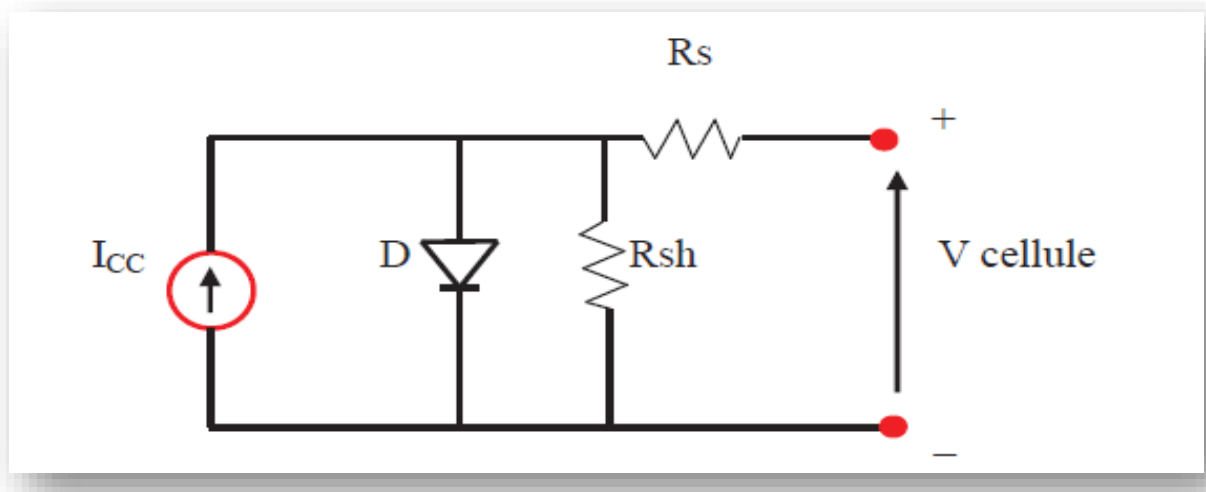


Figure I.6 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.[7]

La taille d'une cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V.

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s Représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction

I.3.3 Le panneau solaire

Le panneau solaire **Figure I.8** ou (champ solaire) se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure I.8 : Panneau solaire.

I.4 Regroupement des cellules :

I.4.1 Regroupement en série :

Une association de (N_s) cellule en série figure (I.9) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.[7]

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad [I.1]$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \quad [I.2]$$

V_{coNs} : La sommes des tension en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

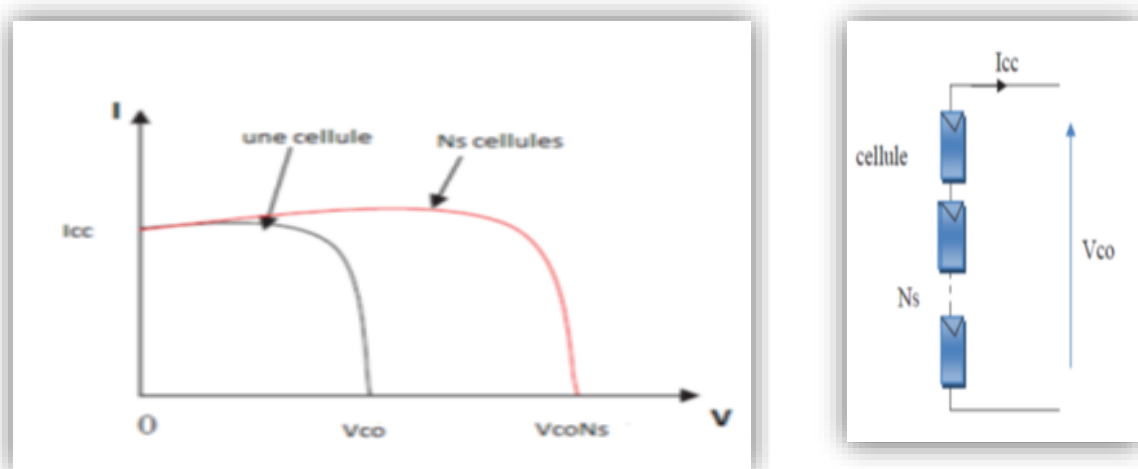


Figure I.9 : Caractéristique courant tension de N_s cellules en série.

I.4.2 Regroupement en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (I.10) est possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \quad [I.3]$$

$$V_{coNp} = V_{co} \quad [I.4]$$

I_{ccNp} : La somme des courants courts-circuits ouvert de N_p cellules en en parallèle.

V_{coNp} : Tension de circuit ouvert de N_p cellules en parallèle.

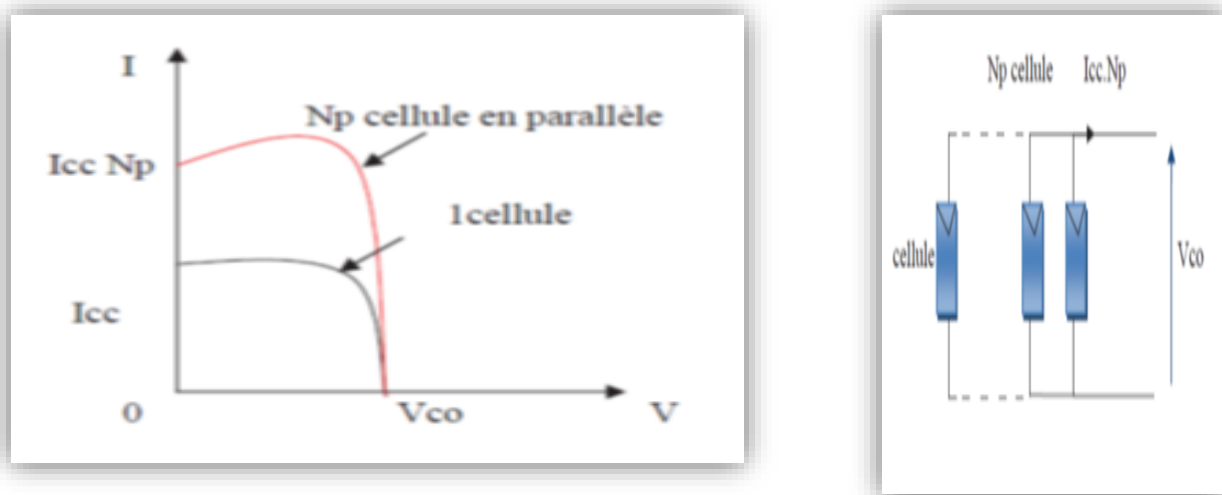


Figure I.10 : Caractéristique courant tension de N_p cellules en parallèle.

I.4.3 Regroupement Mixte (série & parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (I.11). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport N_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport N_p parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure (I.12), N_s et N_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle. [7]

$I_{gcc} = N_p \cdot I_{CC}$: Courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = N_s \cdot V_{co}$: Tension du circuit ouvert du module résultant.

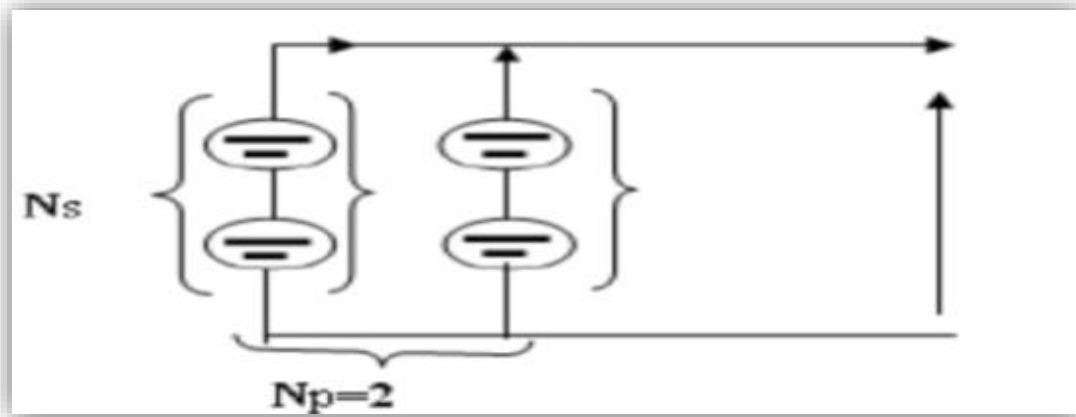


Figure I.11 : Schéma d'association mixte des modules.

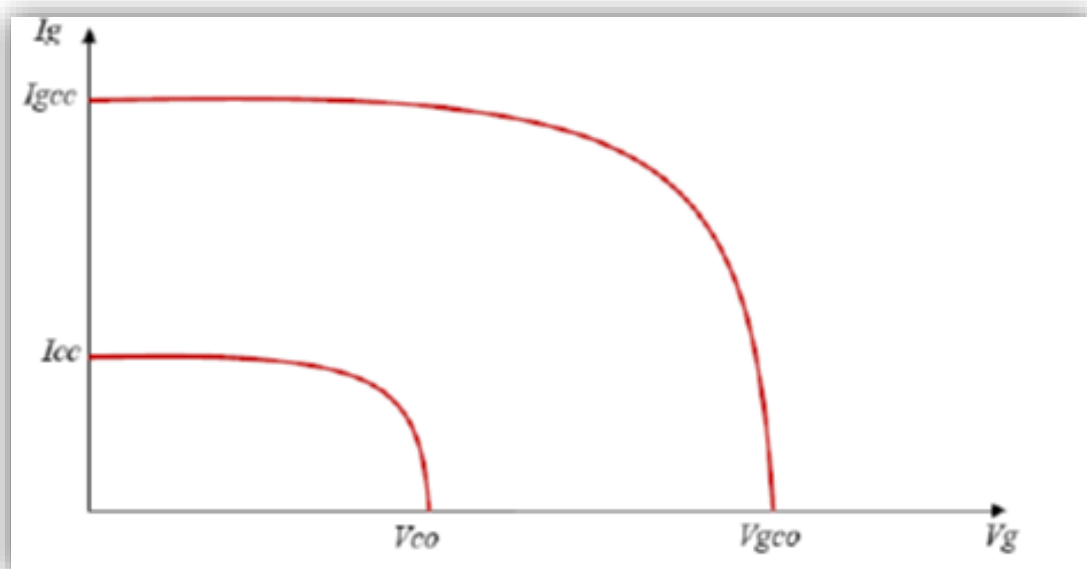


Figure I.12 : Caractéristique résultantes de regroupement mixte.

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Regroupement en série) ou augmenter le courant (Regroupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

I.5 Installation des panneaux :

Pour installer les panneaux solaires dans un site, il est nécessaire de vérifier les conditions suivantes [8]:

a- Disposition des panneaux

Les structures doivent être solides, fixées au sol, pour résister à des vents d'au moins de 150 Km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (autre l'aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inoxydable).

b- Fixation des panneaux

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes [9] :

1. Maintien de l'orientation.
2. Résistance contre le vent et les autres intempéries.
3. Résistance contre les agressions mécaniques.
4. Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.
5. Ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement.

c- L'orientation des panneaux

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique [10] .

I.6 Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.

I.6.1 Types de convertisseurs :

I.6.1.1 Le convertisseur continu -continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [11].

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

I.6.1.2 Le convertisseur continu- alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- a) **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- b) **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale [11].

Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

I.6.1.3 Caractéristiques de convertisseurs :

A. la puissance nominale :

C'est la puissance exprimée en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

B. Le rendement :

C'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

C. La consommation à vide :

Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit) .pour cette raison, il est important de limiter les pertes a un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220v – 50Hz). Les plus ou moins grandes puretés de la tension de sortie est obtenue grâce à :

- Un système de régulation qui rend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée.
- Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

I.7 La Charge :

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

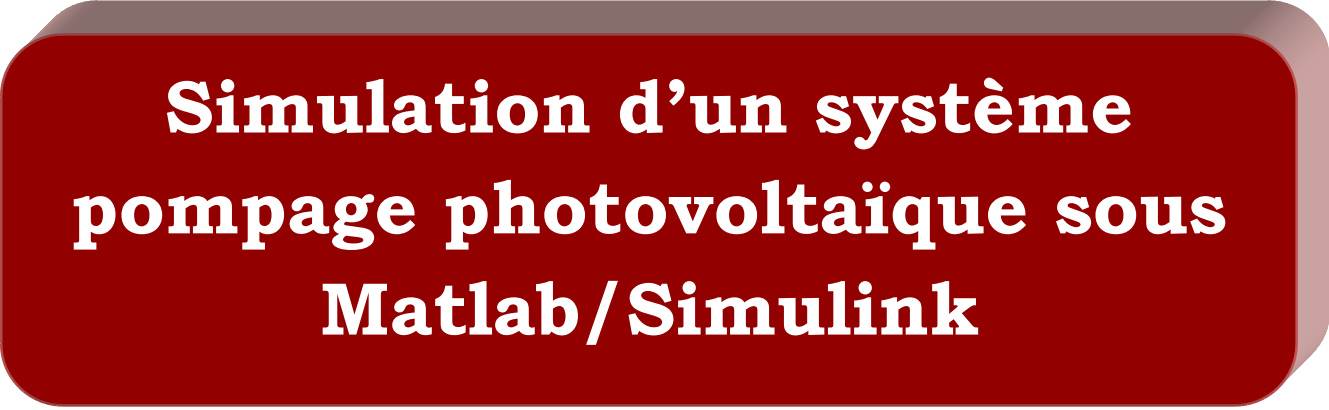
I.8 Conclusion :

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergie fossiles ; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Dans ce chapitre on a abordé la différente caractéristique de système photovoltaïque. Dans ce qui suit nous intéresserons seulement à la production d'électricité par l'énergie photovoltaïque.



Chapitre II



Simulation d'un système pompage photovoltaïque sous Matlab/Simulink

II.1 Introduction

Dans nos jours, la demande d'eau est de plus en plus très importante, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. Dans ce chapitre nous allons présenter le système photovoltaïque en général et on s'intéressera à la méthode de pompage au fil du soleil.

Les principales composantes d'une chaîne de pompage photovoltaïque seront modélisées et simulés dans l'environnement Matlab/Simulink à savoir :

- ❖ Le générateur photovoltaïque PV
- ❖ Le convertisseur Continu/Continu DC.
- ❖ Carte PWM (dEspace).
- ❖ La pompe immergée DC.

Nous donnerons dans chaque section le modèle adéquat, son implémentation dans l'environnement Matlab/Simulink et en fin les résultats de simulations.

II.2.Générateur photovoltaïque :

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmente. Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de test et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque Shell SP 75.

Le module est composé de 36 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 75 W.

➤ **Caractéristiques Courant-Tension :**

La caractéristique principale du générateur photovoltaïque est la caractéristique $I-V$ qui montre comment un générateur photovoltaïque répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température (figure II.1). Il y a trois points importants dans cette courbe :

- ❖ Le point de fonctionnement optimal auquel le générateur fournit sa puissance maximale (point 5).
- ❖ Le point où la tension est égale à zéro et le courant est en maximum (courant de circuit-court, point 4).
- ❖ Le point où le courant est égal à zéro et la tension est en maximum (tension de circuit ouvert, point 1).

Egalement la caractéristique $I-V$ peut être divisée en trois gammes :

- Une gamme où le générateur est considéré comme une source de tension (1-2).
- Une gamme où le générateur est considéré comme une source de courant (3-4).
- Une gamme où ni la tension ni le courant ne sont constants (2-3).

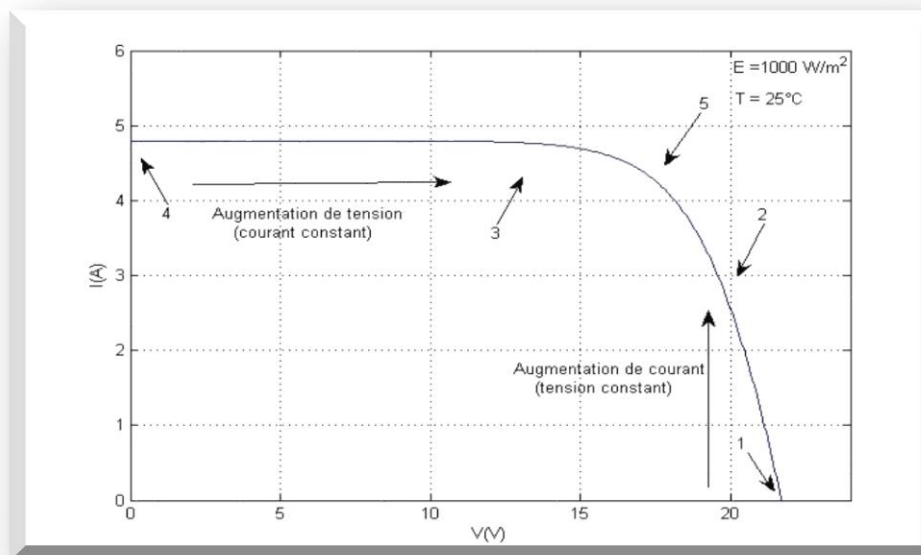


Figure II.1 : Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

➤ **Caractéristique Puissance-Tension :**

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes (Figure 2.3). Le point « P_m » représente la puissance maximale débitée par le générateur photovoltaïque.

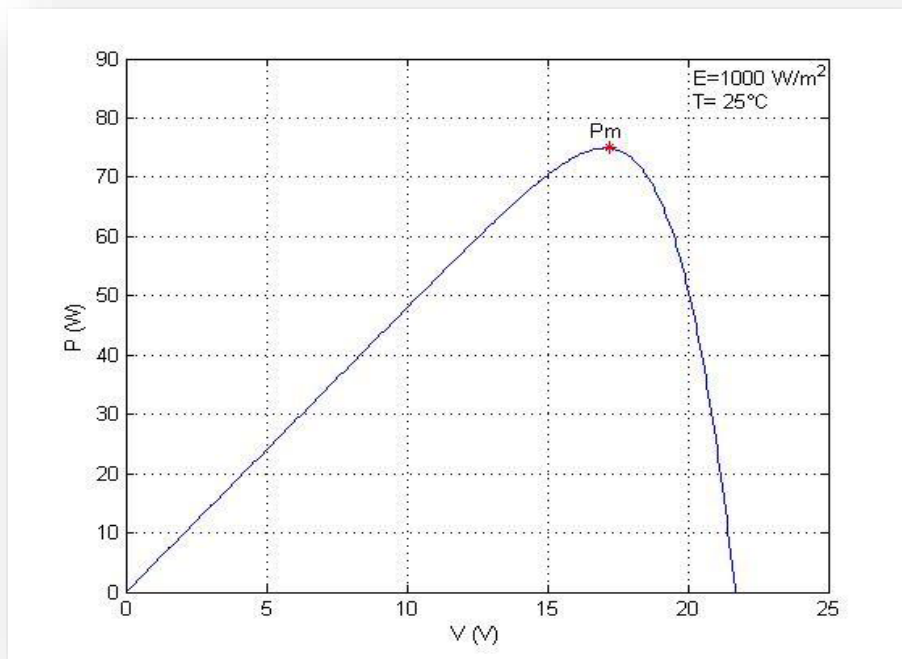


Figure II.2 : Caractéristiques P (V) d'un générateur photovoltaïque

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse du générateur photovoltaïque est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25°C.

II.2.2. Effet de l'éclairement :

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

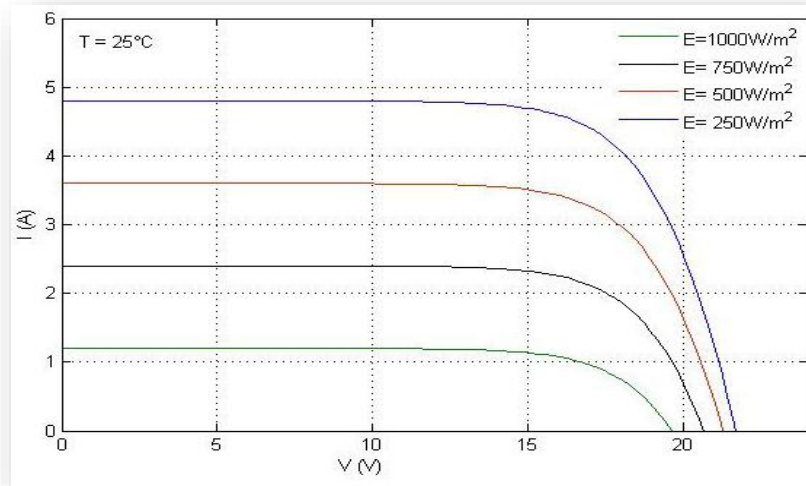


Figure II.3 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V

II.2.3 Influence de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure (II.4) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

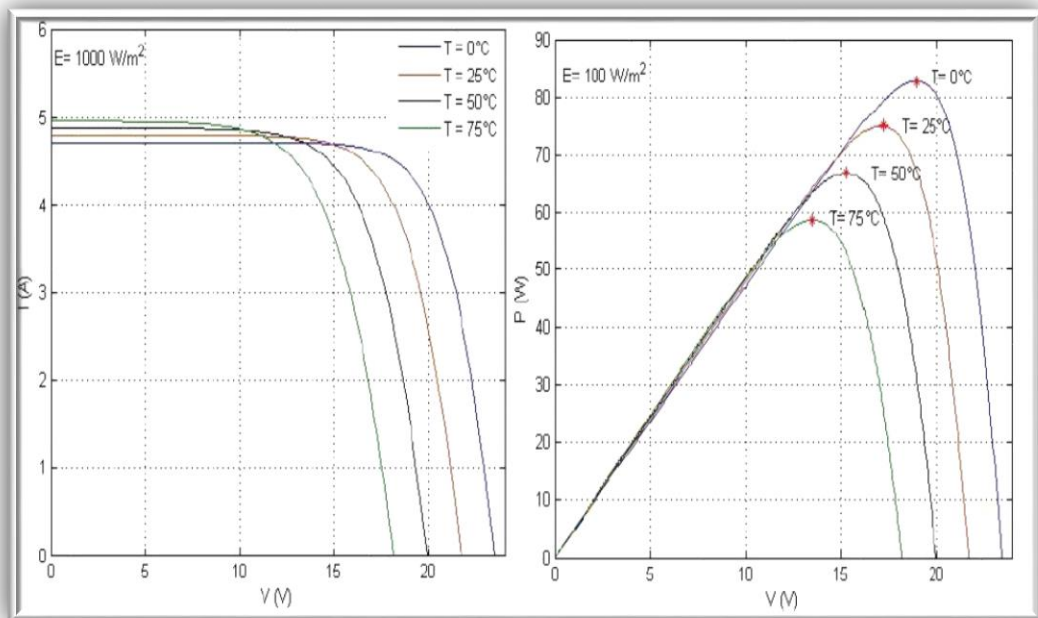


Figure II.4 : Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V

II.2.4. Interprétations des Résultats :

La figure (II.3) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V). A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

La figure (II.4) montre l'influence de la température sur la caractéristique I(V). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique P(V). Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

II.2.5 Rendement énergétique maximum η_{max} :

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{E \cdot S} \quad [II.1]$$

S : Surface de la cellule solaire.

E : Flux incident.

(I_m, V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement. .

II.2.6 Facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad [II.2]$$

II.2.7 Fonctionnement optimal du générateur :

Le point de fonctionnement du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point (V_{opt}, I_{opt}) permet d'en extraire la

puissance optimale disponible dans les conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors $R_{opt} = V_{opt} / I_{opt}$

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales R_{opt} lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire.

II.3 Convertisseurs DC-DC :

Le convertisseur DC-DC est l'organe qui doit forcer le GPV à fonctionner dans son point de puissance optimale via l'algorithme d'extraction du MPP.

L'algorithme MPPT fixe la tension de référence qui est la tension optimale ou le GPV travail à son maximum de puissance. Ainsi un rapport cyclique D est calculé afin de commander le convertisseur DC-DC.



Figure II.5 : Convertisseur DC/DC

II.3.1 Hacheur dévolteur :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et en série avec la source **Figure II.7.b** et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à DT, avec D: est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1. [12]

Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de DT à T .

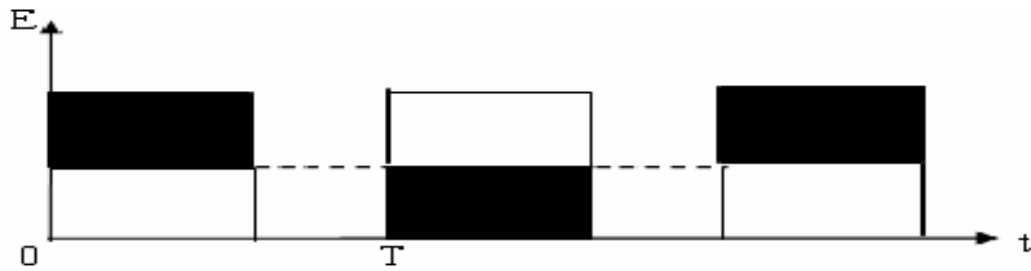


Figure II.6 : Tension de sortie.

II.3.2 Hacheur élévateur :

Un tel convertisseur (figure II.6) permet de fixer une tension moyenne réglable V_{smoy} aux bornes de la source I tel que $V_{smoy} > V$.

La structure du hacheur élévateur (BOOST) est constituée d'une seule cellule de commutation, ainsi que représentée par la **figure II.7.a** Celle-ci comporte deux interrupteurs à commutation complémentaire. Le premier interrupteur est complètement commandable (Transistor T_h) en parallèle avec la source de courant d'entrée (I) constitué d'une source de tension (V) en série avec l'inductance (L_e). Le deuxième interrupteur est à commutation naturelle (Diode D) en série avec la source de tension de sortie (V_s) constituée d'une résistance (R_{ch}) en série avec le condensateur (C_s).[13]

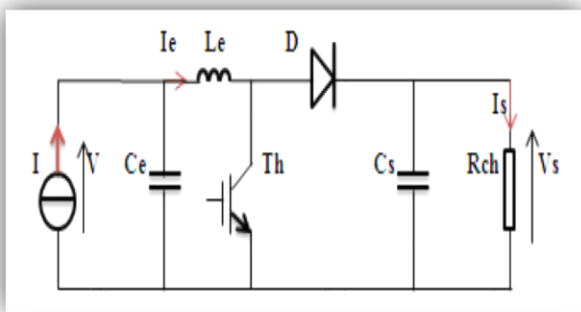


Figure II.7.a : Hacheur survolteur.

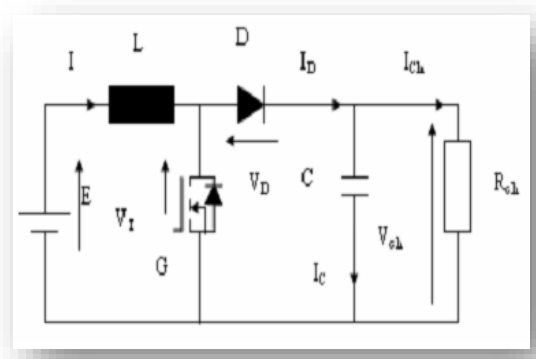


Figure II.7.b : Hacheur dévolteur.

Les expressions de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur ainsi que la valeur moyenne du courant d'entrée du hacheur sont données par :

$$V_{smoy} = V \cdot \frac{1}{1-D} \quad \text{[II.3]}$$

$$I_s = (1 - D)I_e \quad [\text{II.4}]$$

II.3.2. Avantage du convertisseur élévateur :

Malgré le rendement inhérent élevé du convertisseur BUCK dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT), puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le convertisseur BUCK. [14]

II.4 Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT :

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé.

Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale. [15]

II.4.1 Principe du MPPT :

La méthode de perturbation et d'observation « P/O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV.

Au début on fait définir les valeurs initiales : $I_{réf} - \Delta I_{réf}$, P_{old} , à chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés afin de calculer P_{pv} .

Cette valeur de P_{pv} est comparée à la valeur P_{old} calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, $I_{réf}$ est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent et $I_{réf} = I_{réf} + \Delta I_{réf}$, $P_{old} = P_{pv}$.

Si la puissance de sortie a diminué, $I_{réf}$ est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent $I_{réf}$ est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT quand le point de puissance maximale est atteint, $I_{réf}$ oscille autour de la valeur optimale $I_{réf} - \Delta I_{réf}$, Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémentement de la perturbation.

Si l'incrémentement est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. Le rendement de cette technique est d'environ 85% .

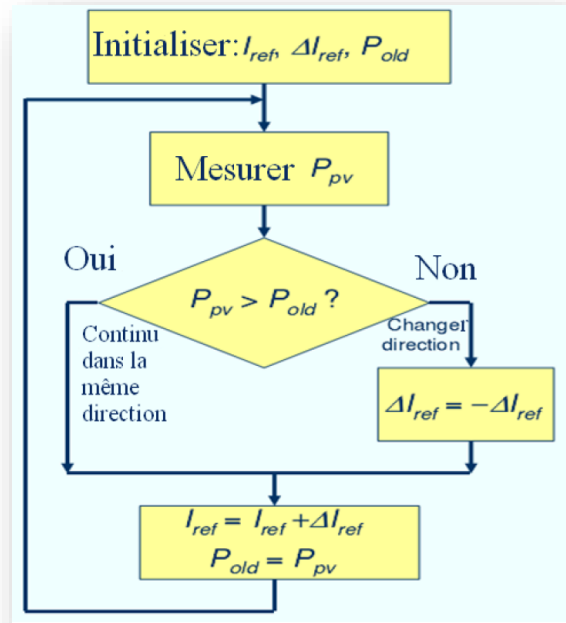


Figure II.8 : Algorithme de MPPT « P/O » en MATLAB.

II.5 Pompe immergée :

Pompe immergée à usage domestique, petite pompe à eau électrique en acier inoxydable à un étage de pompe immergée 24V pour jardinage, arrosage de jardin, lavage de voiture, eau de famille, eau de pompe.[16]



Figure II.9 : Pompe immergée DC [240w, 24v]

II.5.1 Modélisation d'un Moteur à Courant Continu (MCC) :

Modéliser un moteur à courant continu (MCC) suppose établir relation entre sa vitesse de rotation et la tension appliquée à ses bornes. [17]



Figure II.10 : Moteur à courant continu.

Les équations du MCC sont données ci-dessous :

$$\begin{cases} u(t) = e(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \\ e(t) = K_e \omega_m(t) \\ J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \omega_m(t) \\ C_m(t) = K_m \cdot i(t) \end{cases} \quad \text{[II.5]}$$

$u(t)$ = tension appliquée aux bornes du moteur [V]

$e(t)$ = force électromotrice [V]

$i(t)$ = le courant [A]

$C_m(t)$ = le couple moteur [N.m]

$C_r(t)$ = le couple résistant [N.m]

$\omega_m(t)$ = la vitesse de rotation du moteur [rad/s]

R = la résistance des armatures du moteur [Ω]

L = l'inductance des armatures du moteur [H]

J = l'inertie du moteur [kg. M²]

f = coefficient de frottement [H.M.S]

K_m = constante du couple moteur [N.m A]

K_e = constante de force électromotrice [V.s/rad]

Le système d'équations du MCC est un système d'équations différentielles couplées, difficile a

Résoudre sous cette forme. Mais en leur appliquant une transformée de Laplace, ces équations

Deviennent algébriques et le système linéaire.

Ce système d'équations pourra être associé facilement à un diagramme bloc qui sera la base du modèle numérique Simulink.

II.5.2 Différents types des pompes [18] :

II.5.2.1 Pompe centrifuge

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile...) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression.

Une pompe est un système transférant de l'énergie à un liquide de façon à provoquer son écoulement dans une canalisation.

II.5.3 Classifications des pompes :

Selon les applications et les différentes sources d'eau (puits, forage, pompage de rivière, etc.) plusieurs types de pompes peuvent être utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïque.

Parmi ces pompes on trouve ; les turbos-pompes et les pompes volumétriques :

1. Turbopompe

Une turbopompe est un appareil dans lequel l'énergie transmise au liquide est une énergie principalement cinétique, qui lui est communiquée par l'intermédiaire d'un rotor, mais n'est pas en relation invariable avec le déplacement du rotor ; d'autre part, elle n'est pas distribuée uniformément dans tout le liquide.

Les différents types des **turbopompes** sont :

❖ Pompes centrifuges

Le mouvement du liquide est rigoureusement normal à l'axe, car il pénètre au centre de la roue et est projeté vers l'extérieur par l'action combinée de la force centrifuge et des aubes du rotor. La volute du corps transforme la vitesse acquise par le liquide en pression.

❖ Pompes à hélice

Dans ce type de pompe, le fluide est animé d'un mouvement parallèle à l'axe de la pompe, qui lui est communiqué par un impulseur en forme d'hélice ; la

conversion partielle de l'énergie en pression se fait par l'intermédiaire d'un diffuseur à aubes ou par une augmentation de la section de passage.

❖ **Popes hélico- centrifuges**

Ce type de pompe a un impulser qui est intermédiaire entre les deux types extrêmes, centrifuge et à hélice, le mouvement imprimé au liquide est donc à la fois centrifuge et axial.

2. **Pompes volumétriques**

Une pompe volumétrique est une pompe dans laquelle l'écoulement du liquide est en proportion constant avec le déplacement d'un organe mobile du corps de la pompe.

Les pompes volumétriques sont deux sortes, les pompes volumétriques alternatives et les pompes rotatives :

➤ **Les pompes volumétriques rotatives :**

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

❖ **Pompes à engrenages**

Le liquide circule entre les dents et le corps de la pompe. Les engrenages peuvent être du type droit ou hélicoïdal, simple ou double.

❖ **Pompes à palettes**

Dans ce type de pompe, un rotor, excentré par rapport au corps, est muni sur sa périphérie de volets ou de palettes, qui projetés par la force centrifuge contre le corps, assurent l'étanchéité entre corps et rotor. Le liquide, bloqué entre deux volets successifs, est entraîné et forcé vers l'extérieur au refoulement.

❖ **Pompes à vis**

Dans les pompes à vis le rotor a la forme d'un cylindre sur le pourtour duquel se trouve une hélice. Le liquide est enfermé entre les hélices du corps et celle du rotor. Il progresse parallèlement à l'axe du cylindre.

➤ **Les pompes volumétriques alternatives** : la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.

❖ **Pompes à piston**

Son principe est d'utiliser les variations de volume occasionné par le déplacement (Mouvement de va-et-vient) d'un piston dans un cylindre.

Ces déplacements alternativement dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement.

Quand le piston se déplace dans un sens le liquide est comprimé : il y a fermeture du clapet d'admission et ouverture du clapet de refoulement. Le fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe.

❖ **Pompes à membrane**

Dans la pompe à membrane, le mouvement alternatif est transmis à une membrane qui comprime un liquide contenu entre la membrane et le corps, muni lui aussi de clapets d'aspiration et de refoulement. L'intérêt de ce type de pompe est de permettre l'isolement total du liquide à pomper.

II.5.4 Les avantages et Les inconvénients de la pompe immergée :

▪ **Les avantages de la pompe immergée :**

- ❖ Pas de problème d'amorçage : la pression de l'eau empêche l'air de pénétrer dans le corps de la pompe.
- ❖ Un encombrement réduit : la pompe étant dans l'eau, elle est totalement dissimulée.
- ❖ Moins de nuisance sonore : l'immersion de la pompe réduit le bruit.
- ❖ Peu d'entretien : il suffit de la sortir une fois dans l'année pour la nettoyer.
- ❖ Refroidissement du moteur : le flux d'eau va naturellement refroidir le moteur de la pompe.

▪ **Les inconvénients de la pompe immergée :**

- ❖ En général plus chère que la pompe de surface.
- ❖ On la retrouve dans toutes sortes d'applications comme la distribution d'eau sous pression dans des installations domestiques ou l'arrosage ou encore le relevage d'eaux en tant que pompe vide-cave.

II.5.4 Modélisation de la pompe

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur Manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique

Dans cette application. La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée Par : [43]

$$P_h = R_{mp} \cdot P_{ele} = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q \quad [II.6]$$

Avec :

P_h : Puissance communiquée au fluide par la pompe (W)

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

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe (%)

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s²)

ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m³)

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

Q : Débit volumique (m³/s)

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r = Kr\Omega^2 \quad [II.7]$$

Où :

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

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

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad [II.8]$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

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

II.6 La simulation sous L'outil Matlab/Simulink :

II.6.1 Introduction du MPPT dans la chaine PV :

a- Bloc du système avec MPPT :

La **Figure II.11** illustre le bloc schématique de SIMULINK du générateur photovoltaïque et avec le cheminement de la commande de poursuite MPPT.

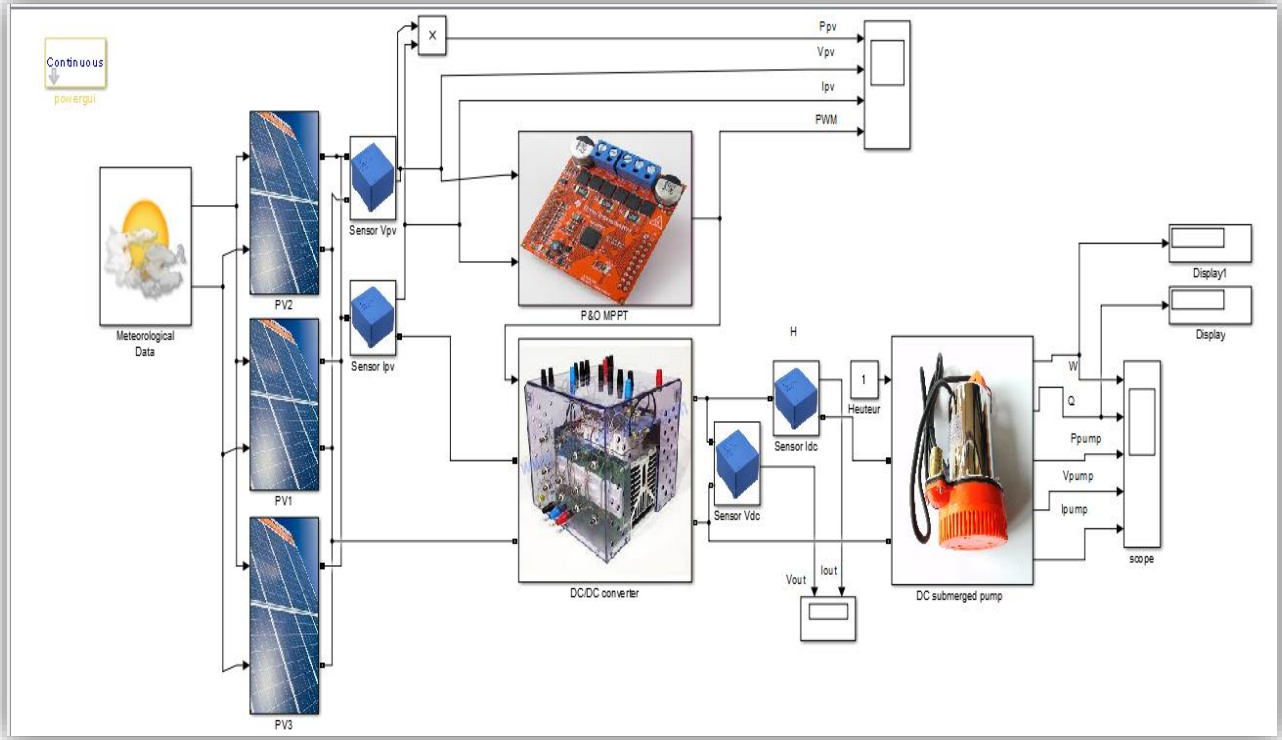


Figure II.11 : Bloc de MPPT en SIMULINK.

II.6.2 Le générateur photovoltaïque « G PV » :

II.6.2.1 Modèle de la cellule PV :

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé, on obtient le bloc schématique de SIMULINK est montré sur **la Figure II.12**

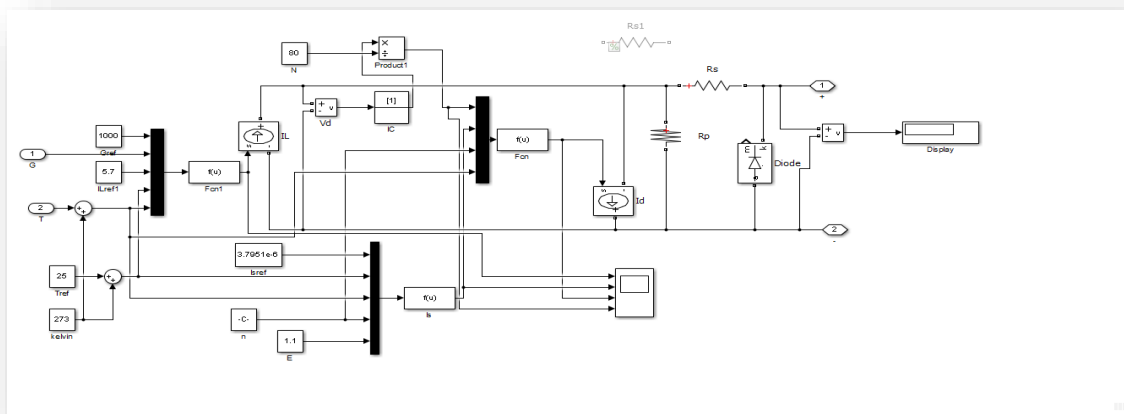


Figure II.12 : Bloc de la cellule solaire dans SIMULINK.

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur la **Figure II.13.a** et **Figure II.13.b**, pour l'éclairement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température 25°C .

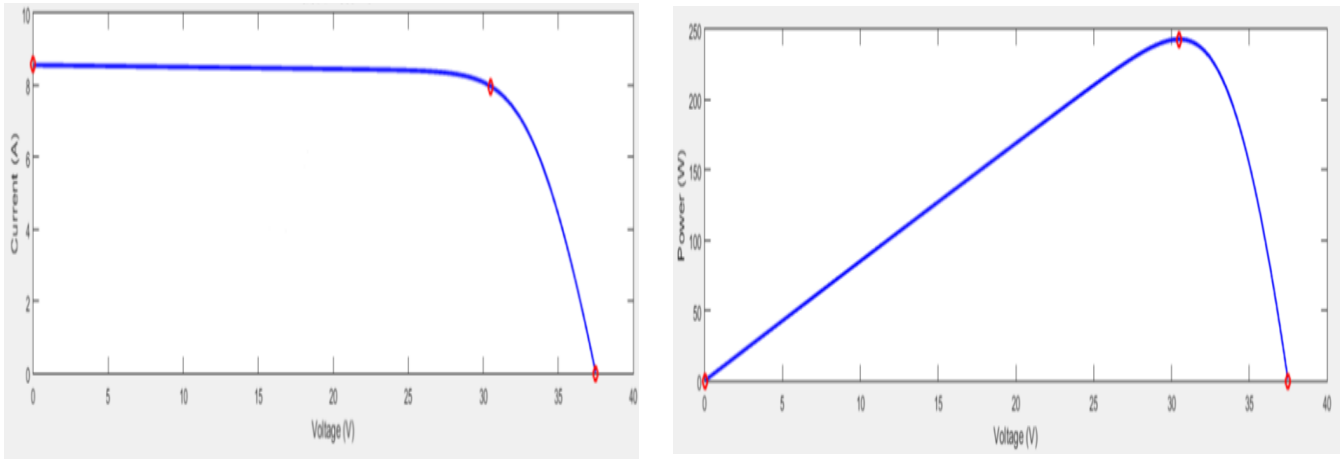


Figure II.13.a Caractéristique $I=f(V)$ de la cellule. **Figure II.13.b** Caractéristique $P=f(V)$ de la cellule.

D'après ces résultats de simulation, on peut constater que cette cellule à :

- Courant de court-circuit $I_{CC} = 8,56 \text{ A}$.
- Tension de circuit ouvert $V_{CO} = 37,5 \text{ v}$.
- Puissance maximale $P_m = 243 \text{ w}$.

II.6.3 Convertisseur DC-DC (Hacheur survolteur) :



Figure II.14 : Bloc de convertisseur.

Le hacheur ou convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs

commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Le convertisseur dévolteur survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

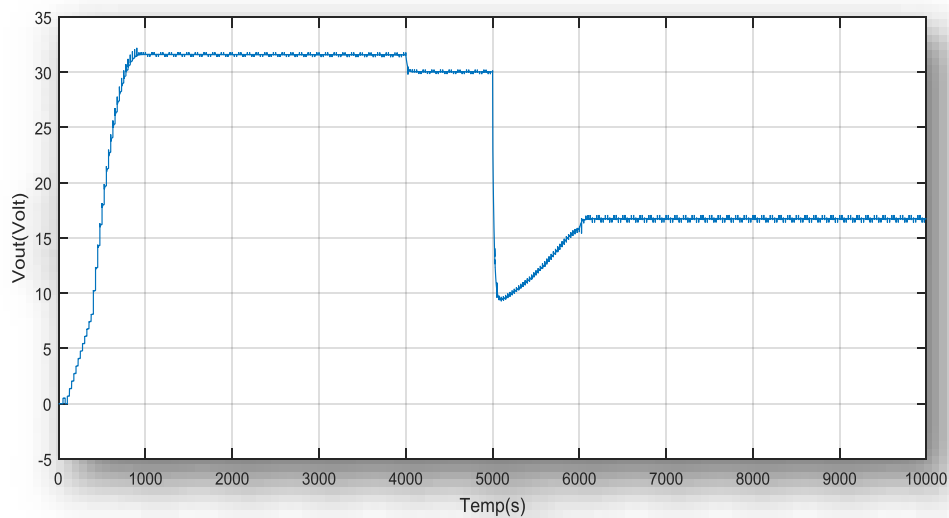


Figure II.15 : La tension de sortie du hacheur.

Deux types de topologies des convertisseurs DC-DC, convertisseur Buck et convertisseur « boost », qui sont les plus généralement employés par la majorité des concepteurs du suiveur de puissance maximum.

Dans le travail actuel, le convertisseur « boost » est choisi puisqu'il a d'excellentes caractéristiques telles que les possibilités des tensions élevées et de rendement important, la petite taille et le bas prix.

À la sortie du hacheur cette tension deviendra : $V_{out} \approx 35$ v au début après elle se stabilise en environs $V_{out} \approx 15$ v.

II.6.3.1 la pompe :

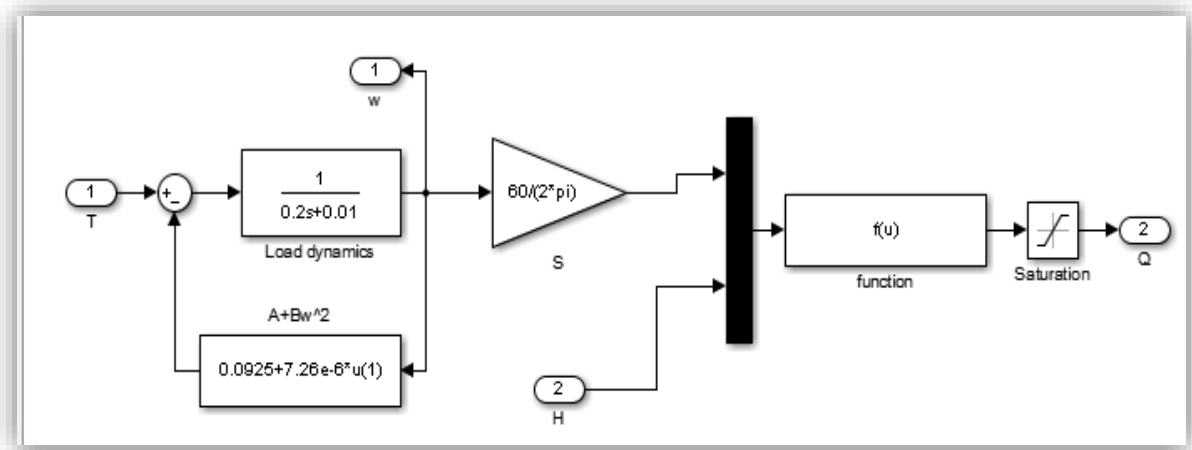


Figure II.16: Bloc Simulink water pompe.

II.7 Les résultats de la simulation :

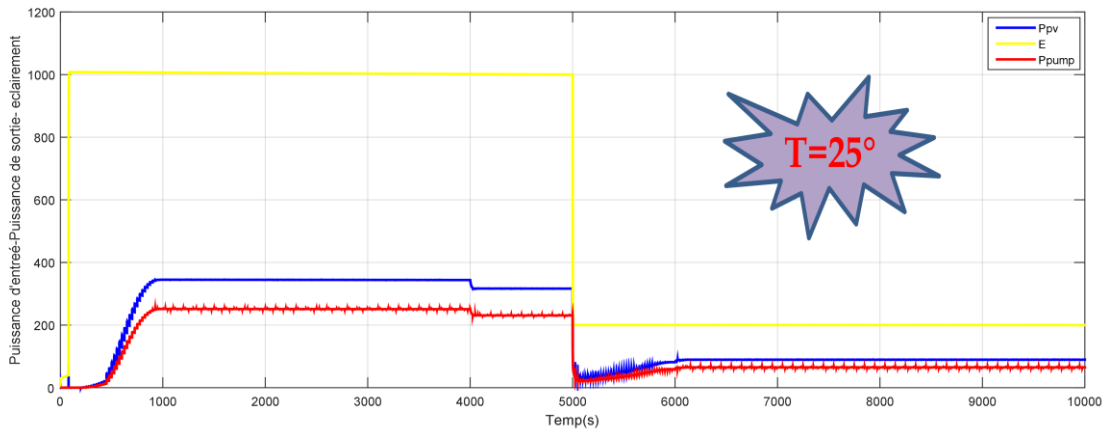


Figure II.17 : la réponse de puissance pour éclairement $E = 1000 \text{ w/m}^2$

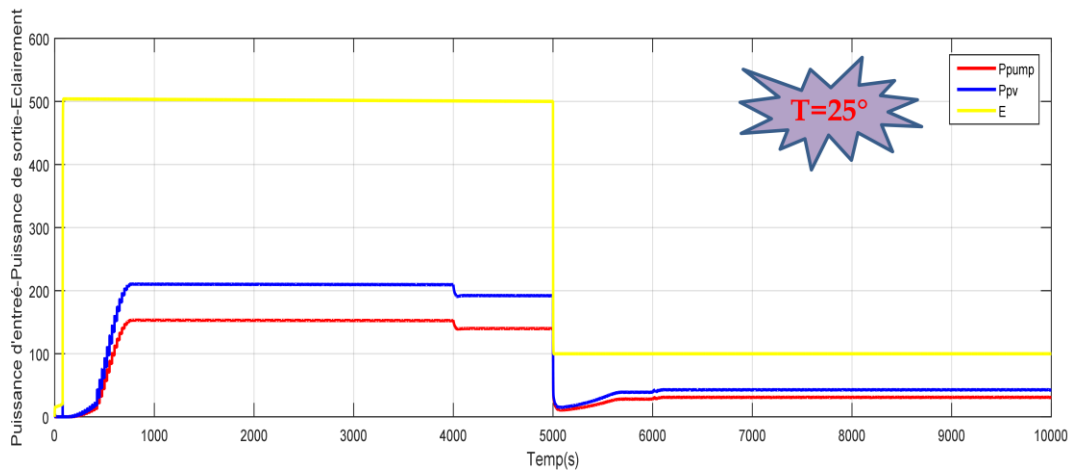


Figure II.18 : la réponse de puissance E/S pour éclairement $E = 500 \text{ w/m}^2$

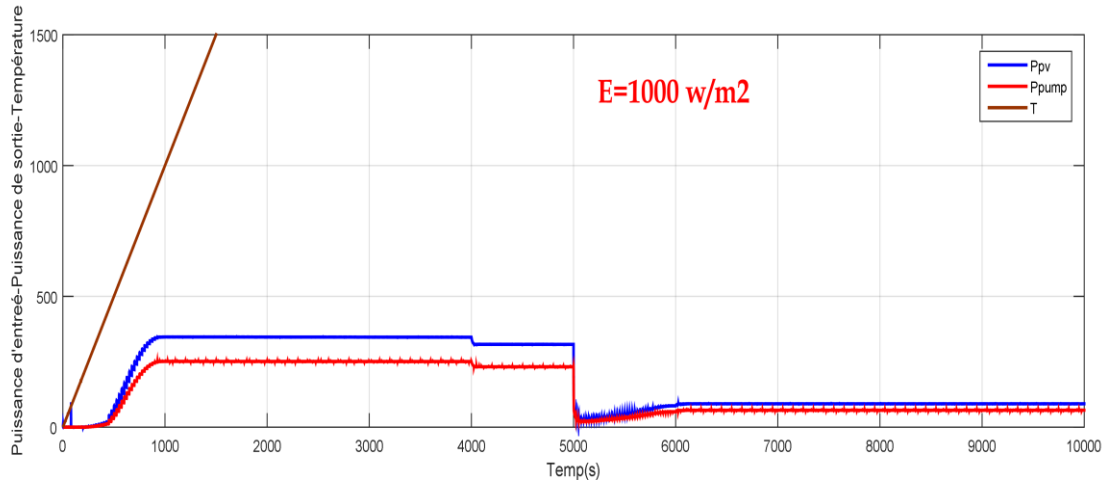


Figure II.19 : la réponse de puissance E/S pour température $T = 25^\circ$

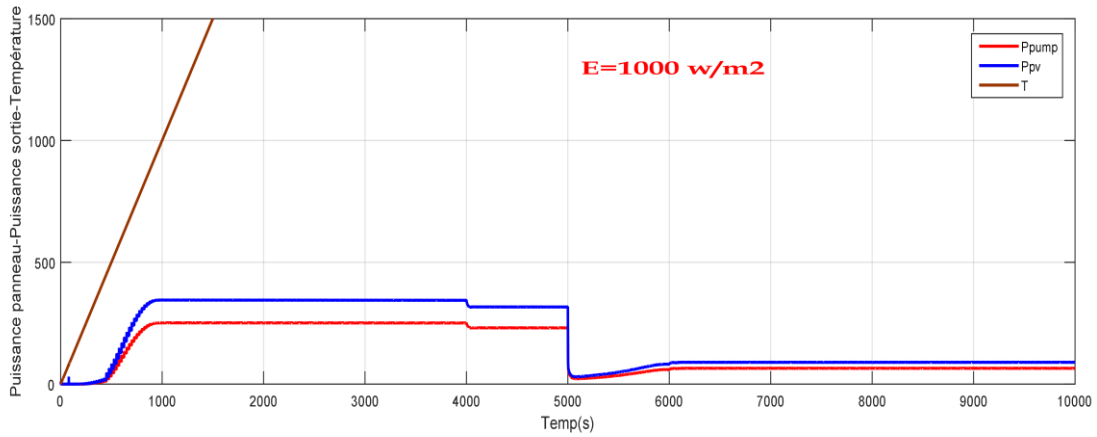


Figure II.20 : la réponse de puissance E/S pour température $T = 75^\circ$

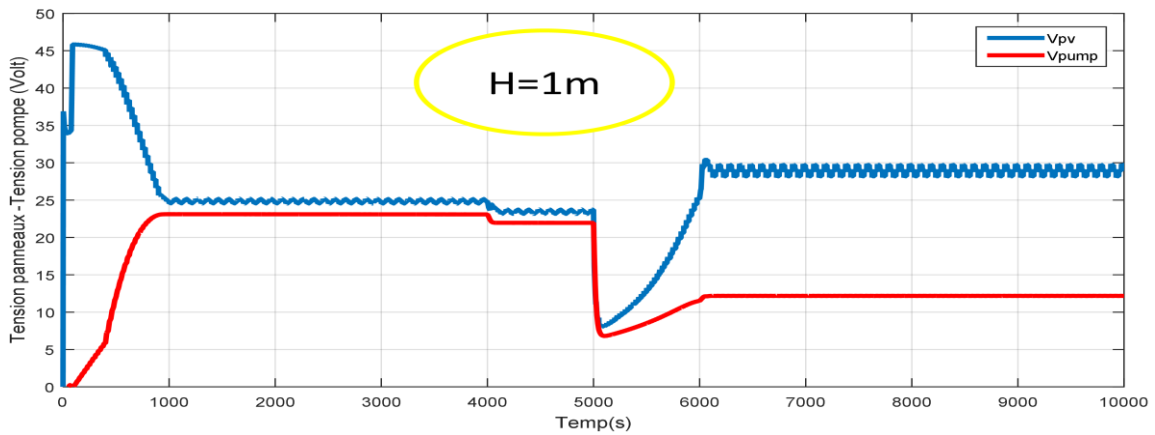


Figure II.21 : la réponse tension d'entrée et sortie de la pompe.

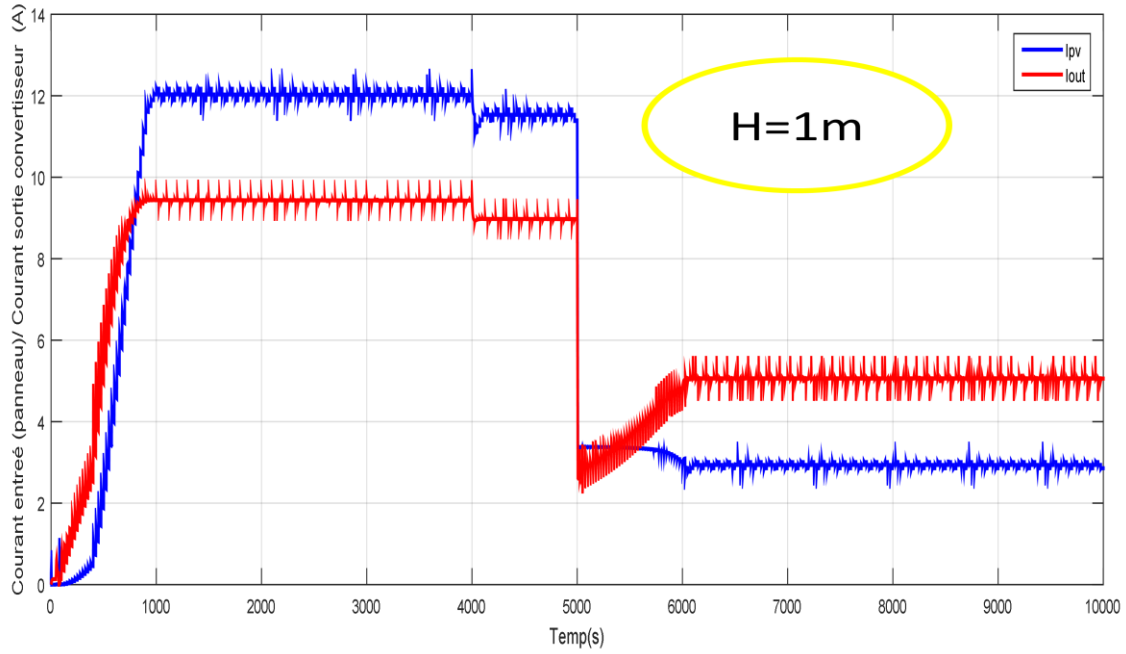


Figure II.22 : la réponse courant d'entrée et sortie de convertisseur.

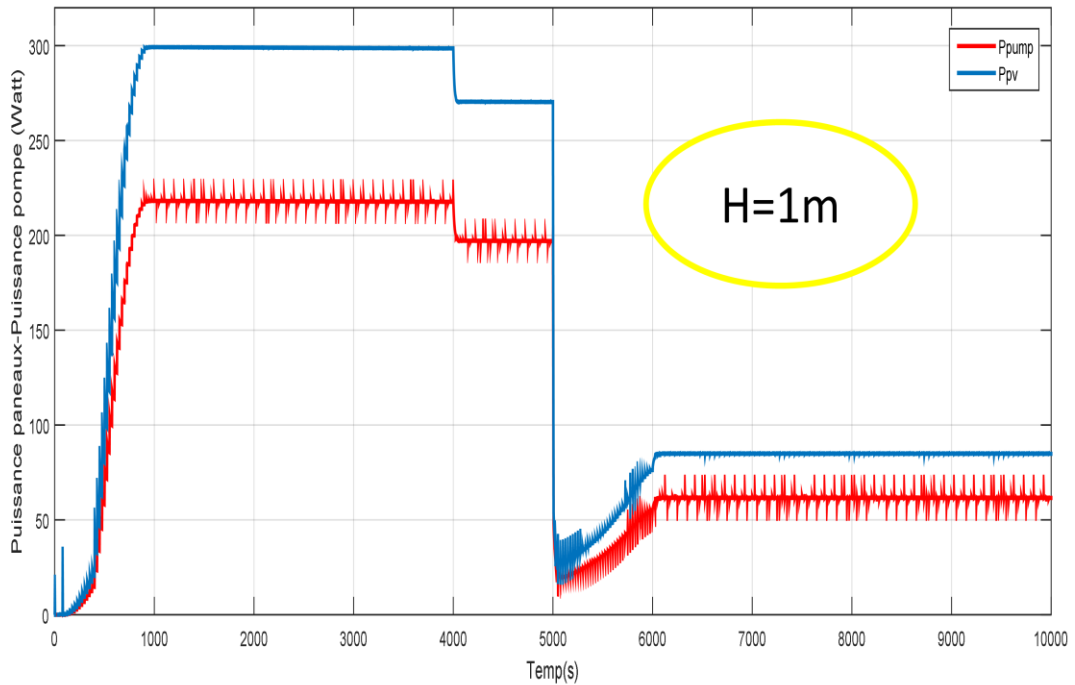


Figure II.23 : Réponses de la puissance P_{PV} et de puissance à la sortie.

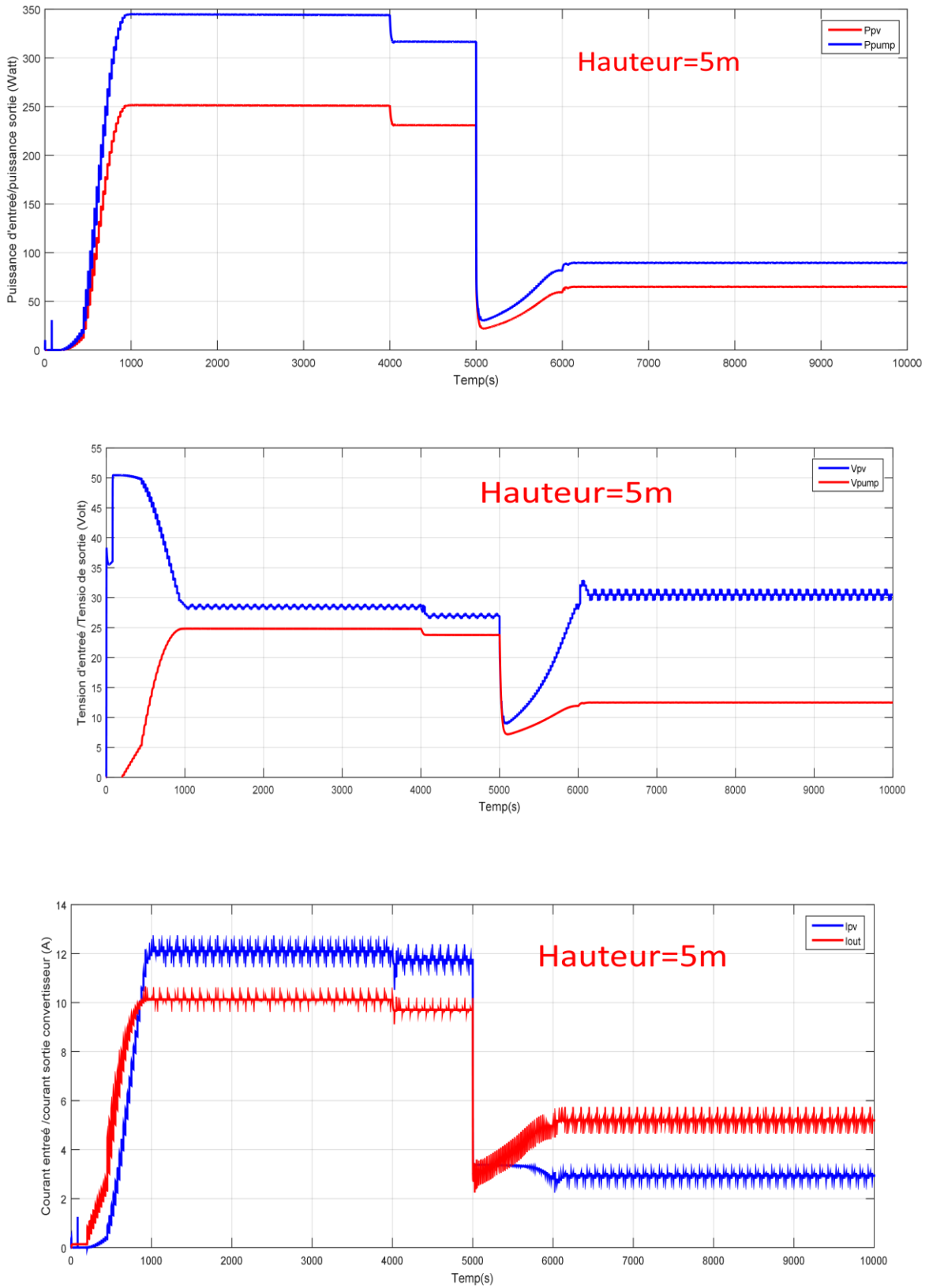


Figure II.24 : les Réponses Puissance, tension courant E/S pour Hauteur 5m.

II.7.1 Interprétation des résultats :

On peut remarquer la performance de la commande MPPT pour différents éclairagements, ceci se traduit par la puissance du GPV qui suit à chaque fois la puissance idéale de ce dernier, mais entre la zone d'éclairement $E=1000\text{w/m}^2$ et $E=500\text{w/m}^2$ il y a un abaissement brusque de l'éclairement, alors la puissance du GPV tend vers zéro mais après des secondes elle se converge de nouveau vers la puissance idéale, ceci est un inconvénient de la commande MPPT.

Il Ya un changement de la hauteur, on peut remarquer le débit de la pompe diminuée car augmente la puissance et consomme un courant élevé.

Et la technique MPPT cherche toujours le pion maximum de la puissance donc la pompe il est arrête.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur et commande MPPT est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits sur la base des modèles mathématiques.

La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les modules solaires, avoir leurs caractéristiques et voire la performance de la commande MPPT, qui force le système PV à travailler autour de sa puissance maximale.



Chapitre III



Essai expérimentale d'un système pompage photovoltaïque sous Matlab/dSpace 1104

III.1. Introduction :

Un prototype de laboratoire d'un système PV a été mis en place afin de valider les algorithmes étudiés. Le banc d'essai expérimental, illustré à la figure III.1, est constitué de trois panneaux photovoltaïque, un onduleur Semikron avec sa carte de contrôle servant de convertisseur boost, une pompe immergée à courant continu, un dSPACE DS 1104 capteurs de système, de courant et de tension. Le schéma de contrôle a été mis en œuvre en temps réel via système dSPACE DS 1104 via Matlab/Simulink®. Les paramètres du système (module PV et convertisseur Boost) utilisés dans l'expérience sont les mêmes que ceux utilisés dans la simulation, car indiqué dans l'annexe. Le temps d'échantillonnage des différents algorithmes MPPT est de 1 ms. Le système expérimental est testé sous différents changements d'éclairement, tandis que la température est considérée comme constante (25°C).

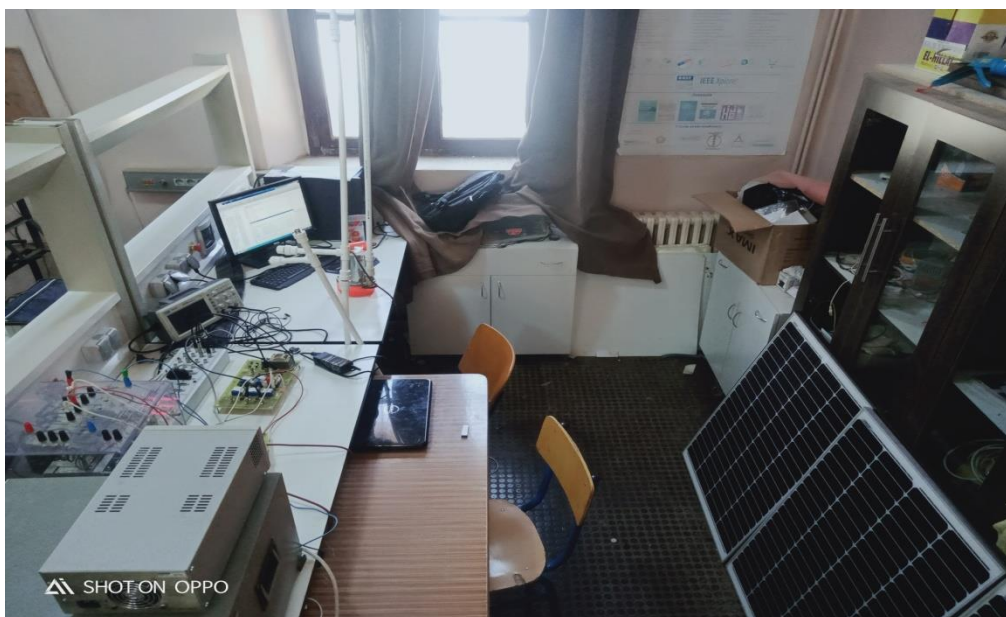


Figure III.1 : Aperçu du banc d'essai expérimental.

III.2. Description du système :

« L'eau solaire » consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe

électrique permettant d'assurer l'exhaure de l'eau. Le plus souvent utilisée dans les zones rurales non desservies par le réseau électrique, l'énergie solaire est depuis plusieurs années déjà une alternative à l'énergie « thermique » (produite au moyen d'un groupe électrogène) pour faire fonctionner les systèmes de pompage. L'énergie solaire n'est disponible que 6 heures par jour environ, elle atteint son intensité maximale au zénith. C'est pourquoi on parle de pompage « au fil du soleil ».

Un système de pompage photovoltaïque est constitué de :

- Un générateur lui-même composé de modules photovoltaïques, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu.
- Il comporte aussi une structure métallique pour supporter l'ensemble.
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur (onduleur), capable de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire, elle-même fonction de l'irradiation solaire qu'il reçoit.
- Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur électrique à induction et d'une pompe centrifuge ou volumétrique.
- Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.
- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau de sa source (souvent un puits ou un forage), jusqu'à un réservoir de stockage.

III.2.1. Un générateur PV :

Un panneau solaire est un dispositif plat d'environ 1 m^2 qui s'installe sur votre toiture. Il est destiné à récupérer l'énergie du rayonnement solaire pour la transformer en chaleur.



Figure III.2 : générateur PV [100W ,24v]

III.2.2. Capteur de tension ou de courant :

Ces capteurs sont conçus pour mesurer la tension d'entrée et la tension de sortie de l'onduleur et pour mesurer le délivrer par l'alimentation. Ils reposent sur le principe à effet HALL



Figure III.3 : Capteur de tension et de courant.

III.2.3 Carte de la mesure1104 :

Carte dSPACE Le pilotage en temps réel des systèmes continus se fait à l'aide d'un PC connecté à la carte dSPACE DS1104. La programmation se fait à l'aide de l'outil de modélisation SIMULINK, qui aide à poser le problème d'une manière graphique en utilisant les blocs interconnectés. En fait, beaucoup de systèmes de développement en temps réel à base de DSP viennent maintenant avec une interface à Simulink par laquelle ils peuvent convertir les blocs de Simulink en un code machine qui peut être exécuté sur un système à base de DSP. Ceci réduit considérablement le temps de développement et de prototypage pour le control des systèmes. Le prototypage passe alors par trois étapes :

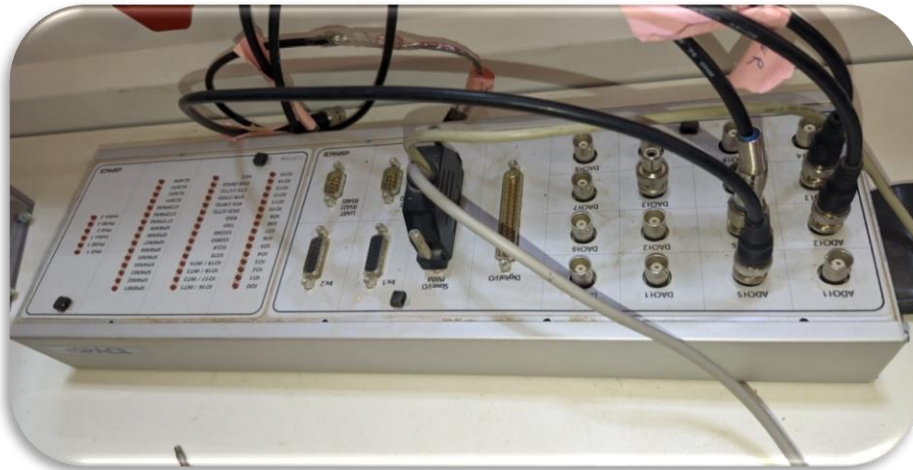


Figure III.4 : Carte de la mesure1104

1. Construction du système de commande en utilisant les blocs de Simulink.
2. Simulation du système pour voir les résultats dans différents scénarios.
3. Exécution du modèle en temps réel à travers la carte DS110 .

III.3 Les résultats expérimentale avec Matlab /dSPACE :

Dans cette section, nous allons vérifier les performances de contrôle qui a été proposé dans ce travail. Pour cela nous allons utiliser le système de

contrôle en temps réel basé sur DS1104 de dSPACE. Cette plateforme de contrôle fournit des bibliothèques pour établir la communication avec l'environnement MATLABM / Simulink. Les bibliothèques dSPACE vous permettent d'inclure des blocs d'E / S qui communiquent avec les diagrammes SIMULINK afin que les blocs d'entrée vous permettent d'obtenir des signaux du système réel contrôlé et que les blocs de sortie vous permettent d'envoyer des signaux au système contrôlé.

Les diagrammes SIMULINK peuvent être convertis en code C à l'aide de la boîte à outils Real-Time Workshop (RTW). Ce code C est compilé et un exécutable est envoyé au processeur de signal numérique (DSP) intégré dans la carte DS1104 qui est en charge de l'exécution de l'algorithme de contrôle en temps réel. Le logiciel fourni par dSPACE comprend une interface graphique appelée Control Desk qui permet la surveillance et le contrôle en temps réel et montre l'évaluation de la nouvelle modélisation de P&O MPPT. Ce logiciel permet également d'enregistrer les résultats des tests expérimentaux effectués dans des fichiers de données qui pourront ensuite être traités et représentés graphiquement dans l'environnement MATLABM.

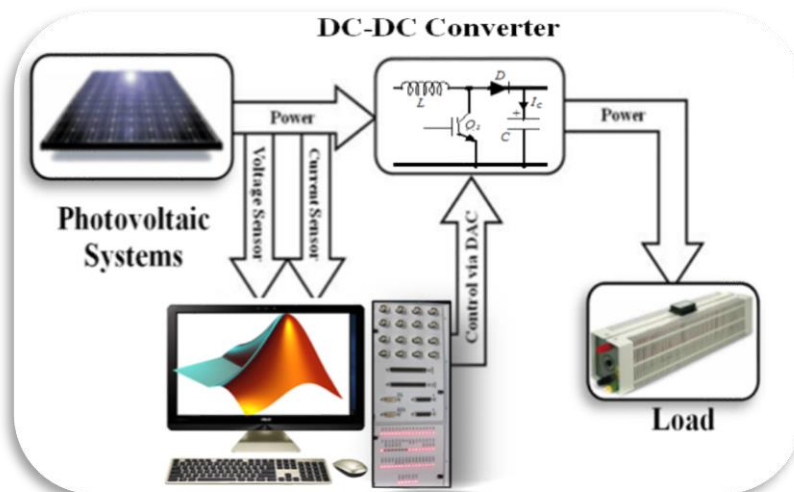


Figure (III.5) Schéma fonctionnel de la configuration matérielle

La figure V.5 montre le schéma fonctionnel de la configuration matérielle où vous pouvez voir les panneaux PV, le convertisseur DC-DC, la plate-forme de contrôle DS1104 et la charge résistive connectée au système.

Le condensateur C assure une plus grande stabilité du point de fonctionnement statique du générateur photovoltaïque.

La figure III.6 montre le schéma de principe SIMULINK du schéma de commande proposé qui a été implémenté sur la carte de contrôle en temps réel DS1104. Le solveur est ode1 (Euler), la taille du pas est 10^{-4} et la fréquence de l'horloge matérielle : CPU clock : 250 MHz. Comme on peut le voir sur ce diagramme, la tension et le courant mesurés directement du générateur PV par les canaux C5 et C6, où le modèle de MPP est développé pour générer la sortie de contrôle, qui sera le rapport cyclique approprié D de sorte que le convertisseur DC-DC fournit une valeur appropriée de la résistance de charge du PV que les panneaux fonctionnent dans le point de maximisation « MPP ». Comme on peut le voir sur le schéma, la sortie du MPPT est envoyée au bloc DSP PWM DS1104SL, qui est responsable de la génération d'un signal PWM avec le rapport cyclique qui lui est envoyé par le MPPT.

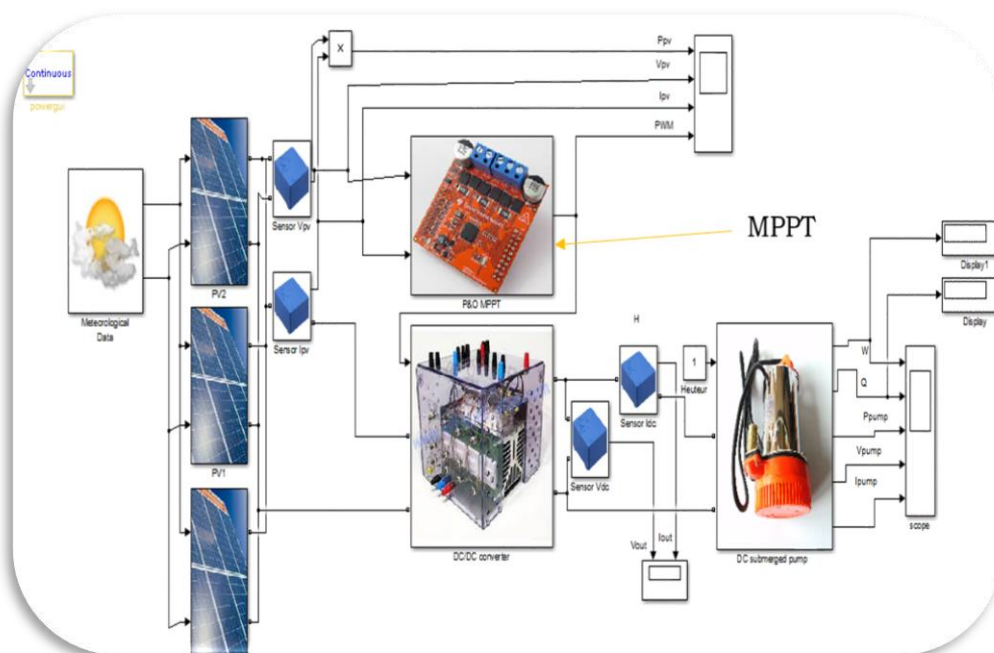


Figure III.6 : Schéma bloc de système de pompage photovoltaïque.

Teste de robustesse :

A. Variation de charge résistive

Les figures dans (III.7) représentent les caractéristiques I-V et P-V et montrent l'impact de la variation de charge $R_{1, 2, 3} = [11, 4, 2] \Omega$. Dans cette condition, notre algorithme converge vers différents points de fonctionnement du système PV pour chaque variation de valeur de la charge.

Les figures dans III.8 représentent respectivement la variation de courant, de puissance et de la tension du système PV avec variation de charge résistive. Cette variation impliquera un changement rapide de la tension optimale du panneau et l'algorithme MPPT réagit dans un comportement rapide et cohérent. Equipé d'un convertisseur élévateur « Boost » et d'un changement de charge, le système essaie de trouver la puissance maximum pour chaque variation. L'algorithme MPPT donne le rapport cyclique approprié D appliqué au PWM pour faire l'impulsion du commutateur d'amplification, de sorte que la puissance réelle soit augmentée pour fonctionner dans MPP.

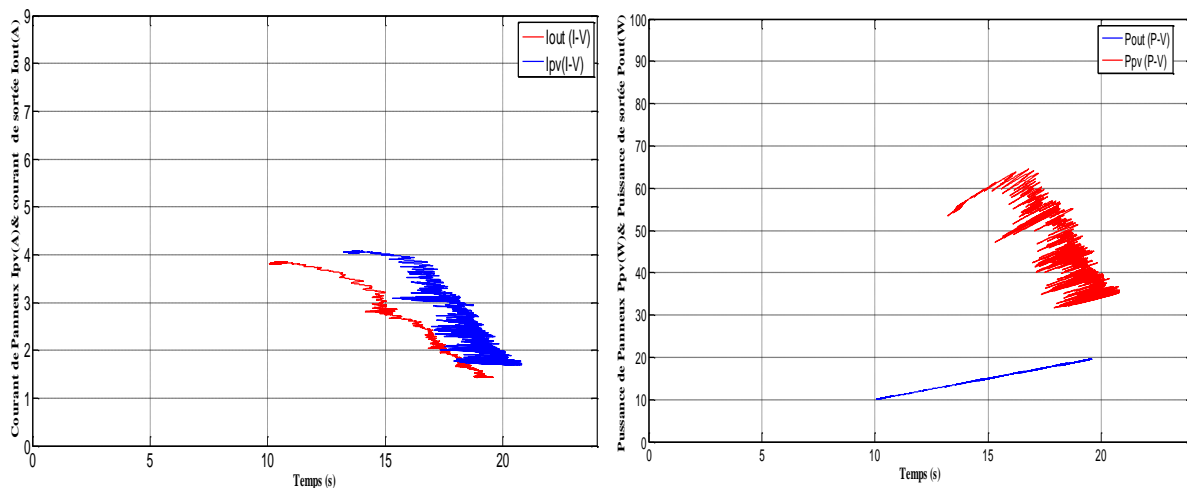


Figure III.7 : Caractéristiques I-V et P-V

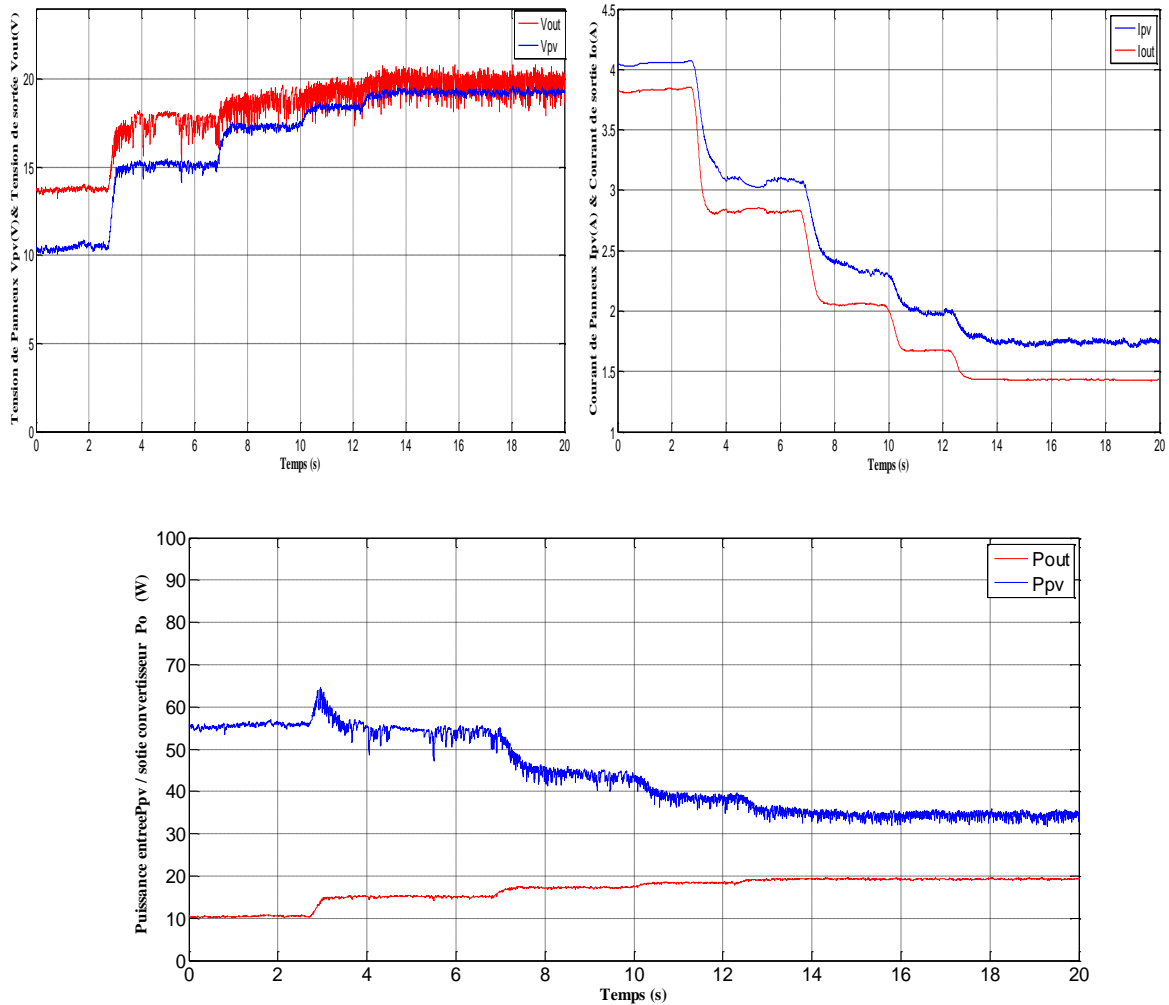


Figure III.8 : Réponses de la tension et du courant et la puissance, pour une variation de charge résistive.

B. Variation de hauteur manométrique totale (HMT)

D'après la Figure 9, nous avons évalué l'efficacité (performance) de chaque sous-système, et en déduisant celle du l'ensemble du système.

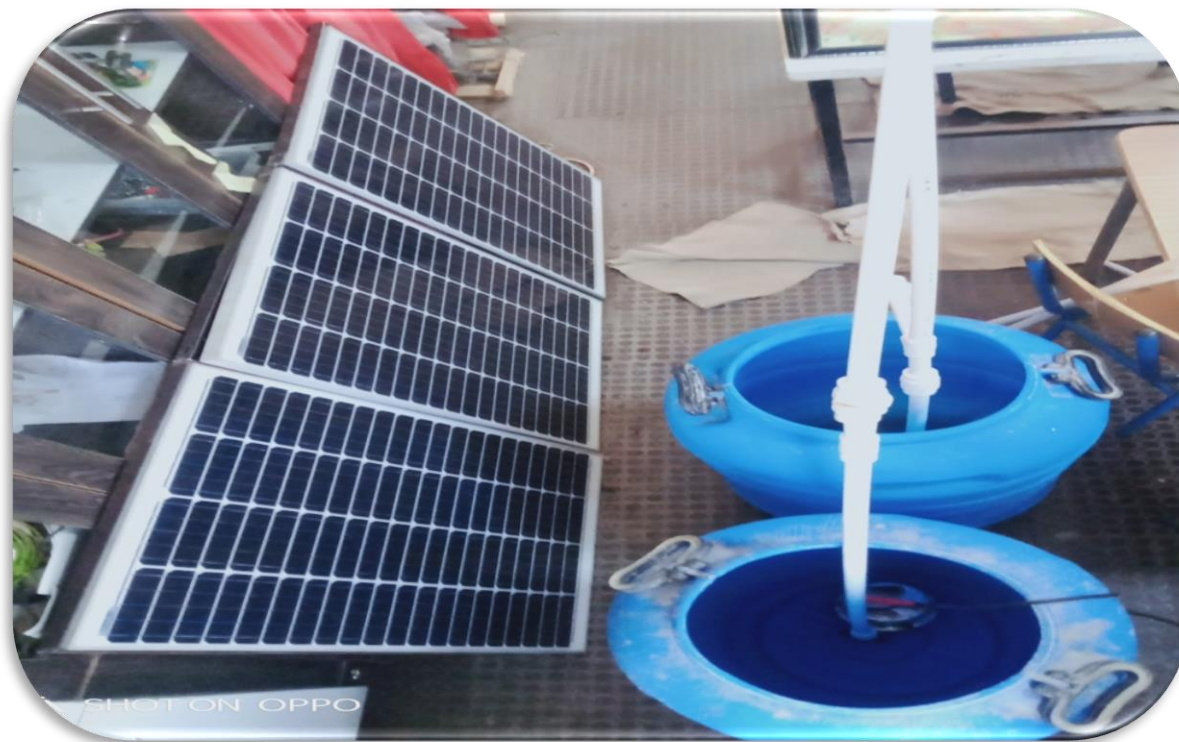


Figure III.9 : Test de pompe avec un de hauteur manométrique totale (HMT) qui peut mesurer jusqu'à 6 m.

On constate que l'efficacité de conversion PV est presque constante avec la variation de l'irradiance solaire. On observe également que le convertisseur de puissance DC/DC l'efficacité est constante quelle que soit la variation des paramètres, de sorte qu'elle n'affecte pas les performances globales du système. D'autre part, on constate que les performances du système motopompe sont trop sensibles pour tous les paramètres ; hauteur manométrique totale (HMT), paramètres des conditions météorologiques ; surtout que l'irradiance solaire variantes. Parce que ce dernier génère un courant important qui est proportionnel au débit d'eau pompé par moyen du couple moteur. Ainsi, lorsque l'irradiance solaire est importante, le rendement hydraulique diminue ; parce que le les pertes de la charge hydraulique sont importantes. De plus, lorsque le débit est important, les pertes de charges hydrauliques sont importantes, car d'autre part, la perte hydraulique est proportionnelle au débit. De plus, ces hydrauliques les

pertes augmentent lorsque le HMT est important, ou lorsque le type de canalisations hydrauliques utilisées a un coefficient de perte important.

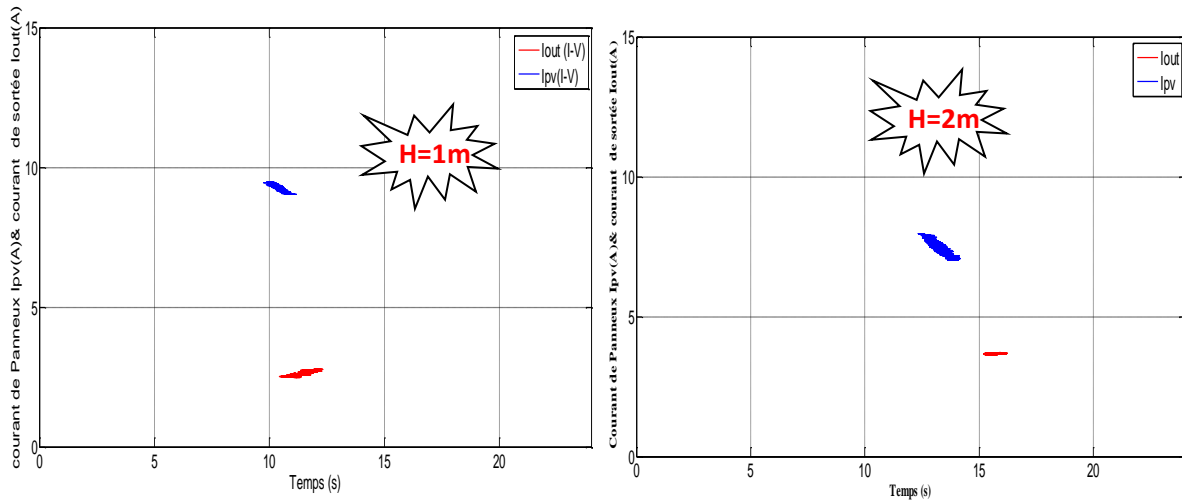


Figure III.10 : Caractéristiques I-V

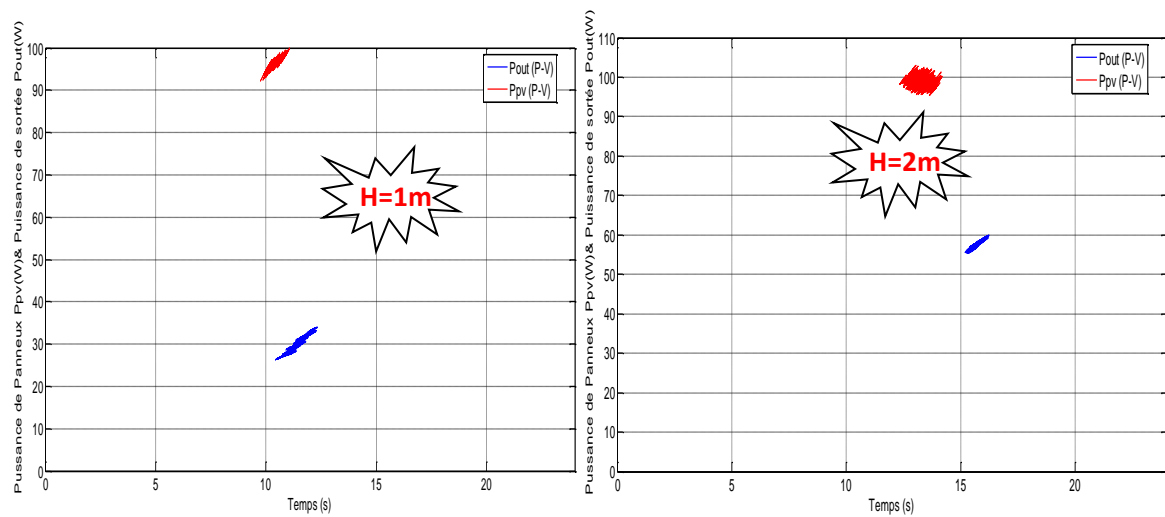


Figure III.11 : Caractéristiques P-V

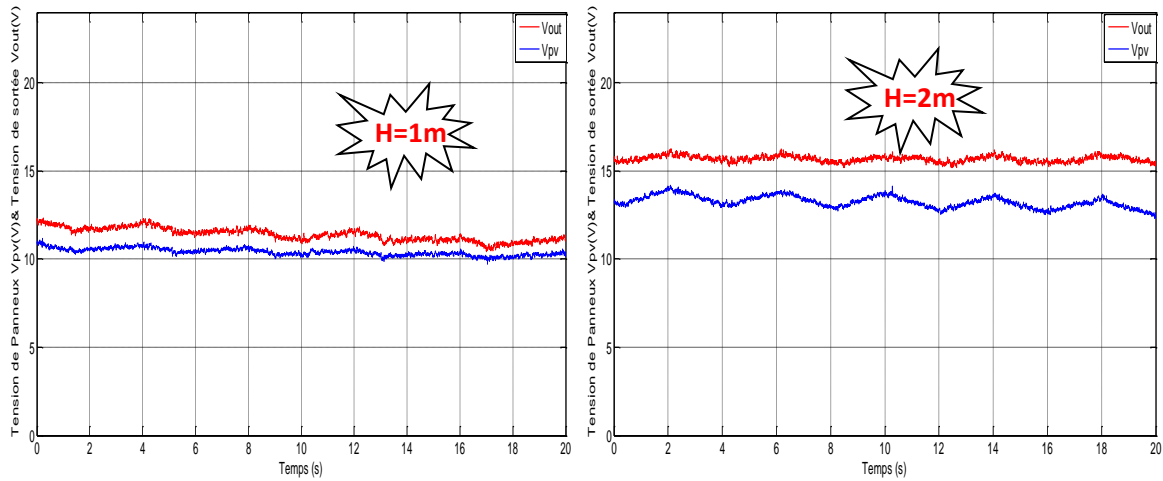


Figure III.12 : Réponses de la tension V_{PV} et de tension à la sortie de convertisseur DC/DC

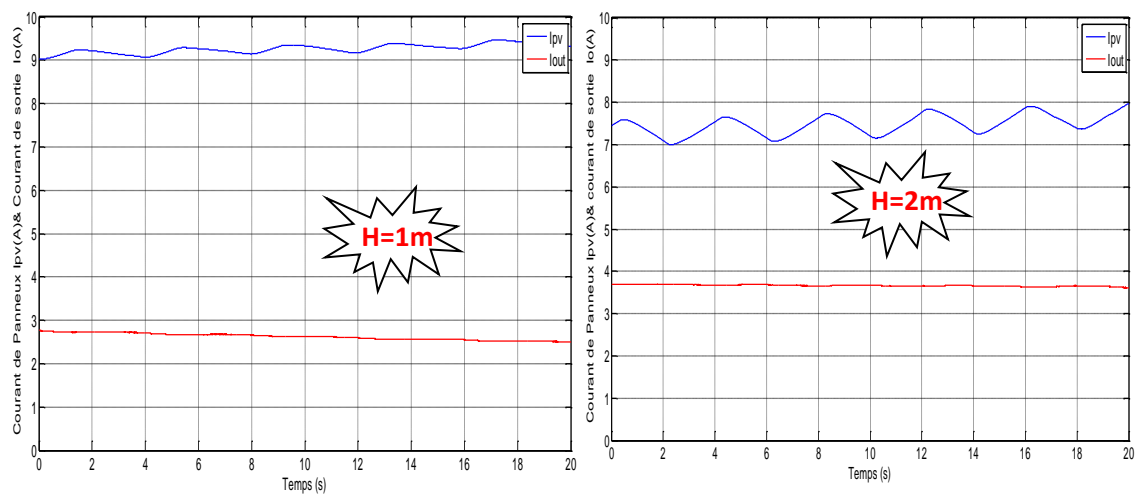


Figure III.13 : Réponses de la courant IPV et de courant à la sortie de convertisseur DC/DC

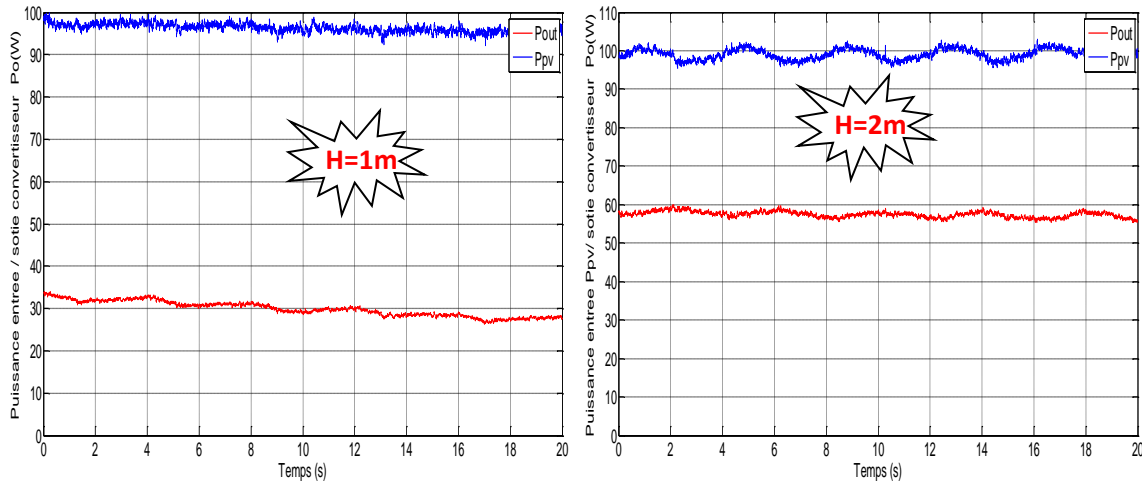


Figure III.14 : Réponses de la puissance P_{PV} et la puissance de sortie de convertisseur DC/DC

III.4.Conclusion

La non-linéarité des caractéristiques délivrées par les panneaux photovoltaïque ont un seul point où le système est optimal (MPP), ce point est sensible aux conditions climatiques (irradiance solaire, et température ambiante). D'où il est obligatoire d'introduire un convertisseur de puissance DC/DC contrôlé par la technique MPPT, ce contrôleur joue le rôle d'optimisation du système, le choix du type de convertisseur de puissance DC/DC est justifié. Nous avons vu que le débit d'eau pompée est sensible aux variations des conditions météorologiques, notamment qui de l'irradiation, donc ce débit est en même temps trop sensible au HMT. Pour évaluer les performances du système de pompage PV global, nous choisissons de déterminer les performances de chaque sous-système qui composent ce système, avec des circonstances différentes (différents paramètres climatiques et physiques), par en déduisant le rendement global du système, et que ce dernier est très sensible à l'irradiance solaire et qu'il ne dépasser 20 %.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avérée une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients. Ce mémoire s'agit d'une contribution à l'optimisation de l'ensemble composé de : le hacheur, le moteur et la pompe qui sont reliés à un générateur solaire.

Cette étude couvre, en détail, les caractéristiques du générateur photovoltaïque et de ses applications dans un secteur rural tel que les systèmes autonomes ou dans la ville comme dans le cas des systèmes connectés au réseau. La technique d'algorithme d'optimisation du générateur solaire, qui a été étudiée est la perturbation et l'observation (P&O), elle est généralement utilisée par les concepteurs de suivi de point de puissance maximum (MPPT), mais elle souffre de quelques inconvénients, du point de vue de l'exécution ou dans le processus de poursuite.

En outre, la modélisation et la simulation de différents sous-ensembles de l'ensemble composé de : le hacheur, le moteur et la pompe branchés sur un générateur photovoltaïque, dans l'environnement de programmation de MATLAB /SIMULINK ont été développées. Les résultats de simulation ont montré l'évolution de tous les paramètres de chaque sous-ensemble aussi bien que le système entier.

Le Boost représente un sous-ensemble important pour entraîner le moteur à courant continu alimenté par un générateur photovoltaïque. Plusieurs techniques des commandes de l'hacheur existent dans la

littérature pour la commande d'élevateur (boost). Pour l'optimisation de le hacheur conçu et réalisé, une technique MLI est adoptée puisqu'elle n'est pas difficile à mettre en application.

L'algorithme MPPT est ensuite implémenté expérimentalement. Les résultats pratiques montrent comment cette méthode suit le MPP de manière efficace et précise. Les résultats indiquent que le poursuit MPP conçu avec cette méthode est capable de suivre la puissance maximale du module PV et donc d'améliorer l'efficacité du système PV.

D'autre part, on à constater que les performances du système motopompe sont trop sensibles pour tous les paramètres ; hauteur manométrique totale (HMT), paramètres des conditions météorologiques ; surtout que la variation d'irradiation solaire. Parce que ce dernier génère un courant important qui est proportionnel au débit d'eau pompé par moyen du couple moteur. Ainsi, lorsque l'irradiation solaire est importante, le rendement hydraulique diminue ; parce que le les pertes de la charge hydraulique sont importantes. De plus, lorsque le débit est important, les pertes de charges hydrauliques sont importantes, car d'autre part, la perte hydraulique est proportionnelle au débit. De plus, ces hydrauliques les pertes augmentent lorsque le HMT est important, ou lorsque le type de canalisations hydrauliques utilisées a un coefficient de perte important.

Les résultats obtenus par simulation montrent qu'il est possible de régler convenablement l'adaptation MPPT.

Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- ❖ L'optimisation de système de pompage photovoltaïque par des autres techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous.
- ❖ Développer des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV et la charge. Par ailleurs, l'amélioration du bilan énergétique.

Bibliographie

- [1] : A.Hamidat, « *Simulation des systèmes de pompage photovoltaïques destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation* », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen 2004.
- [2] : S.Aminata, « *Simulation du système hybrides Photovoltaïque* » Thèse de Doctorat, Canada, 1998.
- [3] : Iqbal M. "An introduction to solar radiation". Academic Press, New York, 1983, 390 p.
- [4] : Kreith F., Kreider JF."Principles of solar engineering" . McGraw-Hill; New York, 1978, 230 p.
- [5] : ZEGHIB Ilhem, « *Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire Parabolique* » Mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, 2005.
- [6] : BRIHMAT Fouzia, « *étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/éolien* », Mémoire d'Ingénieur, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [7] : « Bessam-Abdelghani » ***Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque***
- [8] : R.P.Mukund, « *Wind and solar Power Systems* », Ph.D,P.e Université merchant Marine, 1999.
- [9] : D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « *Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools* » PV Horizon,ARTICLE PDF, Canada, 2001.
- [10] : A. buyers « *Les systèmes photovoltaïques* » guide,Article, Canada, 2002.
- [11] : D.Thévenard, and M.Ross « *Validation and Verification of Component Models and System Models for the PV* », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [12] : F.Benyarou « *Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation* », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen, Juillet 2004.
- [13] : A. Rufer, P. Barrade, « *Cours d'électronique de puissance : Conversion DC/DC* », Laboratoire d'électronique industrielle, Ecole

- Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. photovoltaïque dans un village solaire». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [14] : M. Arrouf : « Optimisation d l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [15] : F.Z Zerhouni, « *Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque* », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996..
- [16] : <https://www.amazon.fr/immerg%C3%A9-domestique-%C3%A9lectrique-inoxydable-jardinage/dp/B07YN15CF9>
- [17] : « SI/STI2D» *Le moteur à courant continu Modélisation causale*
- [18] : « Kedjough Ismail Khattab Redouane » **Etude, Conception et simulation d'une pompe centrifuge .**
- [19] : L. Zarour : « Étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseaux», Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [20] : A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance : Conversion DC/DC », Laboratoire d'électronique industrielle, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- [21] : R. K. Srivastava et all: « PM enhanced sensing of internal EMF variation – a tool to study PMSBLDC/AC motors», International journal on smart sensing and intelligent systems, VOL. 6, NO. 4, September 2013.
- [22] : K. Jois et all: « implementation of BLDC motor drive for automotive water pump». International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology, Volume 1, Issue 1, March, 2013.

Annexes

Annexe 1 : Paramètres caractéristiques du générateur PV et du groupe motopompe

➤ **Module photovoltaïque : « Shell SP 75 »**

Température aux conditions standard	$T = 25^{\circ} \text{C}$
Eclairement aux conditions standard	$E = 1000 \text{ W/m}^2$
Tension de circuit ouvert	$V_{co} = 23,2 \text{ V}$
Courant de court-circuit	$I_{cc} = 5,72 \text{ A}$
Puissance maximale	$Pm = 100 \text{ W}$
Tension au point de la puissance maximale	$Vm = 19,6 \text{ V}$
Courant au point de la puissance maximale	$Im = 5,37 \text{ A}$
Longueur	$L = 1200 \text{ mm}$
Largeur	$A = 527 \text{ mm}$
Epaisseur	$E = 56 \text{ mm}$
Poids	$Pd = 7.6 \text{ Kg}$

➤ **Pompe immergée DC « Yanmis »**

✓ **Performances de la pompe :**

➤ Débit maximal	$Q_{max} = 120 \text{ l/h}$
➤ Tension maximal	$V_m = 24 \text{ v.}$
➤ Puissance moteur	$P_m = 240 \text{ w.}$

Marque	Yanmis
Matériau	Acier
Dimensions de l'article L x l x H	20 x 8 x 8 centimètres
Poids	5.84 Ivres