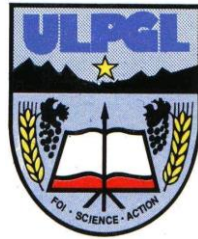


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

DOMAINE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE DE SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE



B.P. 368 GOMA

www.ulpgl.goma

**ETUDE ET CONCEPTION D'UN
REGULATEUR SOLAIRE AVEC LA
COMMANDE MPPT : Cas de l'algorithme
Perturb and Observe**

Par **MUHAWE BATARIRA Enock**

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention
d'un diplôme de Bachelor en Sciences de l'ingénieur

Option : Génie électrique

Directeur : CT. Ir. Dieudonné MUSONGYA

Encadreur : Msc. Ir. Bertille MUSHAGASHA

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

Epigraphe

« L'Éternel est mon berger, je ne manquerai de rien. Il me fait reposer dans de verts pâturages, il me dirige près des eaux paisibles. »

Psaumes 23 :1-2 Bible (LSV)

Dédicaces

À mes très chers parents BATARIRA Jean-Marie et N'BIKARI Brigitte

MUHAWE BATARIRA Enoch

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu tout Puissant pour la grâce et l'amour qu'il nous témoigne tous les jours de notre vie.

Nos remerciements s'adressent à notre Directeur CT. Ir. Dieudonné MUSONGYA BISIMWA et notre Encadreur le Msc. Ir. Bertille MUSHAGASHA, pour le suivi et la patience qu'ils nous ont accordés durant ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent à notre chère institution l'ULPGL/Goma, particulièrement au personnel de la filière des Sciences de l'ingénieur, pour leurs efforts afin de nous offrir un apprentissage de qualité tout au long de notre cycle.

Pour leur soutien sans faille, nous remercions nos parents BATARIRA Jean-Marie et N'BIKARI Brigitte qui ont consenti beaucoup d'efforts afin de faire de nous un homme et mener à bien le présent travail.

À mes frères et sœurs BATARIRA Exaucé, BATARIRA Prisca, BATARIRA Redempta, BATARIRA Miradi, INGABIRE Solange ; nous disons merci pour leur soutien et l'amour nous témoignés.

Enfin à tous nos frères, sœurs, ami(e)s dont les noms n'ont pas été repris, qu'ils retrouvent ici l'expression de notre gratitude et de nos remerciements les plus sincères.

MUHAWWE BATARIRA Enoch

Résumé

L'énergie solaire présente l'avantage d'être disponible et renouvelable. Une de façon de l'exploiter afin de produire l'électricité passe par l'utilisation des cellules photovoltaïques. Ces dernières sont des sources non-linéaires et leur caractéristique courant-tension dépend beaucoup du niveau d'ensoleillement et de température ; d'où une variation continue du point de puissance maximale. Dans ce travail, un régulateur MPPT, basée sur l'utilisation d'un convertisseur DC-DC élévateur de tension et d'un microcontrôleur Arduino a été conçu pour améliorer l'efficacité de l'exploitation de l'énergie solaire par utilisation des cellules photovoltaïques. Pour assurer la poursuite du point de fonctionnement maximale, l'algorithme *Perturb and Observe* a été implémenté et la connexion Bluetooth a été utilisée afin d'afficher les paramètres du régulateur à distance sur une application mobile développée par MIT Invator App. Pour valider notre conception, une série de simulations avec les logiciels Matlab et Proteus a été réalisée avec un générateur photovoltaïque de 426 W et charge de 100 Ω .

Mots clés : Régulateur MPPT, Cellules photovoltaïques, Arduino, Matlab.

Abstract

Solar energy is great because it's available and renewable. One way to use it to make electricity is with photovoltaic cells. These cells are tricky because their electricity output changes a lot depending on how sunny it is and the temperature. This means their best power point keeps moving. In this project, we built a special controller called an MPPT controller. It uses a DC-DC converter to boost the voltage and an Arduino microcontroller to make the solar energy system work better. To keep the system working at its best power point, we used a method called Perturb and Observe. We also used Bluetooth to show the controller's information on a phone app we made with MIT App Inventor. To make sure our design works, we did a bunch of tests using computer programs called MATLAB and Proteus. We tested it with a 426W solar panel system and a 100 Ω load.

Keywords: MPPT regulator, Photovoltaic cells, Arduino, Mathlab.

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des abréviations	viii
Liste des tableaux	ix
Table des figures	x
Introduction générale	1
0.1 Contexte sur le thème	1
0.2. Identification et formulation du problème	2
0.3. Question de recherche	2
0.4. Formulation des hypothèses	2
0.5. Justification du choix du sujet et motivations	3
0.6. Énoncé des objectifs de recherche	3
0.7. Méthodologie et délimitation du travail	3
0.8. Subdivision du travail	4
Chapitre I. QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	5
I.1. Introduction	5
I.1.1. Cellule photovoltaïque	5
I.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	7
I.3 paramètres d'une cellule photovoltaïque	8
I.4. Les systèmes photovoltaïques	10
I.4.1. Module photovoltaïque	11
I.4.2. Générateur photovoltaïque	11
I.4.3. Les régulateurs	19
I.5. Conclusion partielle	20
Chapitre II. LIAISON AVEC LA CHARGE ET LA COMMANDE MPPT	21
II.0. Introduction	21
II.1. Etage d'adaptation	21
II.1.1. Liaison directe avec la charge	21

II.1.2. Liaison a l'intermédiaire de l'étage d'adaptation	22
II.2. Les convertisseurs DC-DC	24
II.2.1 Hacheur survolteur.....	24
II.3. Commande MPPT	27
II.3.1. Classification des commandes MPPT.....	29
II.3.2. Algorithmes de poursuite du point de puissance maximale	30
II.4. Conclusion partielle.....	35
Chapitre III. CONCEPTION DU RÉGULATEUR PV	36
III.1 Introduction	36
III.2 Schéma bloc	36
III.2. Caractéristiques du panneau solaire	36
III.3. Dimensionnement du convertisseur Boost.....	37
III.4. Implémentation de la commande P&O sur une carte Arduino	46
III.4.1. Présentation du microcontrôleur.....	46
III.4.2. Présentation de logiciel de conception, simulation et programmation.....	48
III.4.3 Présentation du logiciel de conception de l'application d'affichage.....	49
III.4.4 Schéma complet et éléments constitutifs.....	50
III.4.5 Description des principaux matériels utilisés	53
III.4.6 Présentation de résultats	58
III.4.7 Estimation du coût du regulateur.....	62
III.5. Conclusion partielle	62
CONCLUSION GÉNÉRALE	63
Bibliographie.....	64

Liste des abréviations

DC	Direct curent
FCC	Mesure d'une fraction de courant
FCO	Mesure d'une fraction de la tension
INC	Increment Conductance
GPV	Générateur photovoltaïque
KHz	Kilo Hertz
kΩ	Kilo Ohm
LCD	Liquid Cristal Display
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	Maximum Point Power Tracking
P&O	Perturb and Observe
PPM	Point de Puissance Maximale
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
RX	Receiver
TX	Transmitter

Liste des tableaux

Tableau III:1 caractéristiques du panneau solaire	36
Tableau III:2 Caractéristiques du convertisseur boost.	38
Tableau III:3 définition des pins du capteur de courant.....	54
Tableau III:4 Définition des broches d'interfaçage et connexion avec le I2C PCF8574	56
Tableau III:5 Illustration des résultats récapitulatifs de simulation sous Proteus.	60
Tableau III :6 Devis estimatif du régulateur	62

Table des figures

Figure I:1 dopage du silicium pour former une jonction PN.	5
Figure I:2 principe de l'effet photovoltaïque.	6
Figure I:3 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	7
Figure I:4 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie	10
Figure I:5 Caractéristique générale courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	12
Figure I:6 Caractéristique réelle courant-tension d'une cellule solaire en conditions d'éclairement et de température nominale	13
Figure I:7 Caractéristique tension-courant d'un module formé de 36 cellules.	13
Figure I:8 Caractéristique tension-puissance d'un module PV.	14
Figure I:9 caractéristiques $I=f(V)$ pour différent éclairement	14
Figure I:10 caractéristiques $P=f(V)$ pour différent éclairement.....	15
Figure I:11 Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire	15
Figure I:12 Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeurs de température	16
Figure I:13 Caractéristique courant tension de N_s cellules en série	17
Figure I:14 Caractéristique courant tension de (N_p) cellules en parallèle	18
Figure I:15 Caractéristique résultante de n_s cellules associées en série et de N_p cellules identiques associées en parallèle et celle d'une cellule	18
Figure II:1 Illustration de la connexion directe entre un GPV et la charge	21
Figure II:2 Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge	22
Figure II:3 Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation.	23
Figure II:4 Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC.....	23
Figure II:5 Structure du hacheur élévateur	25
Figure II:6 Grandeurs caractéristiques	25
Figure II:7 schéma de montage d'un hacheur Boost.	25
Figure II:8 schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S fermée.	26
Figure II:9 schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S ouverte.	26
Figure II:10 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal a) suite à une variation d'ensoleillement au niveau du GPV, b) suite à une variation de consommation de charge, c) suite à une variation de température au niveau du GPV.	28
Figure II:11 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	29
Figure II:12 Illustration de l'algorithme pertub and Observer.	31
Figure II:13 Illustration de l'algorithme Pertub and Observer	31
Figure II:14 Organigramme de l'algorithme INC.	32
Figure II:15 Organigramme de l'algorithme FCO.	33
Figure II:16 Organigramme de l'algorithme FCC.	34
Figure II:17 Organigramme de l'algorithme Hill Climbing.	35
Figure III:1 Illustration du schéma bloc de notre régulateur	36
Figure III:2 Illustration du modèle Matlab implémenté	39
Figure III:3 Profil de l'irradiation.....	40
Figure III:4 Puissance Idéale et Puissance récupérée cas 1	41

Figure III:5 Caractéristiques du GPV en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas 1.	42
Figure III:6 Caractéristiques de la charge en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas1.	42
Figure III:7 Illustration des courbes de la puissance GPV et la charge en fonction du temps cas 1.	43
Figure III:8 Profil de la température	43
Figure III:9 Puissance Idéale et Puissance récupérée cas 2	44
Figure III:10 Caractéristiques du GPV en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas 2.	45
Figure III:11 Caractéristiques de la charge en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas 2.	45
Figure III:12 Illustration des courbes de la puissance GPV et la charge en fonction du temps cas 2.	46
Figure III:13 Illustration de la carte Arduino Uno	47
Figure III:14 Vue d'ensemble du logiciel Arduino	48
Figure III:15 logo Proteus Isis	49
Figure III:16 Interface App Inventor	49
Figure III:17 Illustration de la modélisation du GPV	50
Figure III:18 Illustration du schéma pour la simulation du GPV	50
Figure III:19 courbes caractéristiques du GPV.....	51
Figure III:20 Illustration complet du schéma du régulateur	52
Figure III:21 Illustration du schéma du pont diviseur de tension avec la diode zener pour limiter la tension en sortie	53
Figure III:22 L'effet Hall	54
Figure III:23 Capteur de courant ACS712 [24] et son équivalent sous PROTEUS	54
Figure III:24 MOSFET à canal N et son symbole	55
Figure III:25 Illustration de la courbe du courant I_D en fonction de la tension V_{DS} pour de tension de commande V_{GS}	55
Figure III:26 Écran LCD 4*20 avec différentes broches.....	56
Figure III:27 Module Bluetooth H6.....	57
Figure III:28 Illustration du branchement du module Bluetooth sur le microcontrôleur.	57
Figure III:29 Illustration de l'indication sur l'écran du régulateur	59
Figure III:30 Illustration de l'interface de l'application sur téléphone.....	60
Figure III:31 Illustration de l'interface de l'application sur téléphone connecté via Bluetooth.....	61
Figure III:32 interface de l'application en régime permanent.....	61

Introduction générale

0.1 Contexte sur le thème

Durant ces dernières décennies, la consommation énergétique est en croissance dans toutes les régions du monde. D'après l'agence internationale de l'énergie, la demande mondiale d'énergie pourrait augmenter de 45% d'ici l'an 2030 [1]. Actuellement, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur les ressources fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel qui représentent 81% de la production énergétique mondiale ce qui entrainera dans les quelques prochaines années un risque d'épuisement de ces ressources. L'épuisement annoncé des énergies fossiles et les problèmes climatiques dus aux gaz à effet de serre, ont amené plusieurs pays à accorder un rang de priorité élevé à cette question.

L'option du recours aux énergies renouvelables (inépuisable à l'échelle de l'homme), propres (pas d'émission des gaz à effet de serre) comme l'énergie solaire, s'est avérée nécessaire de nos jours. En effet, l'énergie solaire est accessible de plusieurs endroits sur la planète terre ; de plus, chaque année la terre reçoit une puissance chiffrée aux alentours de 173.10^{12} kW de la part du soleil ; ce qui n'est pas négligeable. [2]

L'exploitation de l'énergie solaire pour plusieurs régions est donc parmi l'une de solution durable pour palier au problème de production d'énergie électrique. La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique revêt ainsi d'une très grande importance ; afin d'y parvenir, une des solutions est de faire usage des modules photovoltaïques ; ces derniers nous permettent de transformer l'énergie solaire en énergie électrique avec un rendement de conversion généralement inférieur à 17% [3]. En outre, la puissance produite par les modules photovoltaïques est d'une part fortement liée aux conditions météorologiques auxquels ils sont soumis, et d'autre part à la courbe de la puissance produite en fonction de la tension aux bornes des modules (qui est une courbe non linéaire). Cette non-linéarité conduit à l'existence d'un point à maximum de puissance. Comme l'énergie produite par les modules photovoltaïques dépend du niveau d'éclairement (ensoleillement) et de la température des cellules, la position du point de puissance maximale est variable. Il est donc indispensable de développer des méthodes et des solutions technologiques ingénieuses pour assurer la poursuite de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

C'est dans ce contexte que vient s'inscrire notre projet de fin de cycle qui porte sur l'étude et conception d'un régulateur solaire assurant la poursuite du point de fonctionnement maximale (Maximum Power Point) : cas de l'algorithme perturb observe.

0.2. Identification et formulation du problème

Les modules photovoltaïques sont utilisés pour produire de l'énergie électrique grâce à l'énergie solaire. Un des aspects remarquables de ces modules est que la puissance produite par ces derniers dépend fortement des conditions météorologiques, entre autres la température ambiante, l'irradiation, La variation de l'une de ces conditions conduit nécessairement à une variation de puissance produite. D'autres parts, la courbe de sortie (puissance en fonction de la tension) d'un module photovoltaïque est non linéaire ; ce qui présente un problème de maximisation de l'énergie convertie.

Face à ce problème, la poursuite du point de fonctionnement optimal (point auquel la puissance produite est maximale) est plus que nécessaire, d'autant qu'elle nous permet d'extraire la puissance maximale disponible que nous fournit le soleil avec un meilleur rendement.

Produire une puissance maximale est une chose, cependant le suivi de l'extraction cette puissance maximal est un problème à résoudre pour détecter rapidement les pannes liées à ce dernier grâce à visualisation à distance.

0.3. Question de recherche

Tout au long de ce travail nous chercherons à répondre aux questions suivantes :

1. Comment se rassurer que l'énergie extraite du module photovoltaïque est maximisée pour un système solaire donné ?
2. Comment assurer le suivi de l'extraction de puissance maximale du système photovoltaïque ?

0.4. Formulation des hypothèses

Vu les questions soulevées ci-haut, nous émettons deux hypothèses selon lesquels :

1. Il serait possible avec des algorithmes MPPT de concevoir un régulateur solaire permettant une extraction maximale de l'énergie solaire via un générateur photovoltaïque.
2. En incorporant un système d'affichages des paramètres du système photovoltaïque à distance via la technologie Bluetooth, il serait possible d'y avoir accès en temps réel sur une application mobile.

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

L'accès à l'énergie électrique propre est un défi majeur surtout pour les pays en voie de développement, ce qui est le cas pour la plupart de pays africains. L'exploitation de l'énergie solaire est une véritable solution pour l'électrification de la plupart de pays africains, vu que nombreux bénéficient d'une irradiation bien suffisante. L'intérêt de notre recherche est la conception d'un régulateur permettant de maximiser l'énergie extraite d'un champ photovoltaïque. Ce qui présente une solution bien meilleure surtout pour les pays où l'accès à l'énergie électrique est encore à faible taux.

La conception de ce régulateur permettra d'avoir des systèmes solaires qui peuvent bien transférer leurs puissances maximales à leur charge.

0.6. Énoncé des objectifs de recherche

L'objectif général

L'objectif principal poursuivi par ce travail est de concevoir un régulateur solaire MPPT permettant la maximisation de puissance ainsi qu'assurer à distance le suivi du fonctionnement de ce régulateur via une application mobile.

Les objectifs spécifiques

Afin d'atteindre notre objectif nous envisageons d'effectuer les actions suivantes :

- Concevoir le schéma électrique du régulateur et dimensionner les composant y afférant.
- Présenter quelques les algorithmes de la poursuite du point de puissance maximale puis choisir l'un pour la conception du régulateur.
- Evaluer les performances de notre régulateur à l'aide des simulations dans le logiciel Proteus et Matlab.
- Développer une application mobile pour le suivi à distance de paramètres du régulateur.

0.7. Méthodologie et délimitation du travail

Pour atteindre les objectifs précédemment cités, nous avons utilisé la technique documentaire qui nous a permis de nous familiariser avec les systèmes photovoltaïques et les différents algorithmes de commande MPPT parmi lesquels on a tiré celui utilisé dans le cadre de ce présent travail. Nous avons aussi fait usage de la méthode expérimentale via le logiciel Proteus et Matlab qui nous ont permis de simuler notre régulateur.

0.8. Subdivision du travail

Hormis l'introduction générale et la conclusion générale, notre travail compte trois chapitres, le premier chapitre intitulé « quelques généralités sur les systèmes photovoltaïque » décrit le générateur photovoltaïque et ses différents comportements vis-à-vis de la variation des paramètres extérieurs (Irradiation, température). Le deuxième chapitre parle de « la liaison avec la charge et les principes de la poursuite du point de fonctionnement maximale ». En fin le troisième chapitre parle de « la conception du régulateur solaire » décrivant l'évaluation de fonctionnement du régulateur via le logiciel Matlab et l'implémentation sous Proteus tout en présentant les résultats.

Chapitre I. QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées par des matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Cet effet permet de produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Ce chapitre décrira sa modélisation ainsi que ses différentes caractéristiques sous certaines conditions (influence des conditions météorologiques sur le fonctionnement de la cellule). Enfin, nous présenterons l'architecture des systèmes photovoltaïques.

I.1.1. Cellule photovoltaïque

I.1.1.1. Définition

La cellule PV est une diode spéciale à jonction PN qui peut produire de l'énergie électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière [4].

Les cellules PV sont souvent à base du silicium, un matériau semi-conducteur qui contient quatre électrons dans sa bande de valence et qui peut perdre facilement un électron quand on l'expose au soleil. On forme maintenant deux couches à base du silicium, une part l'ajout de l'atome de phosphore qui possède 5 électrons dans la couche de valence et on aura donc un excès d'électrons, c'est la zone dopée N (négativement dopée). L'autre couche est produite par l'addition du silicium avec les atomes de bore qui contiennent 3 électrons libres, on aura donc un manque d'électrons ou bien des trous, c'est la zone dopée P (positivement dopée), figure I :1.

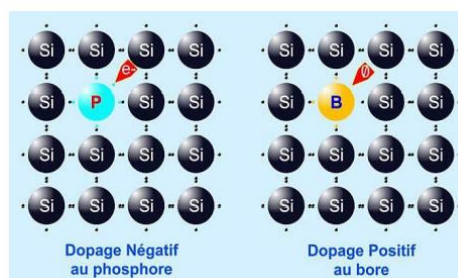


Figure I:1 dopage du silicium pour former une jonction PN. [5]

Quand on met les deux coches en contact, des électrons de la zone N vont migrer vers les trous voisins dans la couche P (la fusion), ce qui rend, au voisinage du contact, la zone N avec un signe (+) (manque d'électrons) tandis que la zone P sera avec un signe (-) (surplus d'électrons), cela donne naissance à un champ électrique dirigé de N vers P qui empêche le passage des électrons de N vers P et arrête la diffusion.

I. 1.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le courant inverse d'une jonction P-N fonctionne d'une part des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres de la diode et d'autre part de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace.

Dans une photodiode, le rayonnement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les régions neutres et la génération de paires électrons-trous dans la zone de charge espace. [6]

Les photons du rayonnement solaire brillent sur la cellule. Trois différents cas peuvent se produire : certains des photons sont réfléchis de la surface supérieure de la cellule et la surface métallique. Celles qui ne sont pas réfléchies pénètrent dans le substrat. Certains d'entre eux, généralement ceux avec moins d'énergie, passent à travers la cellule sans causer aucun effet.

Seulement ceux avec le niveau d'énergie au-dessus de la bande interdite du silicium peuvent créer une paire électron-trou. Ces paires sont générés des deux côtés de la jonction P-N. Les charges minoritaires (électrons du côté P, trous du côté N) sont diffusées à la jonction et emportées dans les directions opposées (électrons vers le côté P, trous vers le côté N) par le champ électrique, tout en générant un courant dans la cellule, qui est recueilli par les contacts métalliques des deux côtés. [6] Comme l'illustre la figure I :2.

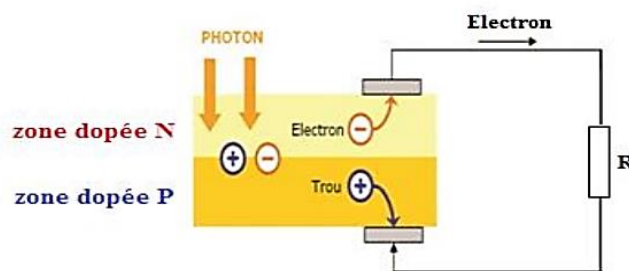


Figure I:2 principe de l'effet photovoltaïque. [4]

I.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un système photovoltaïque il est donc important de connaître le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque ce qui va permettre de bien maîtriser le fonctionnement global du système ainsi que prédire le comportement du système face à certaines sollicitations [7]. Chaque cellule photovoltaïque peut être modélisée selon le schéma électrique de la figure I :3.

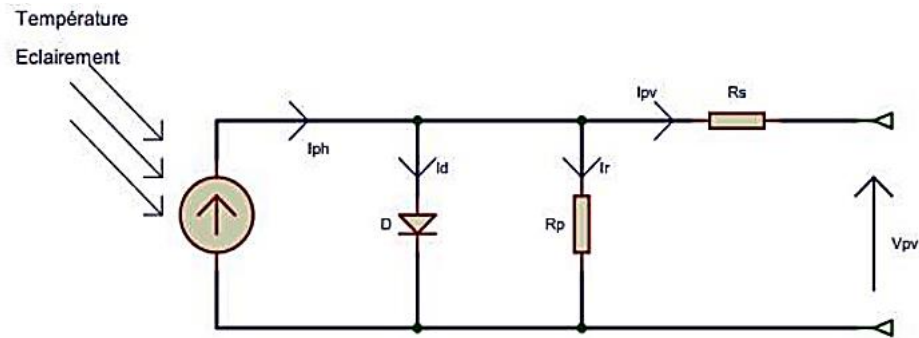


Figure I:3 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [8]

Une cellule photovoltaïque peut être considérée comme une source idéale de courant en parallèle avec une diode qui modélise la jonction P-N fournissant un courant I_{ph} proportionnel à la puissance énergétique du rayonnement incident.

Les résistances R_s et R_p permettent de modéliser les pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_p modélise les courants de fuite dus à la diode et aux effets bord de la jonction.

L'équation 1.1 correspond au modèle de la figure vue précédemment :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_r \quad (1.1)$$

Avec I_d le courant direct dans la diode, donnée par la relation :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + I_{pv} * R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

Où : I_{sat} représente le courant de saturation inverse de la diode ;

K est la constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23} \text{ J/K}$),

T est la température effective des cellules en Kelvin (K),

e est la charge élémentaire de l'électron ($e = 1,6 * 10^{-19} C$),

I_{pv} est le courant fourni par la cellule,

n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$).

I_r est le courant dans la résistance R_p qui modélise les pertes, il est donné par la relation suivante :

$$I_r = \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_p} \quad (1.3)$$

Où V_{pv} représente la tension aux bornes de la cellule.

En ramenant respectivement (1.3), (1.2) dans (1.1) on a :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + I_{pv} * R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_p} \quad (1.4)$$

L'équation (1.4) illustre la modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.3 paramètres d'une cellule photovoltaïque

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

▪ Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.4), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} * R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} * R_s}{R_p} \quad (1.5)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} * R_s)}{nkT} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors illustrée par l'équation (1.6) :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right)} \quad (1.6)$$

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

▪ Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) ; en annulant la valeur du courant I_{pv} de l'équation (1.4) on obtient :

$$V_{pv} = R_p \left[I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{e(V_{pv})}{nkT} \right) - 1 \right) \right] \quad (1.7)$$

L'équation (1.7) donne l'expression de la valeur de la tension à circuit-ouvert d'une cellule photovoltaïque [2].

Dans le cas idéal, la valeur de la V_{co} est légèrement inférieure à celle illustré par l'équation (1.8) :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (1.8)$$

▪ Rendement énergétique

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{opt} * I_{opt}}{P_{inc}} \quad (1.9)$$

L'équation (1.9) illustre l'expression du calcul du rendement énergétique d'une cellule PV, avec P_{inc} qui est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [7].

▪ Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température [7].

Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_p . Il est défini par l'équation (1.10).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{V_{opt} * I_{opt}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (1.10)$$

L'équation (1.10) illustre l'expression de calcul du facteur de forme.

I.4. Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [7].

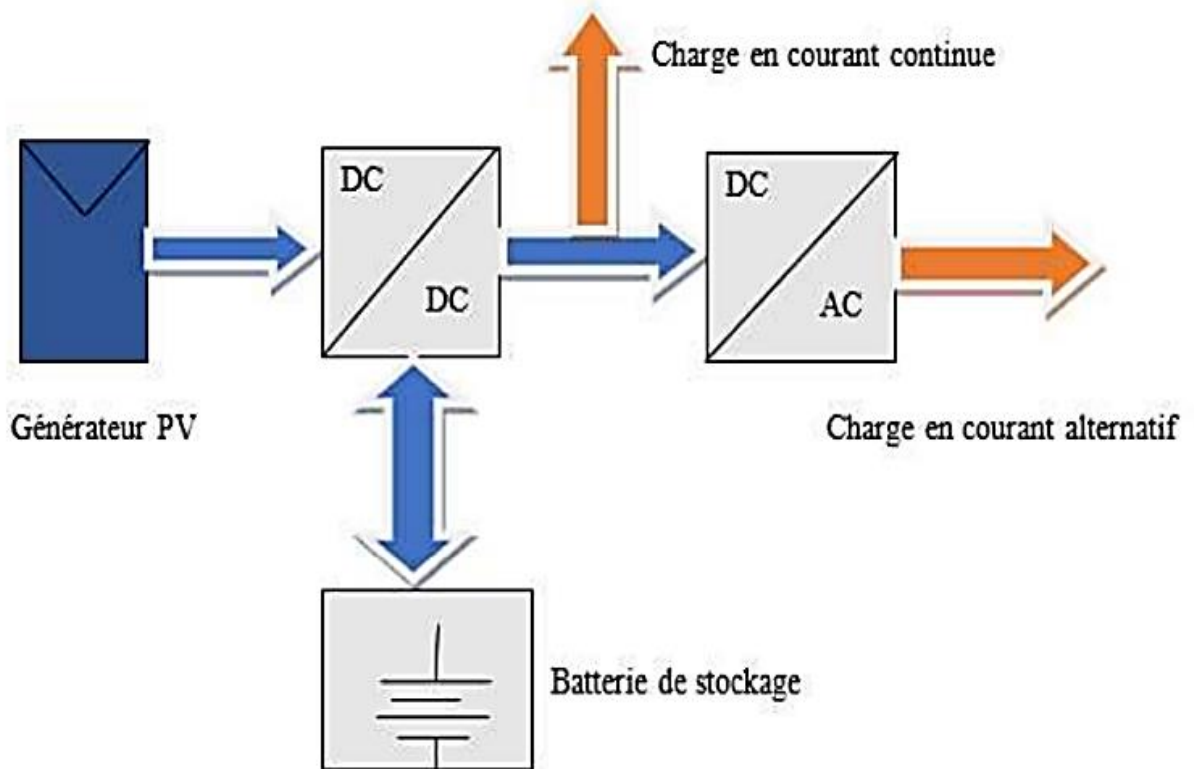


Figure I:4 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie [8]

I.4.1. Module photovoltaïque

Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée [9].

Le rendement énergétique d'un module dépend de la nature des matériaux utilisés. Les valeurs communément rencontrées sont de l'ordre (13 à 16 % pour les cellules composées de silicium monocristallin, 11 à 13 % avec du silicium polycristallin et 7 à 8 % avec du silicium amorphe).

L'existence d'une cellule non identique dans un module peut provoquer sa destruction, par échauffement. Donc les déséquilibres importants dus à l'occultation, d'une ou plusieurs cellules, peuvent amener les modules à travailler en récepteur. Pour corriger ces problèmes, des diodes peuvent être placées en parallèle et en série avec les modules [10].

I.4.2. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est un assemblage de modules protégés en configuration série, parallèle ou mixte.

A. Caractéristique courant tension du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque peut être considéré comme une source de puissance à cause de la difficulté de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension [10].

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant-tension d'une cellule a l'allure de la courbe illustrées par la figure I:5.

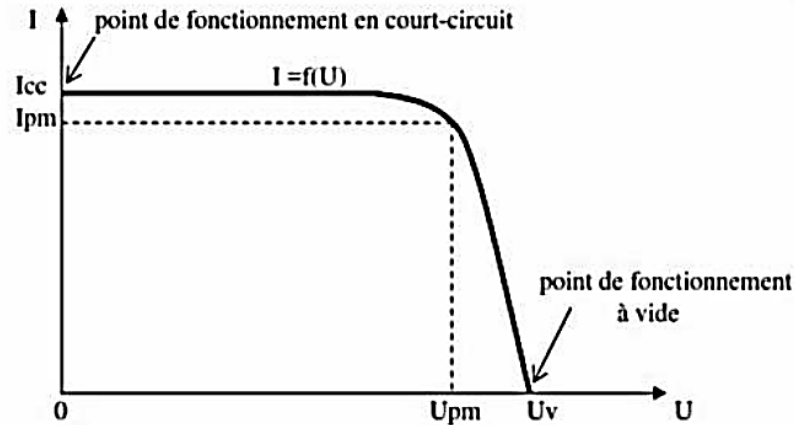


Figure I:5 Caractéristique générale courant-tension d'une cellule photovoltaïque

De la courbe illustrée à la figure I :5, nous remarquons l'existence du :

- Point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0A$ (tension maximale, le générateur n'est branché à aucune charge)
- Point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$ (Courant maximale, le générateur est en court-circuit)
- Point P_m où la puissance fournie par le générateur est maximale, et qui correspond à l'intersection du point U_{pm} et I_{pm} . Ce point représente une très grande importance pour tirer le maximum d'énergie et exploiter au mieux la puissance offerte par les panneaux.

Une cellule solaire fourni à ses bornes une tension assez faible, pour une cellule au silicium cristallin cette tension est un peu moins de 0.5 V au point de puissance optimale comme l'illustre la figure I:6 ; Cette tension est insuffisante pour la plupart des utilisations, pour cette raison, un module contient habituellement plusieurs cellules connectées en série.

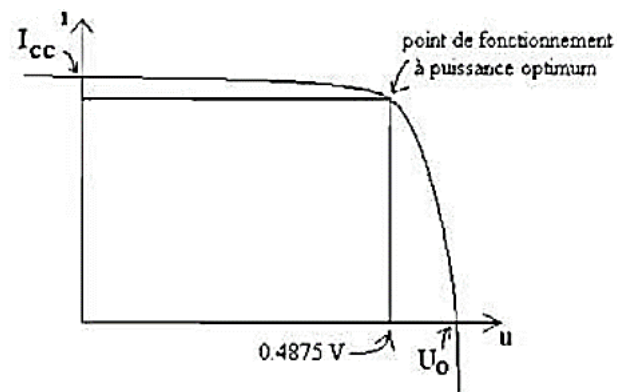


Figure I:6 Caractéristique réelle courant-tension d'une cellule solaire en conditions d'éclairement et de température nominale [11].

Dans ces conditions, le courant que peut débiter le module n'est pas plus grand que celui que peut fournir une cellule. Par contre, la tension du module est la somme des tensions des cellules. Donc, si le module contient n cellules identiques éclairées de la même façon, sa tension est n fois plus grande que celle d'une cellule. Autrement dit, la caractéristique tension-courant du module s'obtient en dilatant la caractéristique tension-courant d'une cellule d'un facteur n dans le sens horizontal ; La figure I:7 illustre la caractéristique courant tension pour $n=36$.

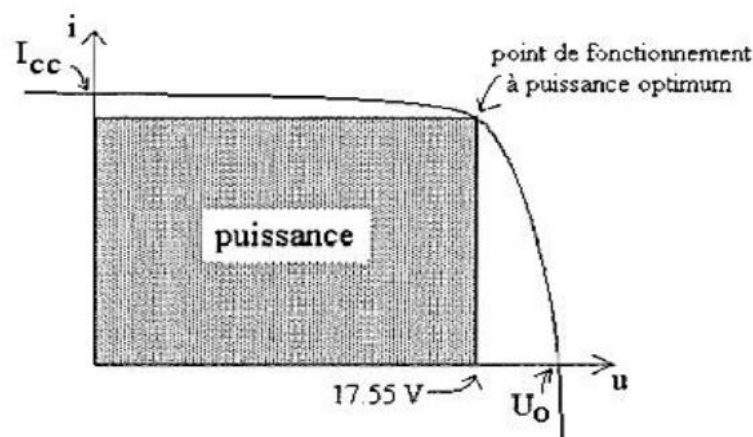


Figure I:7 Caractéristique tension-courant d'un module formé de 36 cellules. [11]

La puissance fournie par le générateur dépendra fortement de la caractéristique courant-tension de la charge, car c'est cette dernière qui fixe le point de fonctionnement. Si le point de fonctionnement correspond à un courant nul (fonctionnement à vide) ou à tension nulle (fonctionnement en court-circuit), il est clair que la puissance débitée $p = u \cdot i$ est nulle. Entre ces deux cas particuliers, la puissance fournie est positive.

La puissance correspond à l'aire du rectangle dont les axes forment deux côtés et le point de fonctionnement un angle comme le montre la figure I:8.

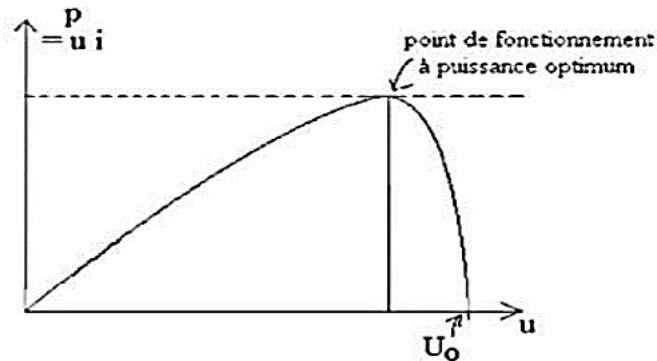


Figure I:8 Caractéristique tension-puissance d'un module PV. [11]

Propriété intéressante du point à puissance maximum : $\frac{dP}{dV} = 0$

B. Influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique tension courant d'un générateur photo voltaïque

❖ Influence de l'éclairement

Le photo-courant (courant due à l'effet photovoltaïque) est pratiquement directement proportionnel à l'éclairement, en fixant la valeur de la température. La figure I:9 montre l'influence de la valeur de l'éclairement sur le courant et la tension.

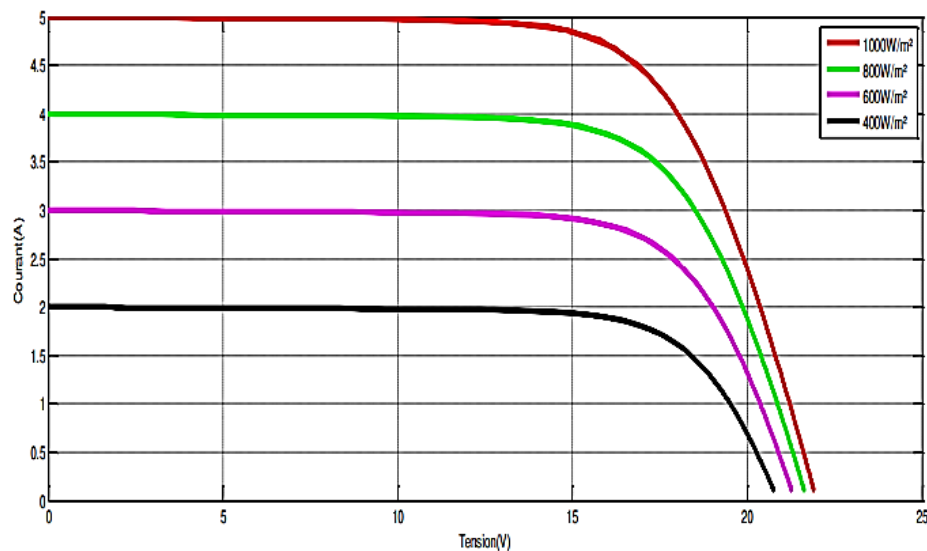


Figure I:9 caractéristiques $I=f(V)$ pour différent éclairement [11]

On constate que la valeur du courant de court-circuit varie proportionnellement avec l'éclairement au contraire de la tension de circuit ouvert qui reste presque stable même si on varie l'éclairement. Par conséquent la puissance aussi varie proportionnellement à cette perturbation comme le montre la figure I :10.

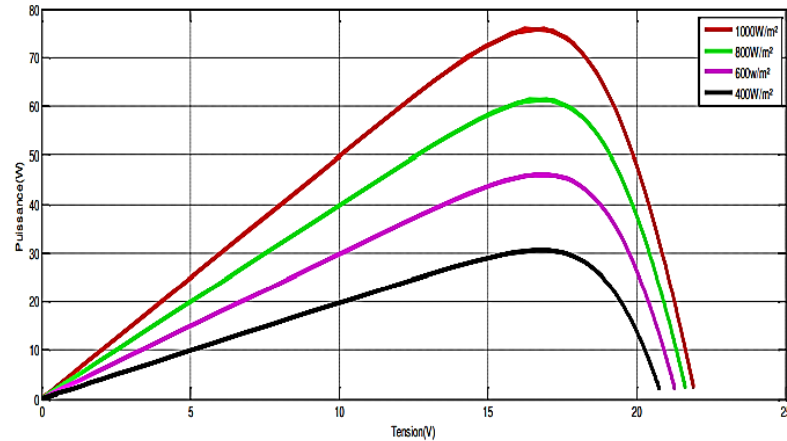


Figure I:10 caractéristiques $P=f(V)$ pour différent éclairement. [11]

❖ Influence de la température

A un éclairement constant, la caractéristique $I = f(U)$ dépend évidemment fortement de température, tel qu'illustré dans la Figure I :11 [10]. Nous remarquons que le courant demeure constant vis-à-vis de la variation la température, cependant la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible comme illustre la figure I :12.

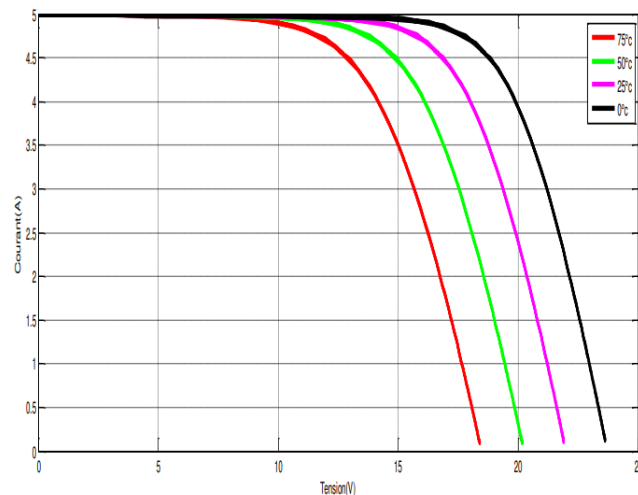


Figure I:11 Influence de la température sur la caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire [11]

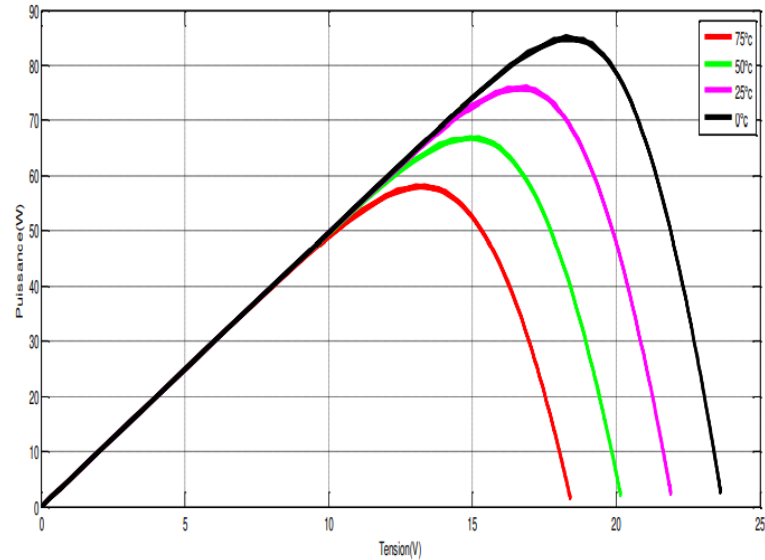


Figure I:12 Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeurs de température [11]

C. Influence de l'association de cellules ou modules photovoltaïques

❖ Association des cellules photovoltaïques en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques :

$$\begin{cases} V_{coNs} = N_s * V_{co} & (1) \\ I_{cc} = I_c & (2) \end{cases} \quad (1.11)$$

Le système d'équation (I.11) illustre en premier la tension à circuit ouvert lorsque l'on couple les cellules en série, en seconde il illustre le courant total que les cellules peuvent débiter lorsqu'elles sont couplées en série. [6]

Avec : V_{coNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

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

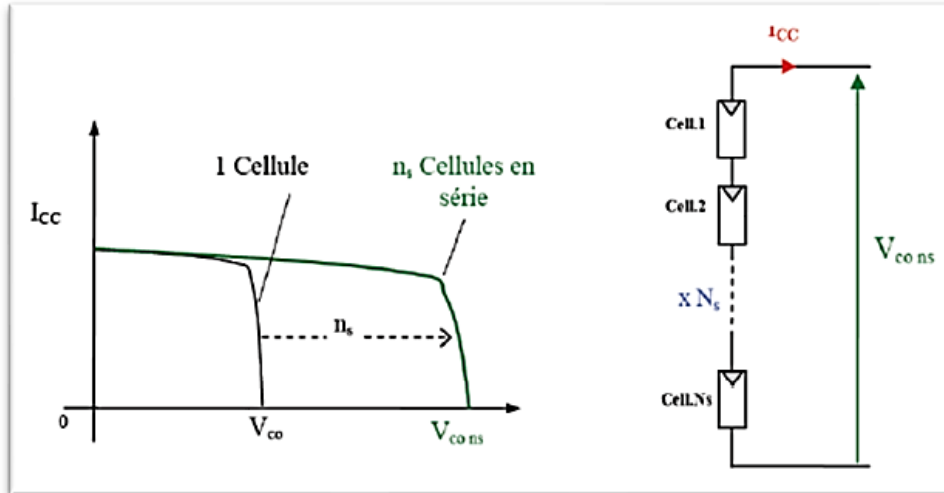


Figure I:13 Caractéristique courant tension de N_s cellules en série [4]

La figure I:13 illustre la caractéristique courant tension pour N_s cellules associées en série on remarque que le courant que peut débiter ces cellules correspond au courant maximale que peut débiter une cellule, la tension a circuit ouvert correspond au nombre des cellules multiplier par la tension a circuit ouvert d'une cellule.

❖ Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé.

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.

$$\begin{cases} I_{coNp} = N_p * I_{cc} & (1) \\ V_{coNp} = V_{co} & (2) \end{cases} \quad (1.12)$$

Le système d'équation (1.12) illustre en premier illustre le courant total que les cellules peuvent débiter lorsqu'elles sont couplées en parallèle. En second on illustre la tension a circuit ouvert lorsque l'on couple les cellules en parallèle.

Avec : I_{coNp} : La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle

V_{coNp} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

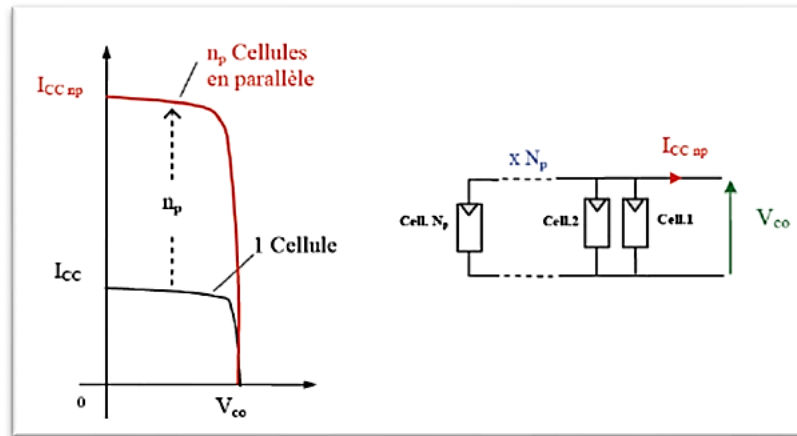


Figure I:14 Caractéristique courant tension de (Np) cellules en parallèle [6]

❖ Regroupement mixte (série et parallèle)

Le groupement mixte est utilisé lorsqu'on veut obtenir des puissances élevées ce qui implique des forts courant (couplage en parallèle) mais aussi des niveaux de tension assez élevée (couplage série), l'association en mixte permet de regrouper les avantages qu'offre une configuration série avec celle qu'offre une configuration parallèle.

La figure I :15 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série Ns et en parallèle Np, cellules identiques.

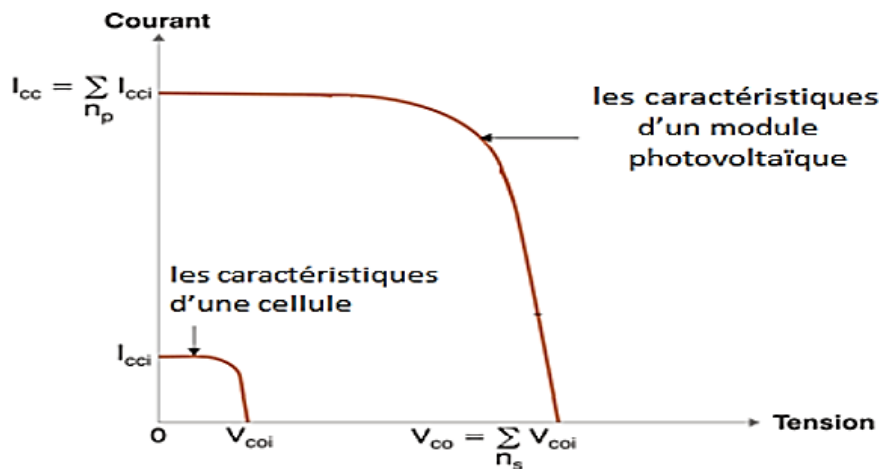


Figure I:15 Caractéristique résultante de ns cellules associées en série et de Np cellules identiques associées en parallèle et celle d'une cellule [6]

$$\begin{cases} I_{cc} = \sum_{n_p} I_{cci} & (1) \\ V_{co} = \sum_{n_s} V_{coi} & (2) \end{cases} \quad (1.13)$$

Avec : N_s : le nombre des cellules associées en série.

N_p : le nombre des cellules associées en parallèle.

$V_{oc} t = N_s * V_{oc}$: le nombre des cellules associées en série * tension de circuit ouvert.

$I_{cc} t = N_p * I_{cc}$: le nombre des cellules associées en parallèle * courant de court-circuit.

I.4.3. Les régulateurs

Le régulateur est le noyau du système de captage photovoltaïque. C'est un dispositif qui sert de liaison avec la charge. Principalement pour notre cas il servira à extraire la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

Les régulateurs de charge se divisent en deux catégories : **les régulateurs PWM** et **les régulateurs MPPT** [10].

- **Les régulateurs de charge PWM** (Pulse Width Modulation) : ils modulent la largeur des impulsions de tension envoyées à la charge, ce qui permet de réguler la tension de charge. Les régulateurs PWM sont moins chers et plus simples que les régulateurs MPPT, mais ils sont également moins efficaces.
 - Ils sont donc idéals pour les petites installations (inférieures à 150W) du fait de leur faible coût.
 - Ils ne permettent pas de charger un parc batterie 12V avec un panneau dont la tension est supérieure à 23V.
- **Les régulateurs de charge MPPT** (Maximum Power Point Tracking), grâce à leur micro-processeur et algorithmes de charges plus perfectionnés, ils recherchent en permanence le point de puissance maximale du panneau solaire, ce qui permet d'optimiser la production d'énergie du système.

Les régulateurs MPPT sont généralement plus efficaces que les régulateurs PWM, ce qui signifie qu'ils peuvent produire plus d'énergie à partir d'un même panneau solaire. Ils sont également plus coûteux et plus complexes.

I.5. Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté de façon large le principe de l'effet photovoltaïque, les généralités sur la cellule PV, les modules PV, générateurs PV et leurs caractéristiques de fonctionnement. Il a donné aussi la description de différents éléments qui composent un système photovoltaïque. Dans le chapitre suivant, nous présenteront une étude sur les convertisseurs DC – DC (étage d'adaptation du régulateur MPPT) et les algorithmes de commande MPPT pour assurer la poursuite du point de puissance maximale pour un générateur photovoltaïque.

Chapitre II. LIAISON AVEC LA CHARGE ET LA COMMANDE MPPT

II.0. Introduction

Le chapitre précédent a donné un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. L'énergie produite par le générateur photovoltaïque peut être, selon l'application visée, soit utilisée telle quelle par la charge, soit stockée ou bien injectée dans un réseau électrique. La connexion entre le groupe générateur photovoltaïque et la charge peut être direct ou indirect, c'est-à-dire via un étage d'adaptation. Nous détaillerons au cours de ce chapitre les différentes configurations d'étage d'adaptation et les différents algorithmes utilisés pour la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque.

II.1. Etage d'adaptation

L'étage d'adaptation est une liaison entre le générateur photovoltaïque et la charge, elle est plus souvent composée pour les installations solaires d'un convertisseur de puissance et est souvent utilisée en ingénierie électrique dans le but d'optimiser le transfert de puissance entre une source (émetteur) et une charge (récepteur). Pour le cas de notre régulateur solaire l'optimisation de puissance se fait entre les panneaux et une résistance. La connexion panneau – charge peut être de deux types soit directe (sans étage d'adaptation) soit indirect (avec étage d'adaptation).

II.1.1. Liaison directe avec la charge

Dans un système PV, la liaison directe avec la charge signifie qu'on connecte directement les panneaux à la charge électrique sans passer par un convertisseur DC/DC (étage d'adaptation) comme l'illustre la figure II :1.

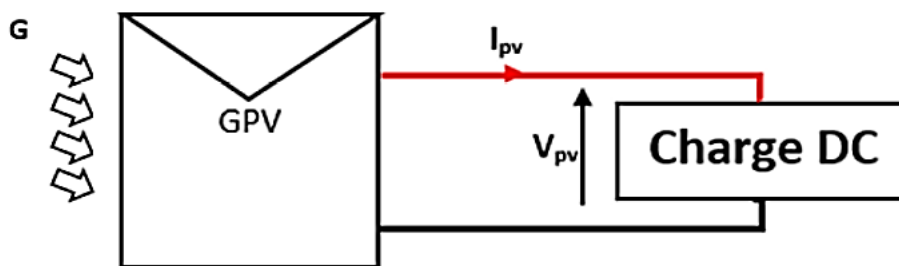


Figure II:1 Illustration de la connexion directe entre un GPV et la charge [12]

On a vu dans le chapitre précédent que les panneaux solaires sont des sources non linéaires et que leur point de fonctionnement est variable (c'est-à-dire il dépend de l'ensoleillement et la température).

Mais aussi le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté, figure II.2 [13].

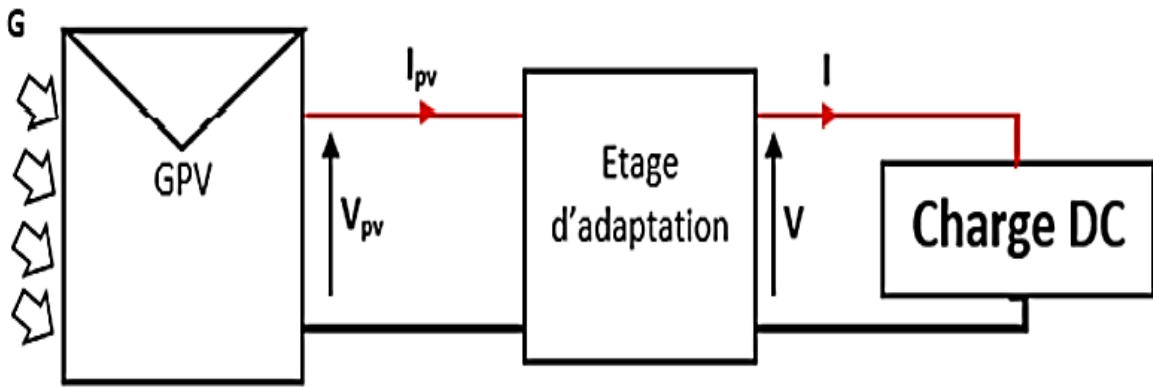


Figure II:3 Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation. [12]

L'étage d'adaptation possède une commande spécifique qui lui permet de stabiliser le système au point de fonctionnement maximal ; l'électronique qui compose l'étage d'adaptation ne doit pas minimiser la puissance du GPV. Le plus souvent cet étage est composé d'un convertisseur DC-DC qui permet soit d'élever la tension d'entrée (convertisseur élévateur) ; soit d'abaisser la tension (Convertisseur abaisseur) ou d'effectuer les deux et parfois en assurant une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie. [8]

Le choix de la structure du convertisseur DC-DC dépend le plus souvent des plages de tension aux bornes du GPV ainsi qu'aux bornes de la charge. [8]

La figure II :4 illustre l'étage d'adaptation muni d'une commande de pilotage de type MPPT, cette commande consiste en un algorithme implémenté dans un microcontrôleur qui permet grâce au rapport cyclique disponible en sa sortie de piloter le convertisseur DC-DC.

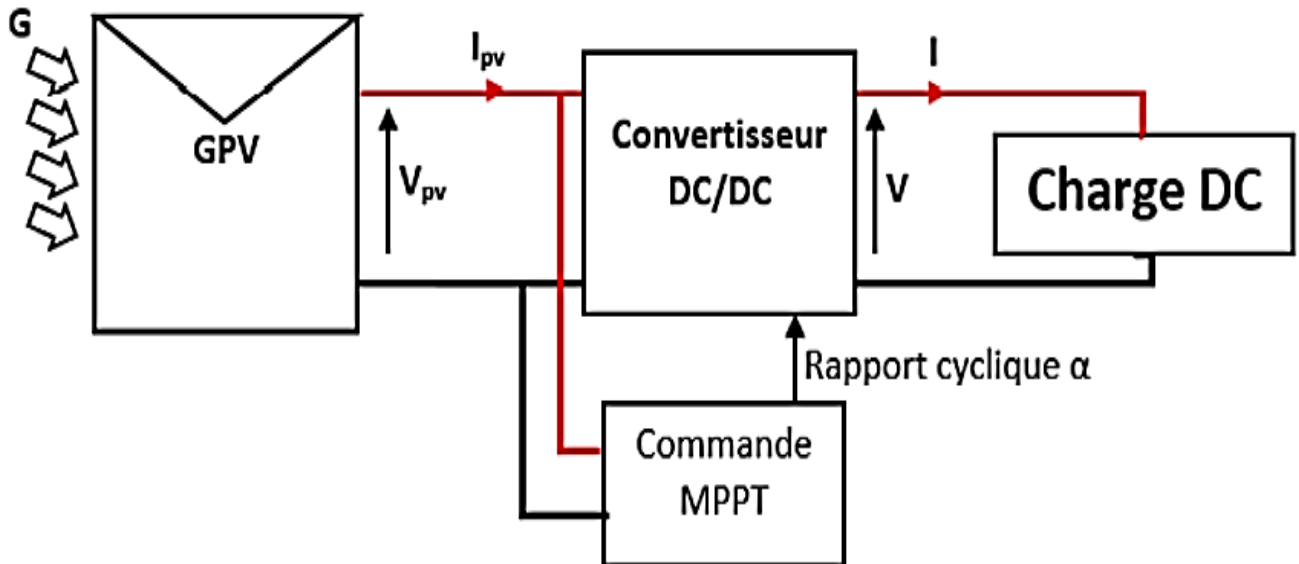


Figure II:4 Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC [12]

II.2. Les convertisseurs DC-DC

Un convertisseur DC-DC est un circuit d'électronique de puissance ou un dispositif qui convertit en courant continu un niveau de tension spécifique à un autre niveau différent tout en assurant une puissance égale ou proche entre l'entrée et la sortie. Les convertisseurs DC -DC appelés communément hacheurs sont le plus souvent constitués d'une inductance(bobine), d'une capacité(condensateurs) et d'un interrupteur électronique (commutateurs) et qui grâce à une association bien définie forment un circuit électrique permettent d'effectuer la conversion d'un niveau de tension vers un autre et cela avec un rendement élevé d'où un transfert de puissance optimal. [8]

Pour les convertisseurs DC/DC les tensions et courants d'entrée et de sortie sont relié par les relations :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = k \quad \text{et} \quad \frac{i_{in}}{i_{out}} = k \quad (2.1)$$

Où k est le rapport de transformation, habituellement réglable

L'utilisation des équations (2.1) suppose que l'on néglige les pertes de puissance, on peut en déduire la conservation de la puissance.

$$V_{out} * I_{out} = V_{in} * I_{in} = P \quad (2.2)$$

On remarque que lorsque le convertisseur élève le niveau de tension d'entrée, il diminue le niveau de courant en sortie. Inversement, s'il abaisse le niveau de tension, il augmente le niveau de courant afin de respecter la conservation de puissance.

Trois types de convertisseurs à découpages sont fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges : hacheur survolteur (Boost), hacheur dévolteur (Buck)et hacheur mixte (Buck-Boost).

Dans le cadre de notre travail nous allons étudier le hacheur élévateur car c'est ce que nous utiliserons ultérieurement pour la conception de notre régulateur.

II.2.1 Hacheur survolteur

La structure du hacheur élévateur est constituée d'une seule cellule de commutation, ainsi que représente la figure II :5. Par les mécanismes de mise en conduction et de blocage des deux interrupteurs, deux états sont possibles, ainsi que cela est illustré par la figure II :6.

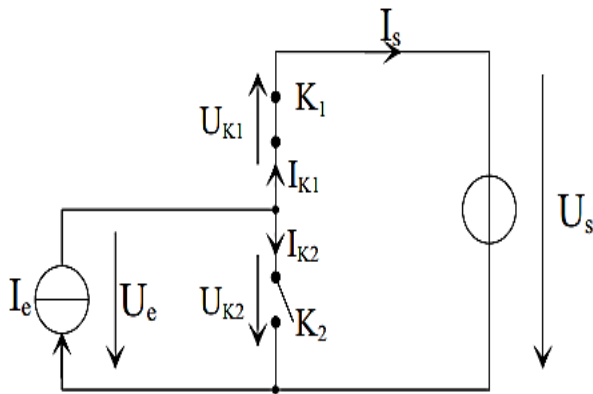


Figure II:5 Structure du hacheur élévateur [15]

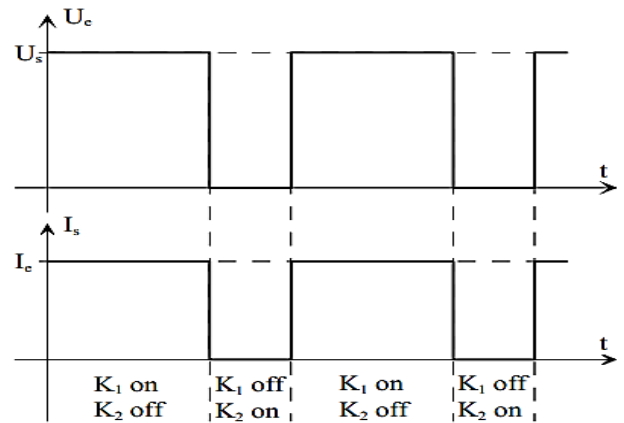


Figure II:6 Grandeurs caractéristiques [15]

Le hacheur survolteur ou bien parallèle (en anglais Boost), permet d’avoir à partir d’une source de tension continue constante, une autre tension de sortie continue avec une valeur plus élevée. Cette fonctionnalité sera utilisée pour extraire le MPP. La figure II :7 représente le schéma de base de ce convertisseur.

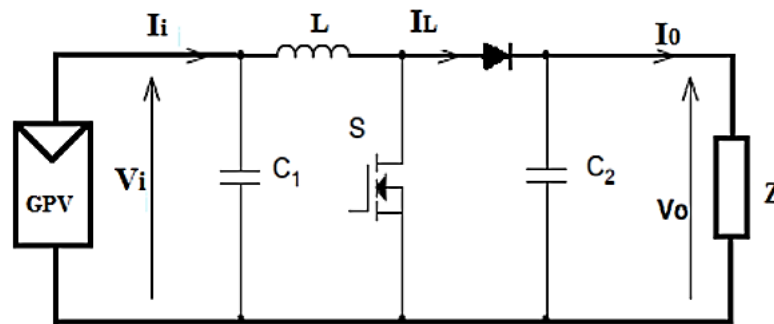


Figure II:7 schéma de montage d’un hacheur Boost. [16]

Ce convertisseur élévateur est largement utilisé pour localiser le point de puissance optimale d’un générateur photovoltaïque. Le Boost peut fonctionner en mode de conduction continue et en mode de conduction discontinue. [1]

En mode de conduction continue, le fonctionnement d’un convertisseur Boost est divisé en deux phases qui dépendent de l’état de l’interrupteur commandable S. [1]

- *Quand on ferme l’interrupteur S* : ce dernier devient passant et se comporte comme un fil, il nous produit deux mailles : coté source et coté charge. Le courant dans la bobine va augmenter ainsi que l’énergie emmagasinée sous forme magnétique. La diode dans ce cas est bloquée, et la charge sera déconnectée de la source.

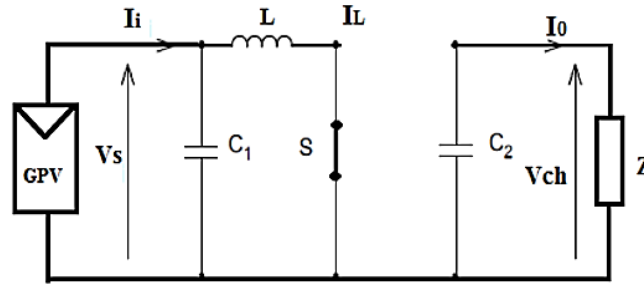


Figure II:8 schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S fermée. [16]

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt}$$

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \approx L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{on}} = L \frac{\Delta I_L}{T_{on}} \tag{2.3}$$

Ce qui donne

$$\Delta I_L = \frac{V_s * T_{on}}{L} \tag{2.4}$$

- On ouvre l'interrupteur S : la bobine décharge son énergie, emmagasinée lors de la première phase, à travers la diode vers la charge (et notamment pour charger le condensateur en parallèle avec la charge), et comme l'inductance est en série avec le générateur, sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur.

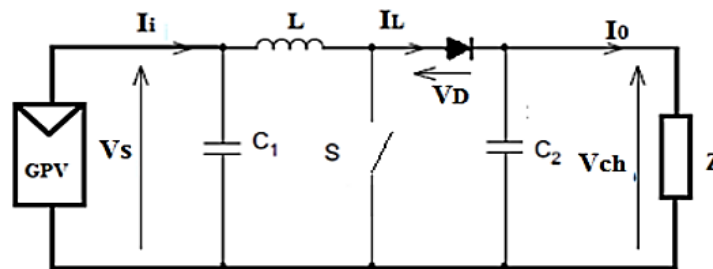


Figure II:9 schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S ouverte. [16]

En appliquant la loi de maille on peut écrire :

$$V_{ch} = V_s - L \frac{dI_L}{dt} \tag{2.5}$$

Et comme le courant dans la bobine est en diminution, la quantité $\frac{dI_L}{dt} < 0$ ce qui donne

$$V_{ch} = V_s - \left(-L \frac{dI_L}{dt}\right) = V_s + L \frac{dI_L}{dt} = V_s + L \frac{\Delta I_L}{T_{off}} \quad (2.6)$$

On remplace l'équation (2.4) dans (2.6) en posant que $t_{off} + t_{on} = T$ obtient

$$\begin{aligned} V_{ch} &= V_s + L \frac{V_s * t_{on}}{L t_{off}} = V_s + \frac{V_s * t_{on}}{t_{off}} = V_s \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \\ &= V_s \left(\frac{t_{off} + t_{on}}{t_{off}}\right) = V_s \left(\frac{T}{T - t_{on}}\right) = V_s \left(\frac{T/T}{T - t_{on}/T}\right) \\ V_{ch} &= V_s \left(\frac{1}{1 - D}\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

D : est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période T lorsque l'interrupteur S est passant, ce rapport est toujours limité entre 0 et 1 ($0 < D < 1$).

Cette équation montre la relation entre la tension d'entrée et de sortie d'un hacheur Boost, si on prend par exemple une valeur de $D = 0.8$, on trouve que la tension de charge sera 5 fois plus grande que celle d'entrée.

II.3. Commande MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Pour un générateur photovoltaïque sous un même éclairage, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une résistance par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. [17]

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement, quelles que soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure II :10 illustre trois cas de perturbations possibles. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal noté PPM1 vers un nouveau point de fonctionnement noté P'1, plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum qui correspond à PPM2. Pour une variation de charge (cas b), impliquant une nouvelle caractéristique de la charge, on peut également constater qu'une modification du point de fonctionnement est nécessaire pour rechercher une nouvelle position optimale

grâce à la recherche d'un nouveau rapport cyclique. Un autre cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié par exemple aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande en imposant un autre niveau de rapport cyclique, ce dernier n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents et n'implique aucune contrainte de dimensionnement de la commande.

De façon générale, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher à chaque instant le PPM du GPV sans connaître à priori l'origine de la variation du point de fonctionnement. [18]

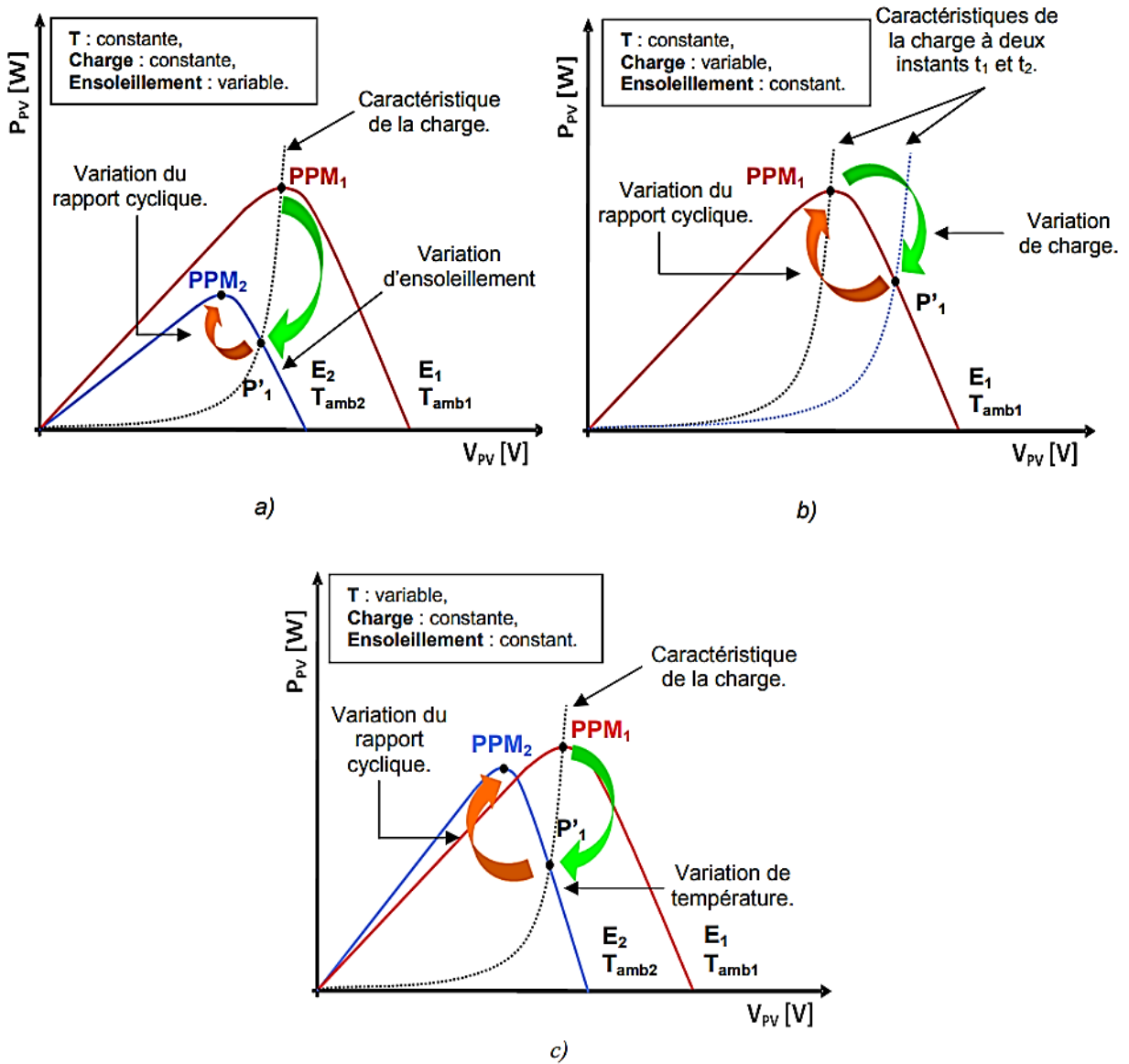


Figure II:10 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal a) suite à une variation d'ensoleillement au niveau du GPV, b) suite à une variation de consommation de charge, c) suite à une variation de température au niveau du GPV. [18]

La Figure II :11 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. [17]

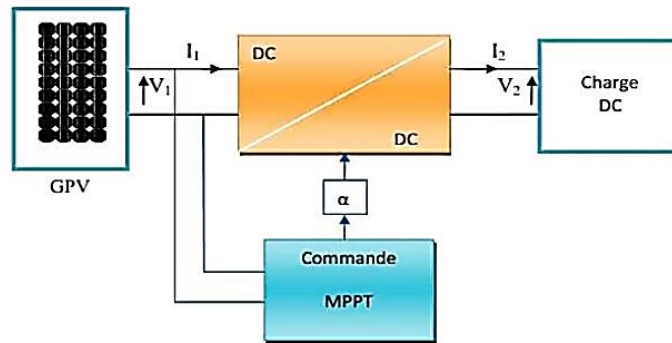


Figure II:11 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [6]

II.3.1. Classification des commandes MPPT

Ils sont classifiés selon leurs types de recherche :

II.3.1.1. Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [19]

II.3.1.2. Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc.... [19]

II.3.2. Algorithmes de poursuite du point de puissance maximale

L'étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT qui lui permet de rechercher le point à puissance maximale que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

II.3.2.1. Algorithme « Pertub and Observe » (P & O) [20]

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension au niveau du générateur photovoltaïque d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure II :12, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension engendre un accroissement de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du Point à Puissance Maximum.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le point à puissance maximum. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique puissance – tension, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au point à puissance maximum, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau Point à Puissance Maximum (PPM).

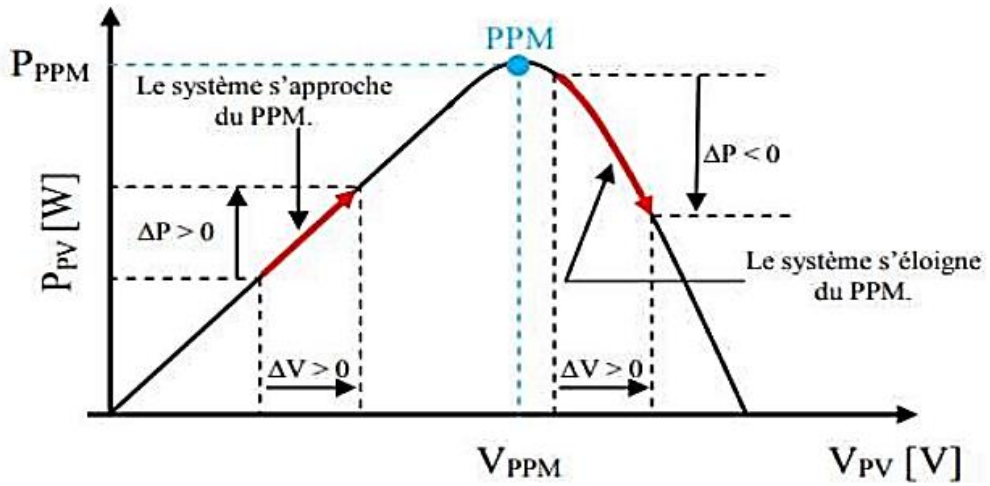


Figure II:12 Illustration de l'algorithme perturb and Observer. [20]

La figure II :13 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

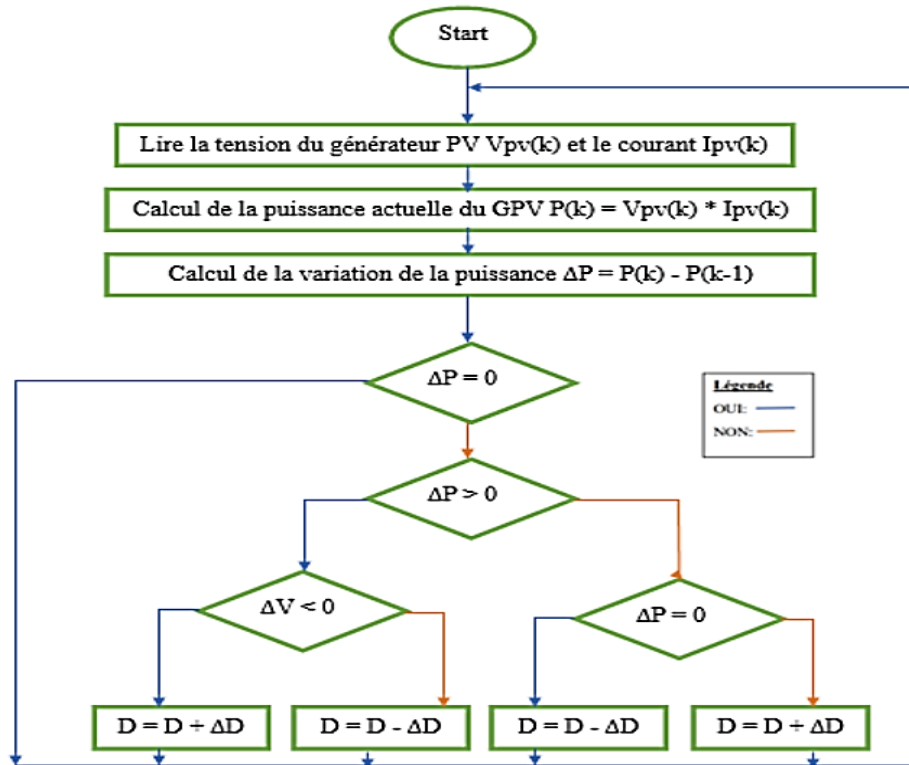


Figure II:13 Illustration de l'algorithme Perturb and Observer[8]

II.3.2.2. Algorithme d'incrémentation de la conductance (INC)

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

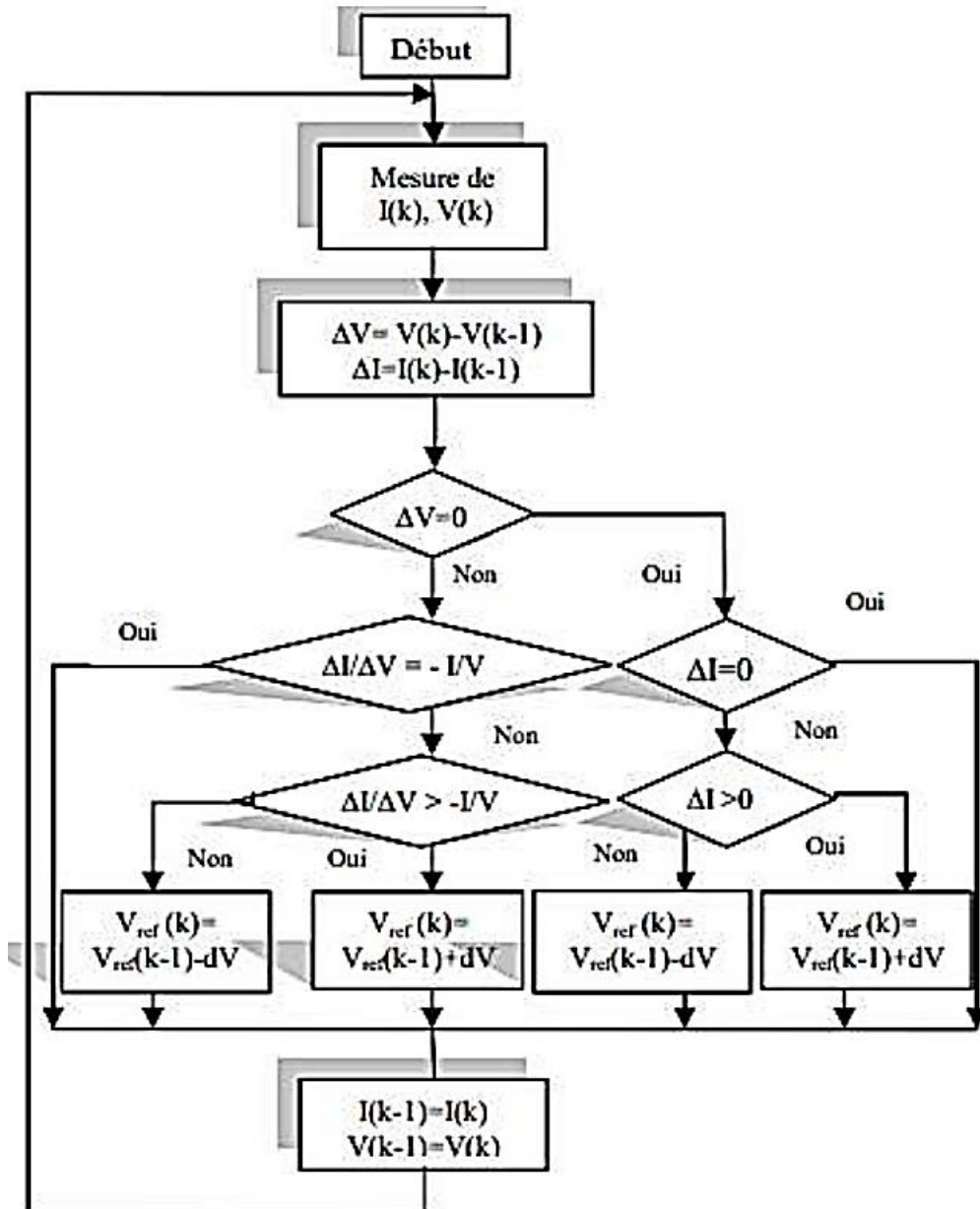


Figure II:14 Organigramme de l'algorithme INC. [5]

II.3.2.3. Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction de la Tension V_{oc} (FCO)

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante : $V_{mp} = kV_{oc}$

Où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension à circuit ouvert V_{oc} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale. [5]

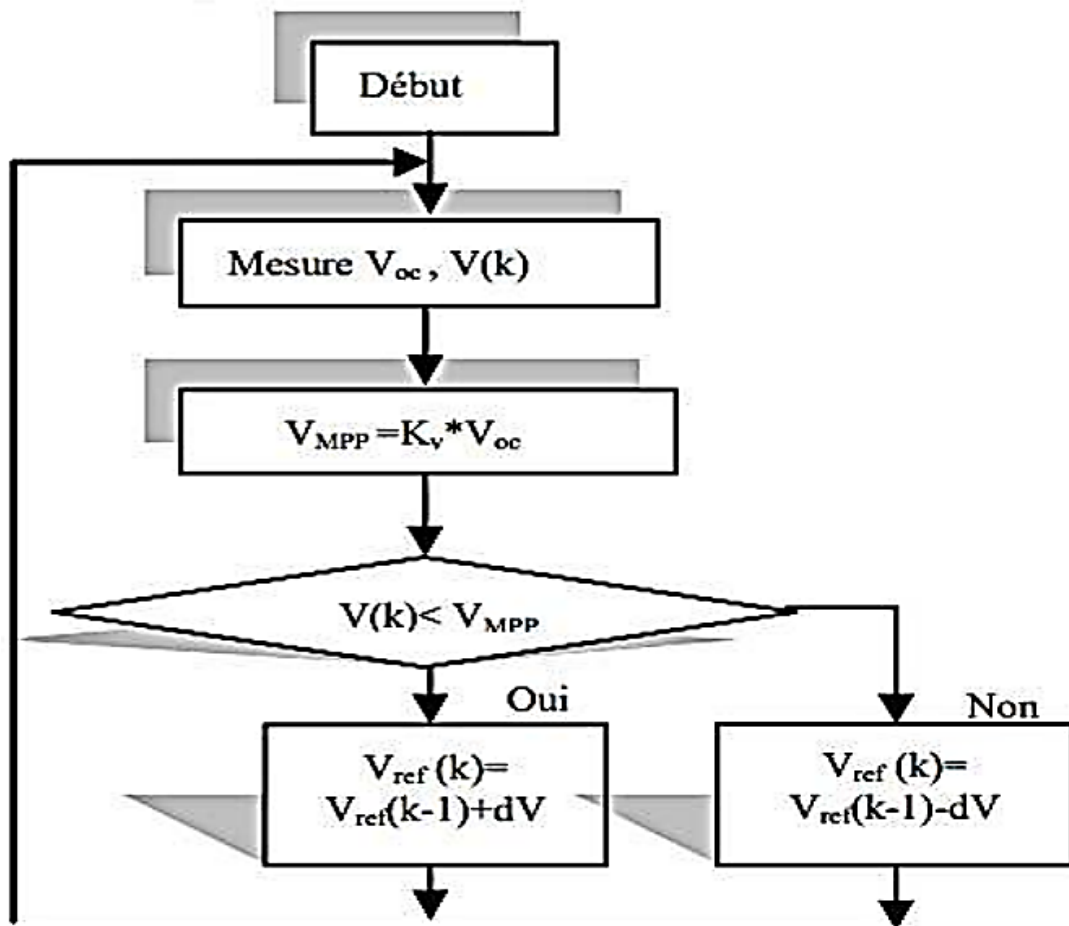


Figure II:15 Organigramme de l'algorithme FCO. [7]

II.3.2.4. Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc} (FCC)

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante : $I_{mp} = KI_{CC}$ Ou k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

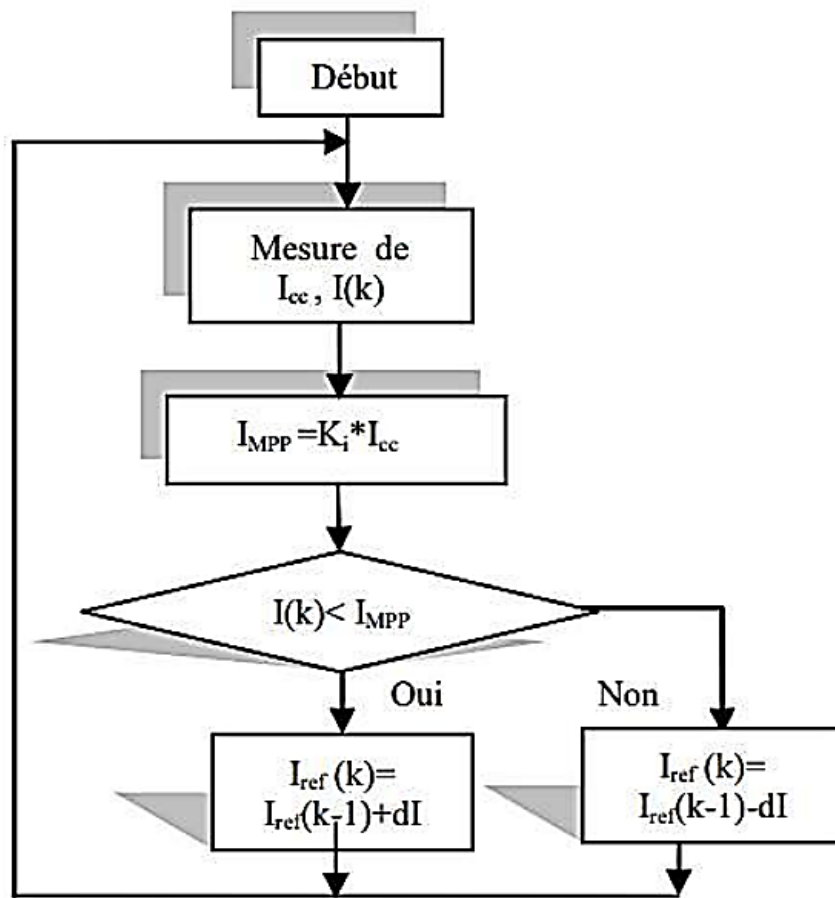


Figure II:16 Organigramme de l'algorithme FCC. [5]

II.3.2.5.

Algorithme

“Hill

Climbing”

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est l'un des techniques les plus utilisées pour la commande MPPT grâce à sa simplicité à mettre en œuvre mais elle possède des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques [16]. L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure II :17. [13]

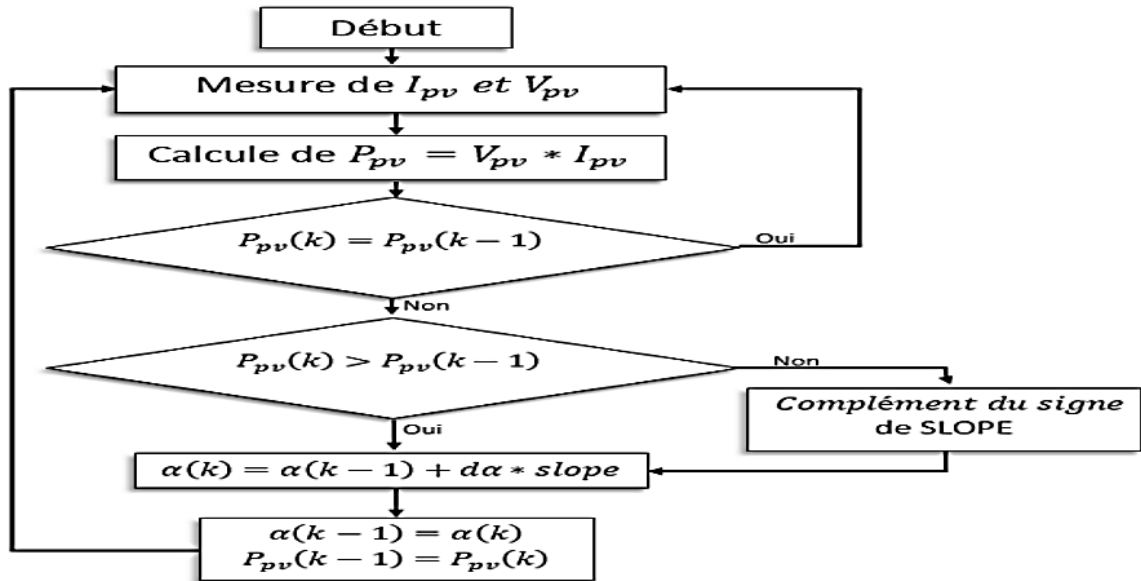


Figure II:17 Organigramme de l'algorithme Hill Climbing. [13]

Avec slope qui correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. Périodiquement, la puissance de panneau est comparée à la valeur déterminée précédemment, en fonction du résultat de comparaison, le signe de la valeur slope change ou reste identique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment.

II.4. Conclusion partielle

À l'issue de ce chapitre nous avons fait l'étude de l'étage d'adaptation d'un régulateur MPPT composé le plus souvent d'un convertisseur DC-DC élévateur de tension et nous avons exposés brièvement quelques algorithmes utilisés en vue d'assurer la poursuite du point de maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque.

Dans le chapitre qui suit nous établirons le schéma de notre régulateur ainsi que le dimensionnement de ces différents composant enfin grâce à la simulation nous évaluerons notre conception.

Chapitre III. CONCEPTION DU RÉGULATEUR PV

III.1 Introduction

Après avoir passé en revue toutes les théories nécessaires à la conception de notre régulateur, nous allons, dans de ce chapitre, concevoir notre régulateur, décrire ses composants ; évaluer ses performances via Matlab et enfin l'implémenter sur une carte Arduino via le logiciel de simulation Proteus.

III.2 Schéma bloc

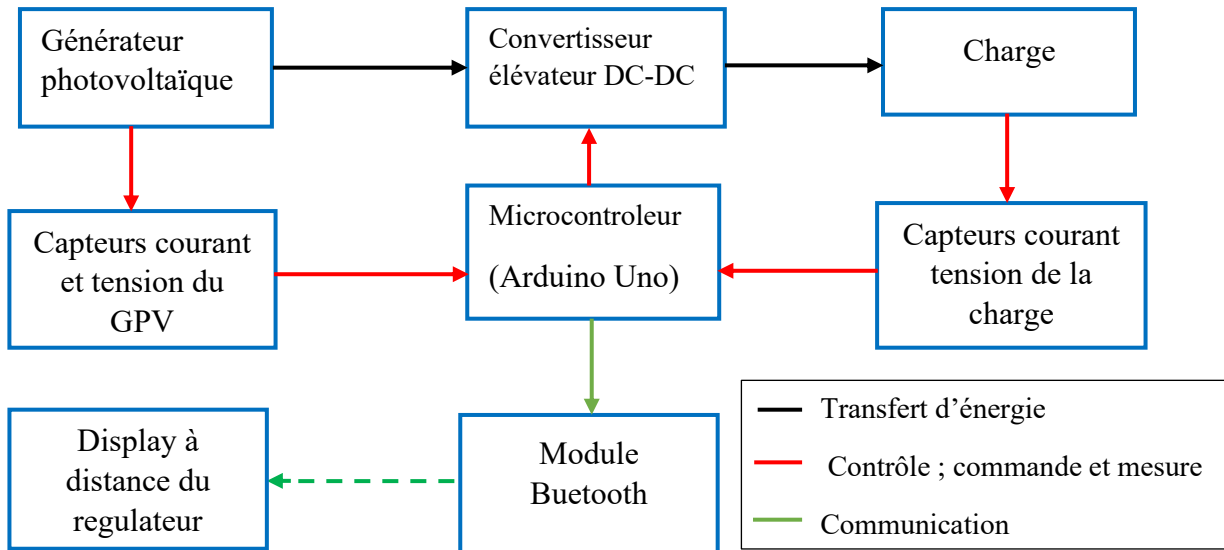


Figure III:1 Illustration du schéma bloc de notre régulateur

III.2. Caractéristiques du panneau solaire

Au cours de notre conception nous avons utilisé un groupe photovoltaïque composé de deux modules en parallèle dont les caractéristiques fournies à l'aide du logiciel MATLAB sont reprises dans le tableau 1. Les caractéristiques sont obtenues dans les conditions standard de mesure (éclairage de 1000 w/m^2 et température des cellules 25°C). Le choix du GPV est choisi du fait que qu'on utilisera un convertisseur boost.

Tableau III:1 caractéristiques du panneau solaire

Puissance maximale	213W
Tension a circuit ouvert	37V
Nombre de cellule par module	60
Courant de circuit ouvert	7.84A
Courant de point de fonctionnement maximal	7.43A
Tension de point de fonctionnement maximal	29.5V
Facteur d'idéalité de la diode	0.98119
Resistance shunt Rsh	313.0553
Resistance série Rs	0.39381

III.3. Dimensionnement du convertisseur Boost

Dans cette partie nous présenterons une démarche de dimensionnement rapide du convertisseur Boost pour répondre aux exigences d'un cahier de charge ou d'une application donnée.

Pour notre cas on a : $P_{ch} = P_{PV} = 426W$; $V_{PV} = 29.5V$; $R = 100\Omega$; $f_{sw} = 10^4 Hz$.

Avec :

f_{sw} : est la fréquence de découpage (du pilotage de l'interrupteur).

P_{ch} : puissance transmise la charge

P_{pv} : puissance fournie par le GPV

V_{pv} : tension du GPV

R : charge ohmique

La puissance fournie par un générateur PV à la charge peut être calculée par l'équation générale suivante :

$$P_{ch} = V_{ch} * I_{ch} = \frac{V_{ch}^2}{R} \quad \rightarrow \quad V_{ch} = \sqrt{R * P_{ch}} \quad (3.1)$$

Avec l'hypothèse selon lequel le convertisseur Boost est parfait c'est-à-dire $P_{ch} = P_{pv}$

On a : $I_{PV} = I_L = P_{PV}/V_{PV} = 426/29.5 = 14.44A$

De l'équation (3.1) $\Rightarrow V_{ch} = \sqrt{100 * 426} = 206.4V$ et $I_{ch} = P_{ch}/V_{ch} = 426/206.4 = 2.063A$

a) Calcul du rapport cyclique D

Pour calculer le rapport cyclique D qui donne la tension de sortie (de la charge) souhaitée, nous utilisons l'équation (2.5), ce qui donne :

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{ch}} = \frac{V_{ch} - V_{pv}}{V_{ch}} \quad (3.2)$$

Application numérique: $D = 1 - \frac{29.5}{206.4} = 0.857$

b) Calcul de l'inductance L

Pour calculer la valeur de l'inductance, il faut tenir en compte la valeur d'ondulation admissible du courant qui est généralement autour de 5% du courant nominale de la charge. [16] Dans ce cas, on peut écrire l'équation suivante :

$\Delta I_L = 0.05 * I_L \Rightarrow \Delta I_L = 0.05 * 14.44 = 0.722A$

ΔI_L : est la valeur de l'ondulation maximale du courant.

Dans le cas où l'interrupteur est on (T_{on}) :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} = \frac{\Delta I_L}{\Delta T} \implies L = \frac{D \cdot T \cdot V_{pv}}{\Delta I_L} = \frac{D \cdot V_{PV}}{f_{sw} \cdot \Delta I_L} \quad (3.3)$$

Application numérique: $L = \frac{0.857 \cdot 29.5}{10000 \cdot 0.722} = 0.0035H$

c) Calcul du condensateur de sortie C2

Pour calculer la valeur du condensateur de sortie C2, on suppose que la tension a une forme triangulaire, et que l'ondulation de la tension de charge est de l'ordre de 2% de sa valeur moyenne. [16]

C'est-à-dire $\Delta V_{ch} = 0.02 * V_{ch} \implies \Delta V_{ch} = 0.02 * 206.4 = 4.128V$

On aura pour le cas où l'interrupteur est fermé (T_{on}) :

$$C \frac{dV_{ch}}{dt} = I_{ch} \approx C \frac{\Delta V_{ch}}{D \cdot T} = C \frac{\Delta V_{ch} \cdot f_{sw}}{D} \implies C = \frac{D \cdot I_{ch}}{\Delta V_{ch} \cdot f_{sw}} \quad (3.4)$$

Application numérique : $C = \frac{0.857 \cdot 2.063}{4.128 \cdot 10000} = 4.283 \cdot 10^{-5} F = 42.83 \mu f$

Tableau III :2 Caractéristiques du convertisseur boost.

Fréquence du pilotage 10KHZ	Capacité d'entrée 30 μ f	Capacité de sortie 42.83 μ f	Inductance 0.0035H
--------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------	-----------------------

d) Calcul du condensateur d'entrée C1

Ce condensateur n'a pas une grande influence sur le montage, son rôle est de filtrer la tension continue du panneau solaire. [16]

III.4. Evaluation des performances et présentations des résultats sous MATLAB

Notre régulateur devant assurer la poursuite du point de fonctionnement maximale suivant l'algorithme perturb and observe présenté précédemment dans le second chapitre, a été évalué du point de vue performance dans le logiciel MATLAB. Le schéma illustré à la figure III :2 illustre le modèle implémenté dans Matlab.

L'environnement Matlab n'offre pas un modèle pour la simulation de la carte Arduino cependant le langage de programmation Matlab est très proche de celui de l'Arduino tous ayant comme base le langage C, un programme défini en langage Matlab pourra donc être facilement transporté dans la carte Arduino après quelque modification syntaxique. Chose que nous allons faire dans la partie qui va suivre.

Notre évaluation se fera :

- En variant l'irradiation tout en maintenant la température constante.
- En variant la température tout en maintenant l'irradiation constante.

Et cela sera possible grâce à l'interrupteur représenté dans la figure III :2.

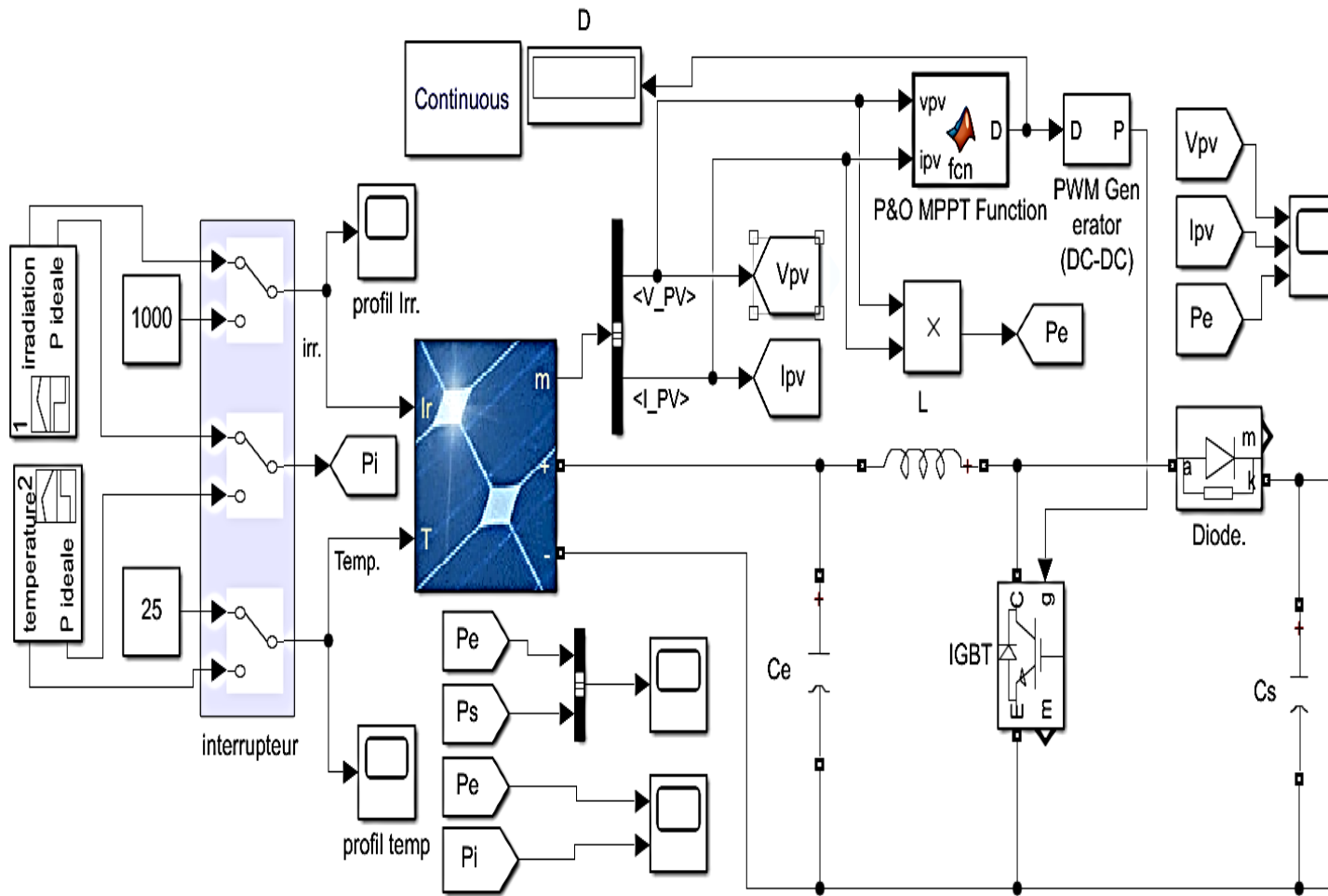


Figure III:2 Illustration du modèle Matlab implémenté

Pour notre premier cas d'évaluation, nous avons choisi un profil d'irradiation variable par segment comme le montre la figure III.3, afin tester l'efficacité de la commande P&O à une température constante de 25°C pour un temps de 2 secondes.

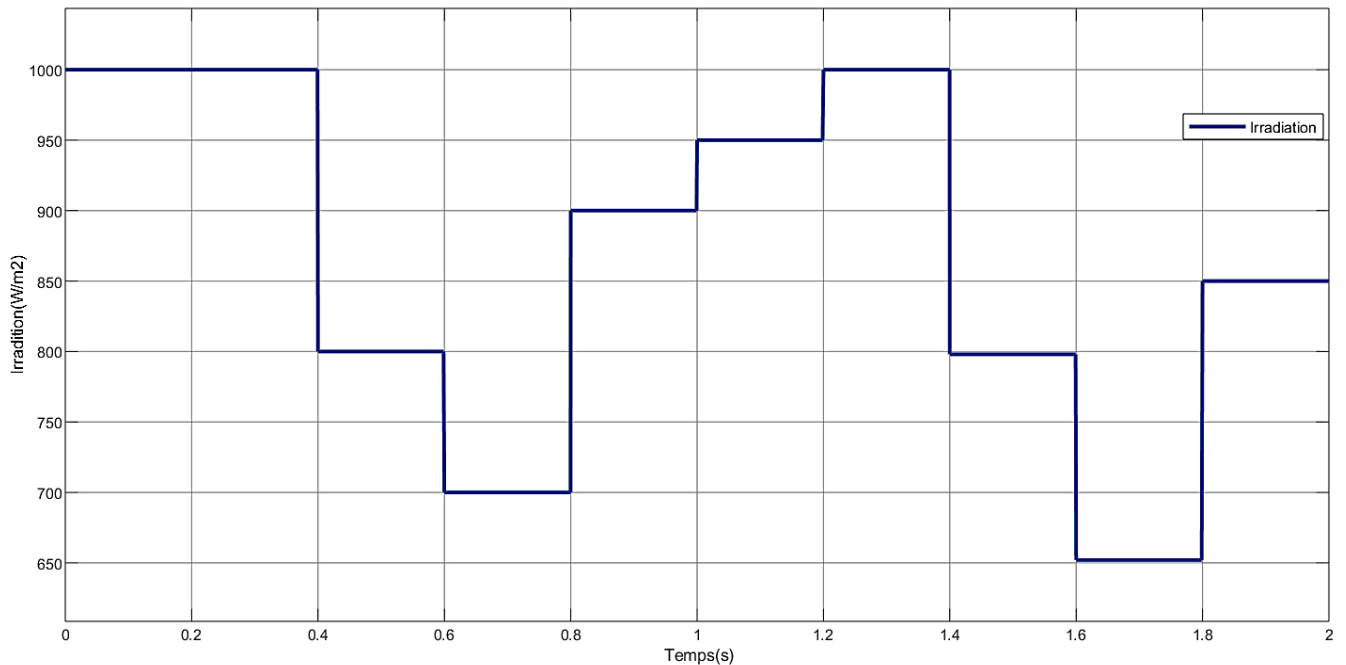


Figure III:3 Profil de l'irradiation

La figure III :4 montre la variation de la puissance maximale réelle du GPV et la puissance idéale. On voit bien que la puissance délivrée par le panneau suit bien le cas idéal mais elle présente des oscillations qui constituent un défaut pour notre commande P&O. On note qu'on arrive à nous approcher très significativement de la puissance maximale que peut nous fournir le générateur photovoltaïque à chaque variation d'irradiation. D'où la poursuite du point de puissance maximal a été bien implémentée, quel que soit la variation d'ensoleillement sous MATLAB.

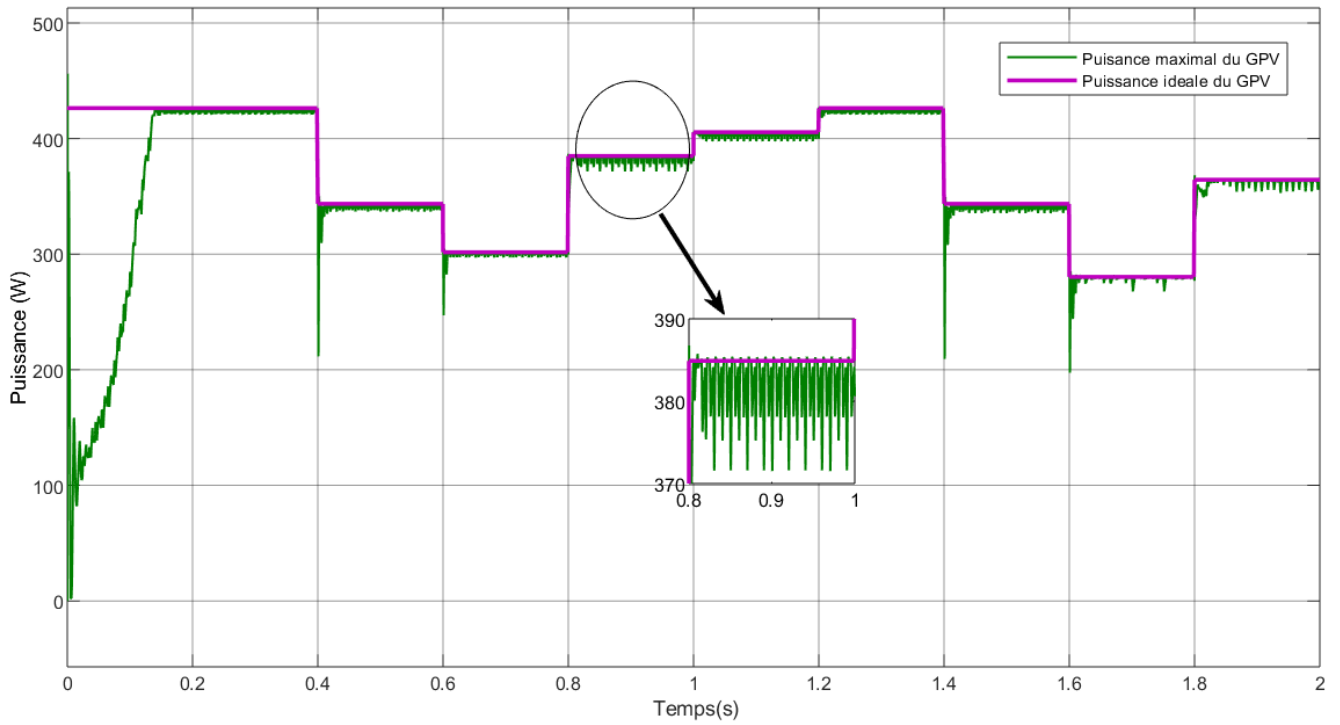
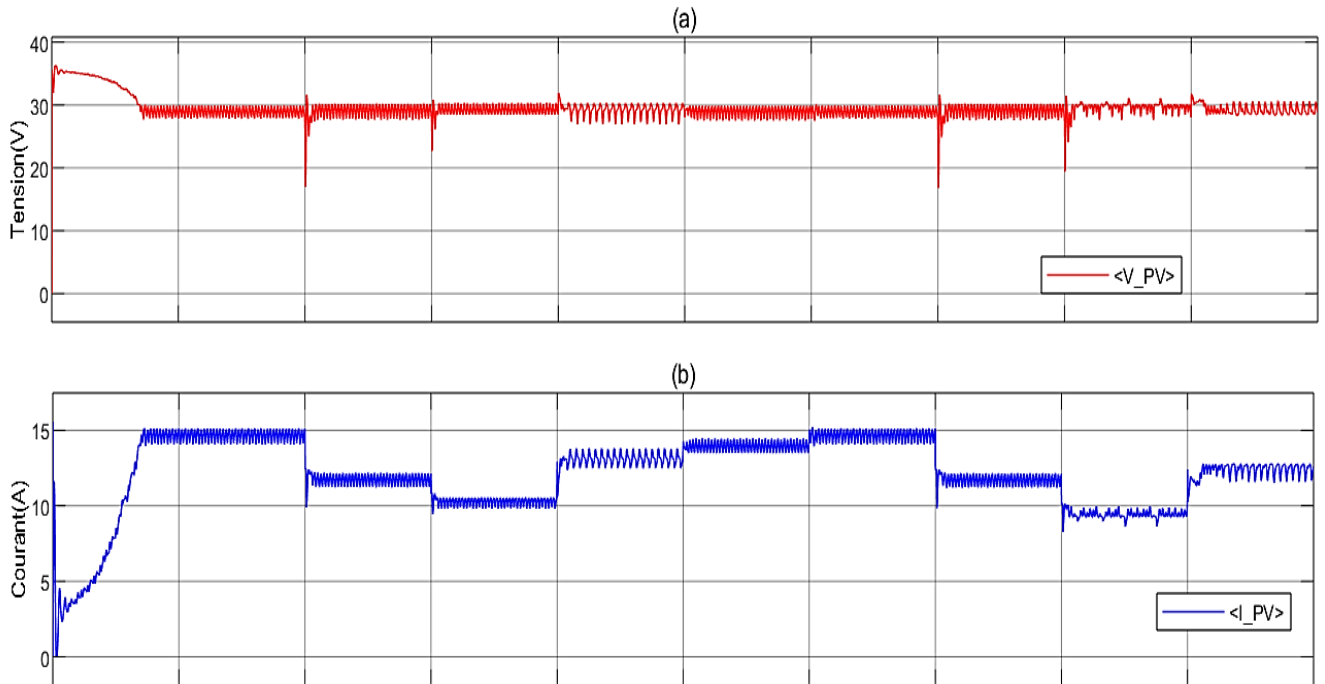


Figure III:4 Puissance Idéale et Puissance récupérée cas 1

La figure III:5 illustre les caractéristiques d'entrée du convertisseur DC-DC cas 1



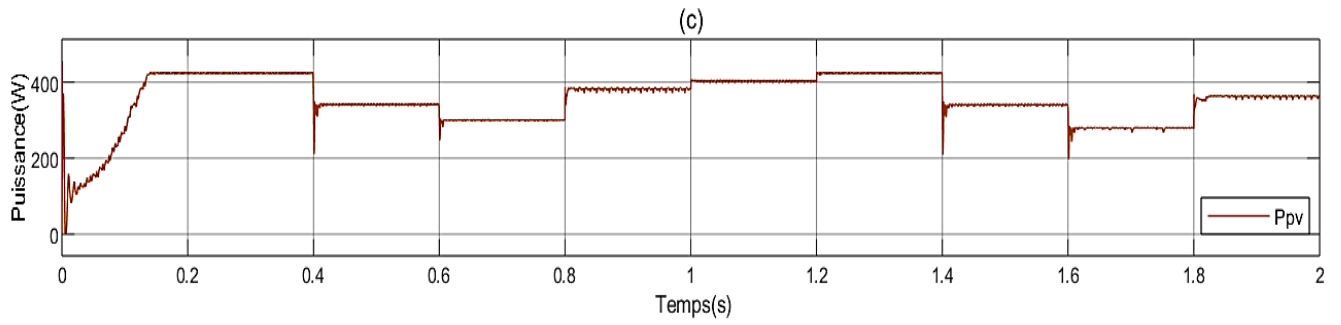


Figure III:5 Caractéristiques du GPV en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas 1.

La figure III :6 illustre les caractéristiques de sortie du convertisseur DC-DC cas 1

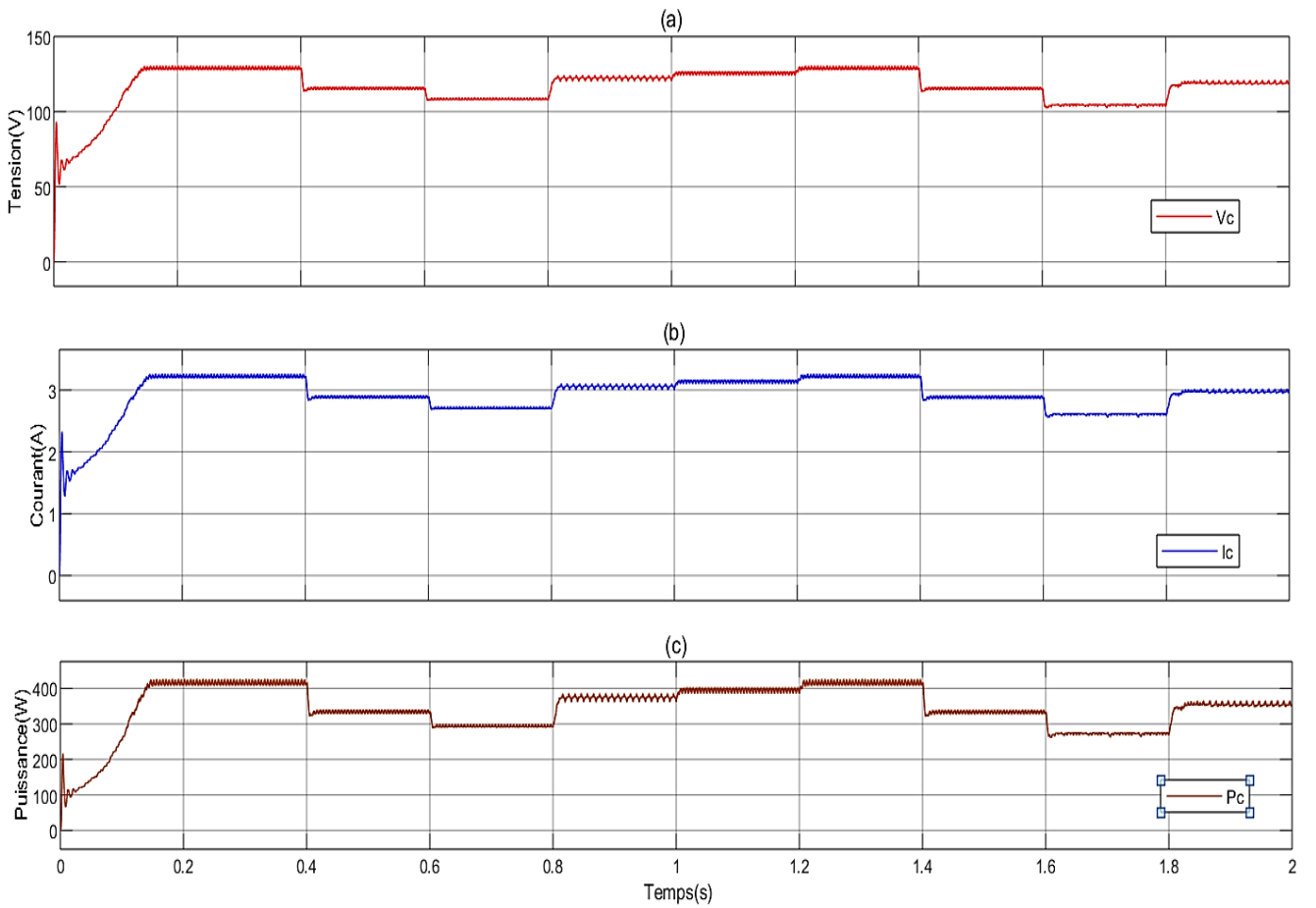


Figure III:6 Caractéristiques de la charge en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas1.

Pour la figure III :7. Illustre les courbes de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque et celle de la puissance au niveau de la charge. On remarque que la puissance au niveau de la charge est légèrement faible que celle du GPV à cause des pertes au niveau du convertisseur DC-DC.

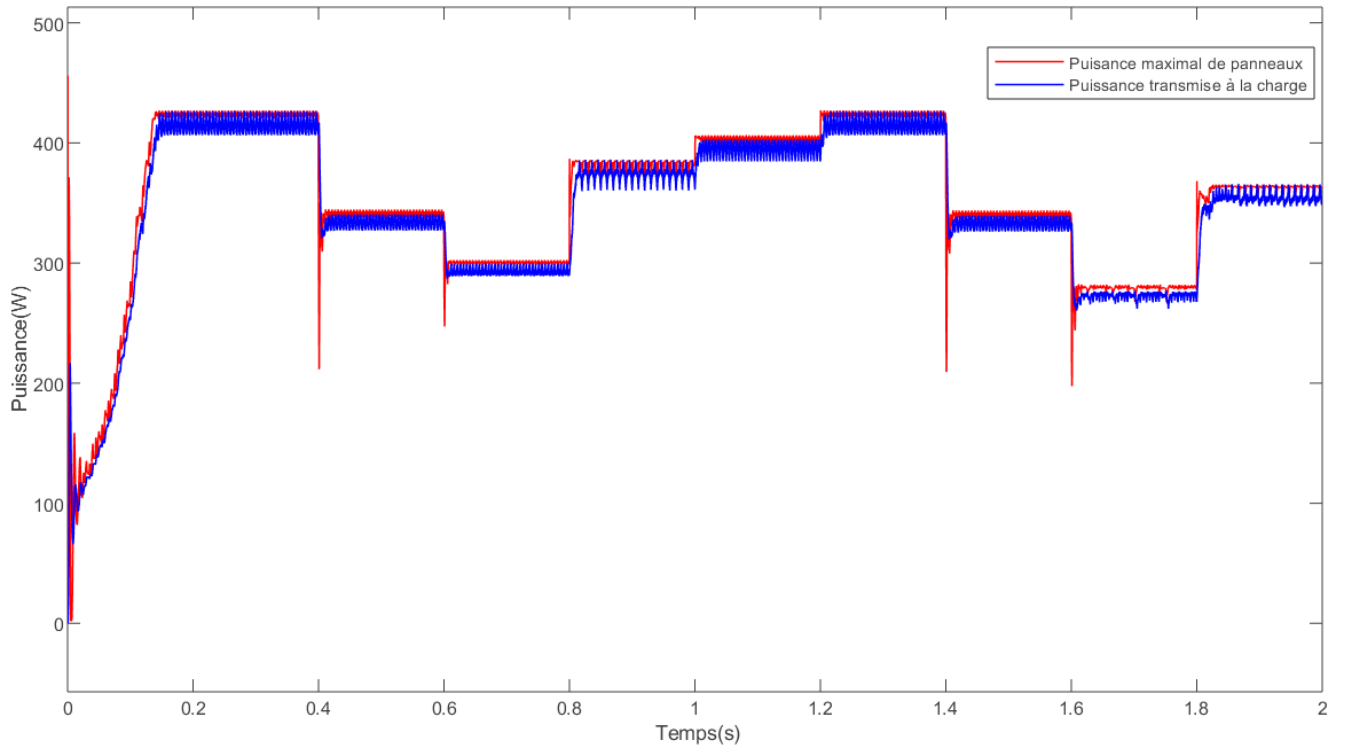


Figure III:7 Illustration des courbes de la puissance GPV et la charge en fonction du temps cas 1.

Pour notre deuxième cas d'évaluation, nous avons choisi un profil de température variable par segment comme le montre la figure III.8, afin tester la performance de la commande P&O à une irradiation constante de 1000W/m^2 pour un temps de 2 secondes.

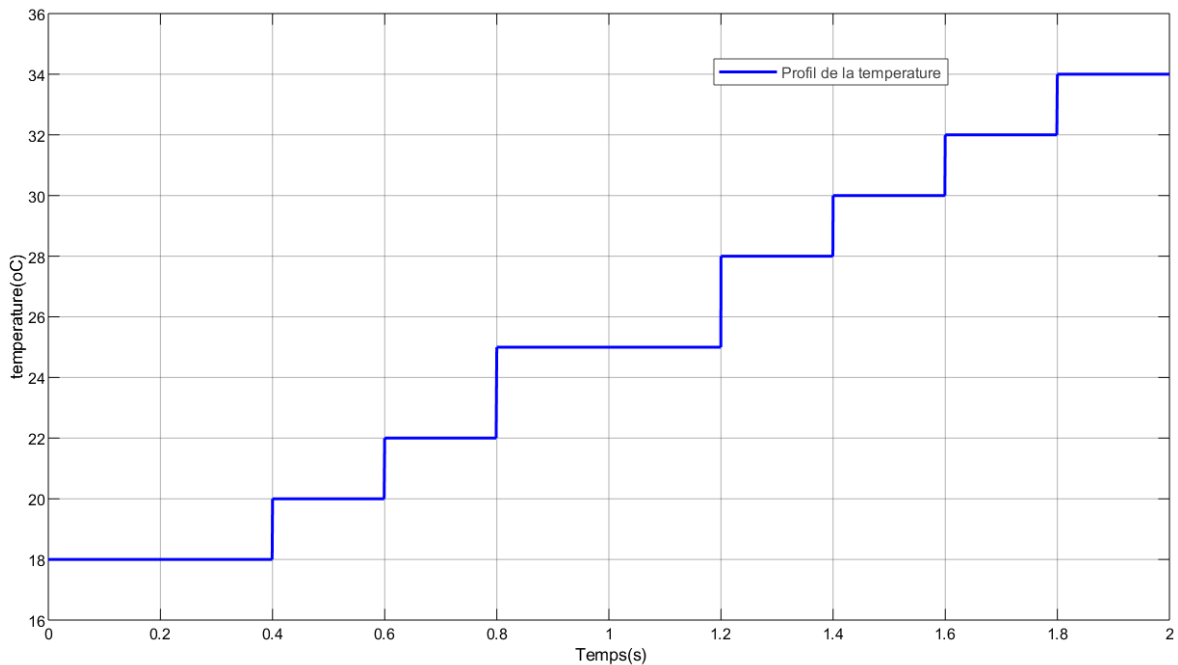


Figure III:8 Profil de la température

La figure III :9 montre la variation de la puissance maximale réelle du GPV et la puissance idéale. On trouve la même constatation que pour le cas1. On note qu'on arrive à nous rapprocher très significativement de la puissance maximale que peut nous fournir le générateur photovoltaïque à chaque variation de température. D'où la poursuite du point de puissance maximal a été bien implémentée, quel que soit la variation de la température sous MATLAB.

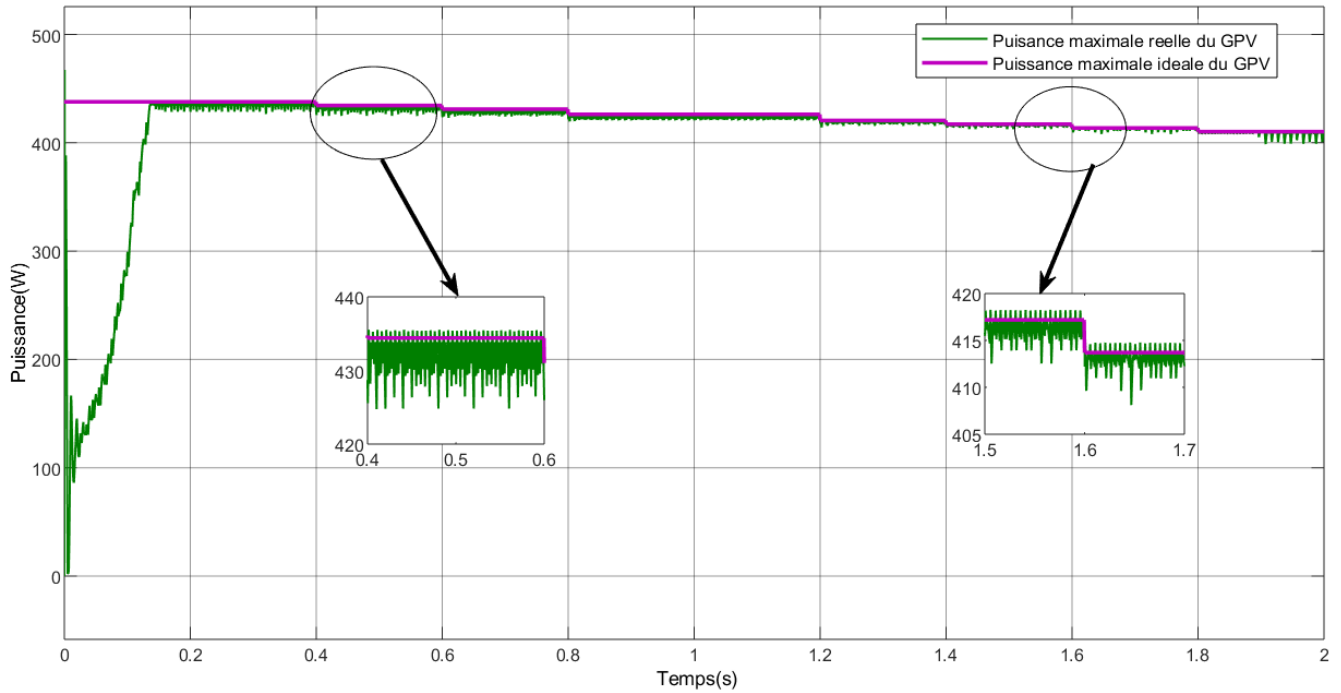
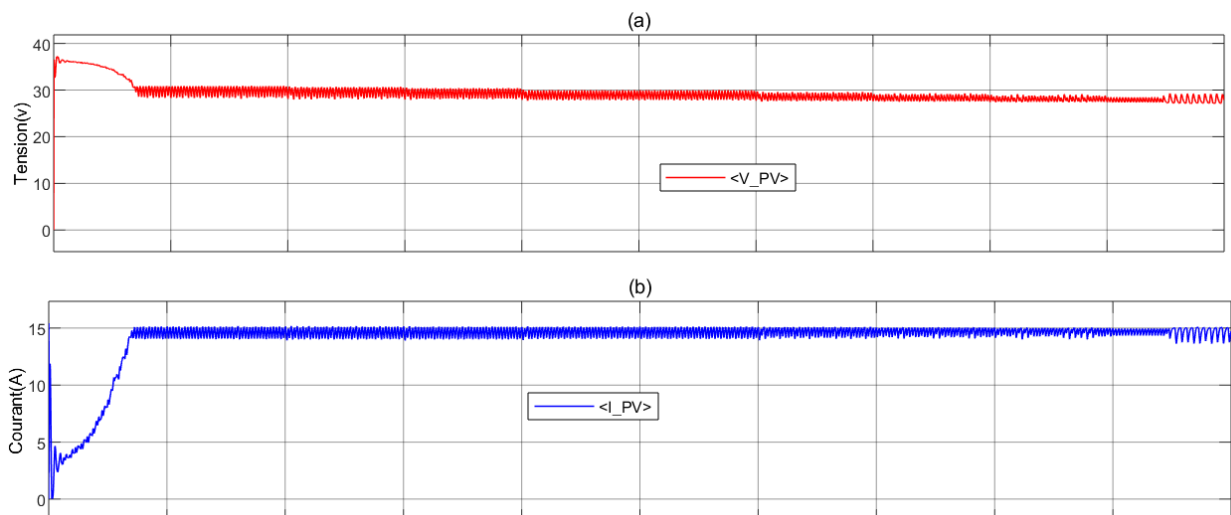


Figure III:9 Puissance Idéale et Puissance récupérée cas 2

La figure III:10 illustre les caractéristiques d'entrée du convertisseur DC-DC cas 2



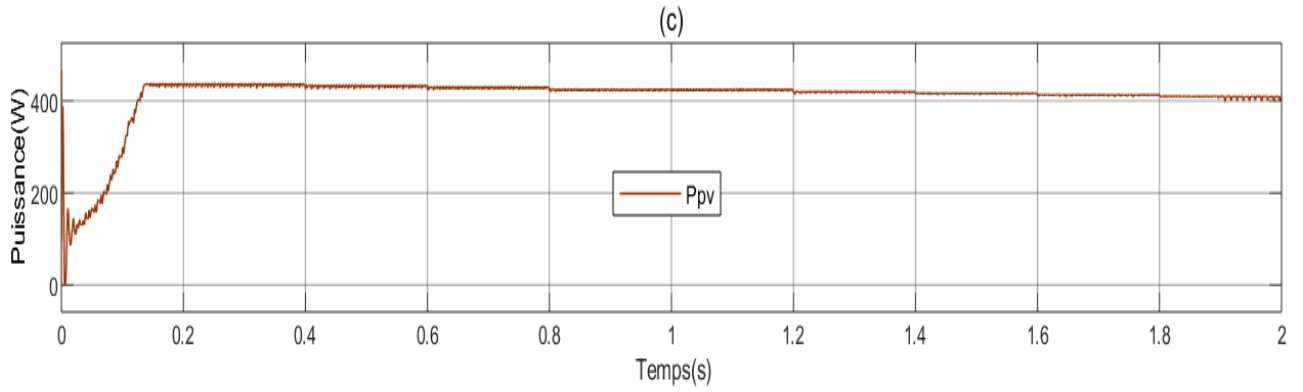


Figure III:10 Caractéristiques du GPV en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas 2.

La figure III:11 illustre les caractéristiques de sortie du convertisseur DC-DC cas 2

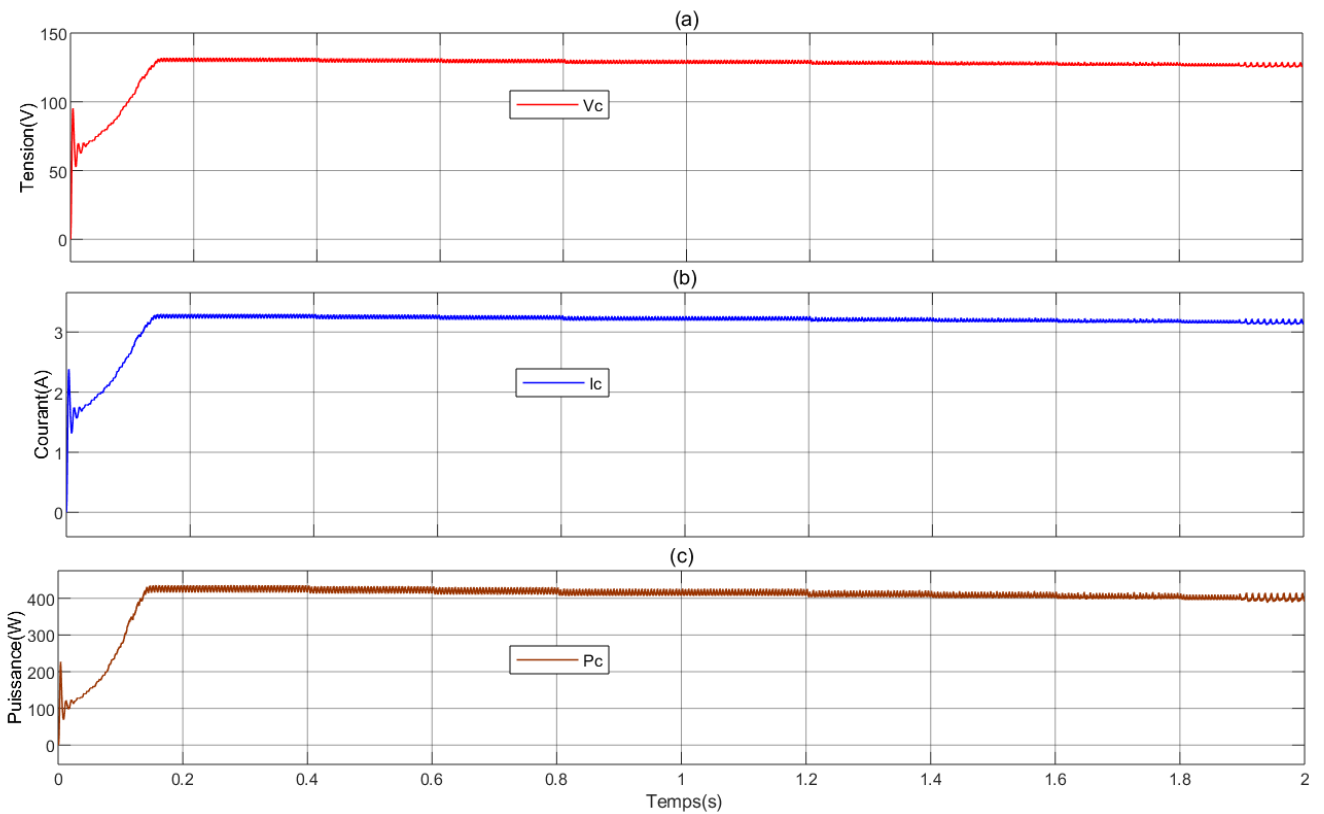


Figure III:11 Caractéristiques de la charge en fonction du temps, a) courant(A), b) tension(V), c) puissance(W) cas 2.

Pour la figure III :12 illustre les courbes de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque et celle de la puissance au niveau de la charge. Nous nous retrouvons face au même constant que le cas 1 (à la figure correspondante).

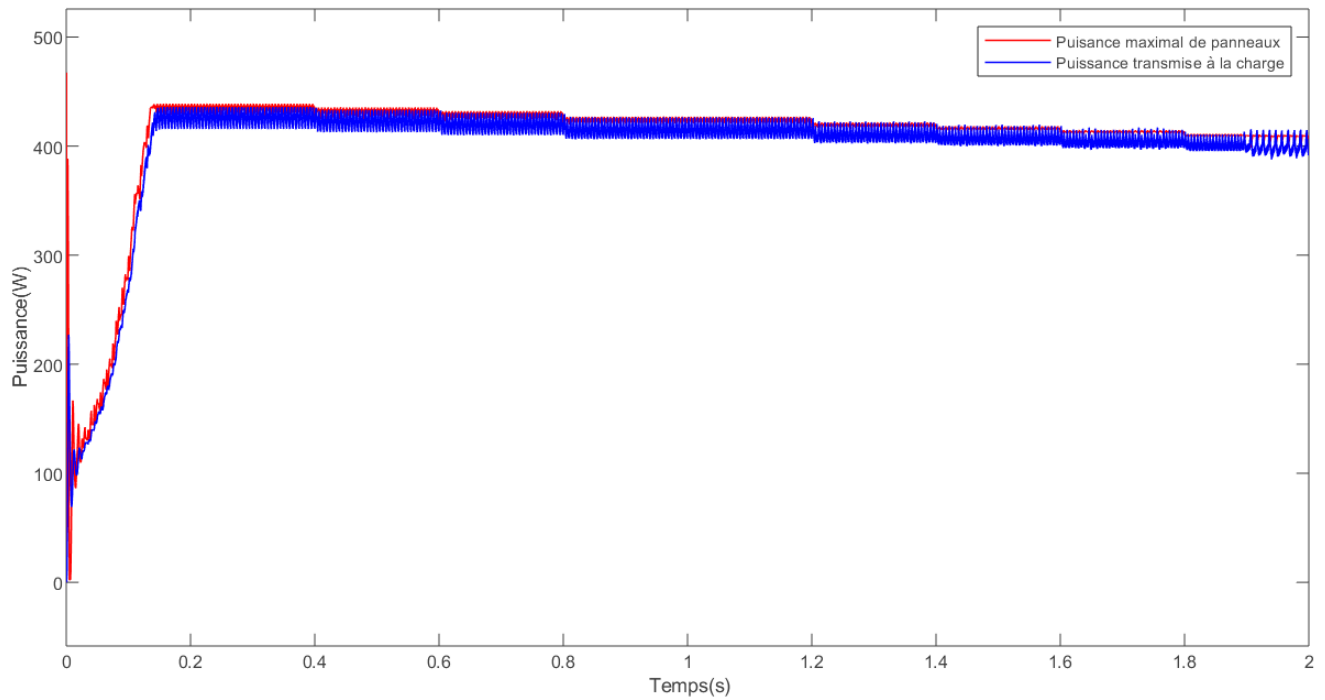


Figure III.12 Illustration des courbes de la puissance GPV et la charge en fonction du temps cas 2.

III.4. Implémentation de la commande P&O sur une carte Arduino

Après la validation de l'algorithme P&O par MATLAB, nous allons présenter une étude en vue de l'implémentation de cette commande dans une carte Arduino.

Pour bien mener cette étude, nous allons utiliser le logiciel PROTEUS qui permet la simulation précise des montages électroniques contenant des microcontrôleurs (ARDUINO, PIC etc.).

III.4.1. Présentation du microcontrôleur

Un microcontrôleur est un composant réunissant dans un seul circuit intégré un microprocesseur, divers dispositifs d'entrées/sorties, de contrôle d'interruptions ainsi qu'une mémoire notamment pour stocker le programme d'application. Dédié au contrôle, il embarque également un certain nombre de périphériques spécifiques des domaines ciblés (bus série, interface parallèle, convertisseur analogique numérique, ...). Grâce à leur capacité d'être programmable les microcontrôleurs ont révolutionné le domaine de l'électronique, lui permettant d'être lié à celui de l'informatique. Pour notre conception nous allons utiliser le microcontrôleur Arduino Uno qui est un de microcontrôleurs les plus utilisés de nos jours.

La carte Arduino est une carte électronique programmable, elle est donc équipée d'un microcontrôleur muni d'un processeur qui exécute les instructions qu'on implémente grâce à un langage de programmation (C, C++, python), la carte Arduino associée à différents types des capteurs qui permettent

de requérir des informations sur l'environnement se veut être un outil puissant dans plusieurs applications allant du domaine de l'électronique, de l'informatique, de l'électricité, ... La figure 3.7 illustre la description de la carte Arduino ainsi que les éléments qui la compose.

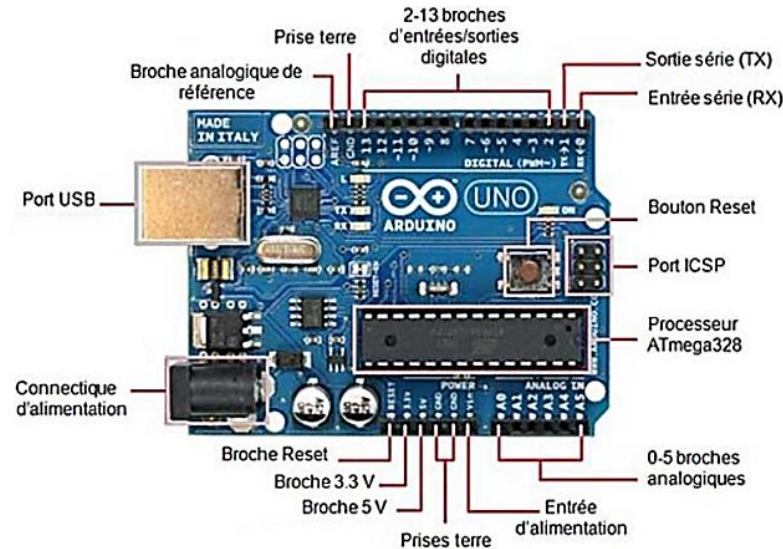


Figure III:13 Illustration de la carte Arduino Uno [21]

Comme illustré sur la figure III :13 la carte Arduino UNO est composé de 14 entrées/sorties digitale (de D0 à D13), des 6 entrées analogique (A0 – A5), des broches pour la communication série (TX/RX), d'un port USB qui permet de faire communiquer la carte avec un ordinateur afin d'y charger un programme ou requérir des informations provenant d'éventuelle capteur que la carte pilote , d'un microcontrôleur (ATmegaXXX) qui permet d'exécuter les instructions implémenté dans un langage de programmation et que l'on charge dans la carte Arduino.[21]

Les broches d'entrée/sortie digitale (numérique) permettent de piloter les signaux tout ou rien, chaque broche entre D0 et D13 peut être configurer comme une entrée ou une sortie digitale, une entrée ou une sortie digitale est une entrée ou sortie qui ne peut prendre que deux valeur 0 pour une absence de tension et 1 pour la présence d'une tension.

Notons que les sorties digitales de la carte Arduino ne peuvent fournir qu'un courant maximal de 40mA en sortie, dans le cas où l'on veut piloter une charge d'une grande puissance il faut donc créer une interface qui permettra de piloter la charge, le plus souvent on utilise un transistor en saturation dont le courant de base est généré par la carte Arduino.

Les broches digitales numéro 3, 5, 6, 9, 10 et 11 sont précédés par un tilde ~ cela signifie qu'ils peuvent être utilisés pour générer un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM), la génération de ce signal à ces broches se fait par programmation.[21]

Contrairement aux entrées/sorties digitales qui manipulent que des signaux tout ou rien les broches A0 – A5 permettent de manipuler les grandeurs analogiques par l'intermédiaire des capteurs analogiques.

Une grandeur analogique est une grandeur dont le domaine de valeur est compris dans un intervalle donné. La carte Arduino ne supporte que les grandeurs analogiques comprise entre 0 et 5V à ses entrées analogiques.

III.4.2. Présentation de logiciel de conception, simulation et programmation

a. Présentation du Logiciel Arduino IDE

L'environnement de développement Arduino IDE est l'outil utilisé pour écrire des codes avec le langage Arduino C, il est ensuite converti en une forme exécutive qui peut être placée sur le microcontrôleur.

Cet environnement de développement est simple et facile à manipuler, et il est presque sans complication dans l'aspect général, il contient seulement ce que le programmeur a besoin pour commencer à développer et en même temps pour charger le code directement au microcontrôleur.

Le langage de programmation utilisé est C++, compile avec avr-g++, et lie à la bibliothèque de développement Arduino, permettent l'utilisation de la carte et de ses entrées/sorties. La mise en place de ce langage standard rend aisée le développement de programmes sur les plates-formes Arduino, toute personne maîtrisant le C et C++. [22] Pour commander une carte Arduino sur PC, on installe le logiciel du même nom Arduino IDE (version 1.8.5) qui est une application Java et qui a l'interface montrée dans la figure III:14.



Figure III:14 Vue d'ensemble du logiciel Arduino

b. Présentation du logiciel proteus

PROTEUS est une suite logicielle destinée à l'électronique Développé par la société Labcenter Electronics.

Le logiciel ISIS de PROTEUS est principalement connue pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs dès l'étape de conception.[22]



Figure III:15 logo Proteus Isis

III.4.3 Présentation du logiciel de conception de l'application d'affichage

L'application mobile qui nous permettra d'afficher sera conçu grâce à MIT App inventor. App inventor est un outil de développement en ligne pour les téléphones et les tablettes sous Android. La plateforme de développement est offerte à tous les utilisateurs possédant un compte Gmail. Elle rappelle certains langages de programmation simplifiés des années 80 et s'inspire des travaux d'une étudiante en thèse au MIT, Ricarose Roque. Le projet a été dirigé par Hal Abelson au MIT qui a mis au point le portage du langage LOGO sur Apple 2 au début des années 80. [23]

La programmation est réalisée sans taper une seule ligne de code, mais simplement en associant et en paramétrant des briques logicielles toutes faites.



Figure III:16 Interface App Inventor

III.4.4 Schéma complet et éléments constitutifs

La figure III :17 illustre le schéma de principe qui modélise le GPV dont les paramètres sont donnés par le tableau III.1 ; on note la présence d'une source de courant, d'une diode ainsi que les résistances shunt et en série du GPV.

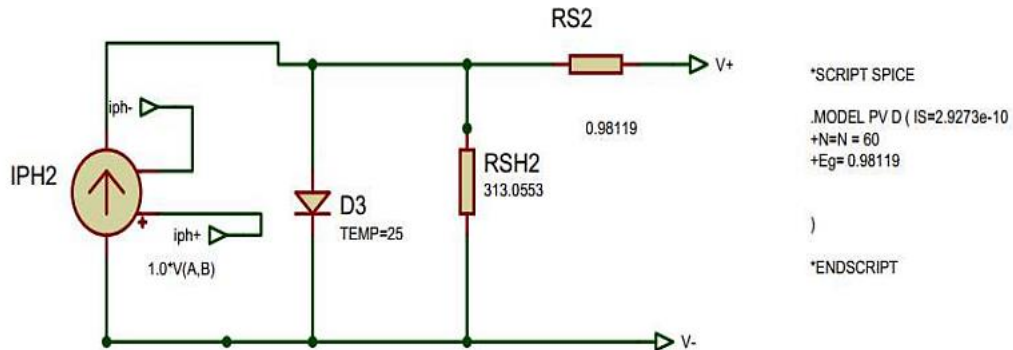


Figure III:17 Illustration de la modélisation du GPV [8]

La figure III :18 illustre le modèle de notre GPV pour notre simulation avec Proteus et la figure III :19 illustre les courbes caractéristiques prélevées de notre GPV.

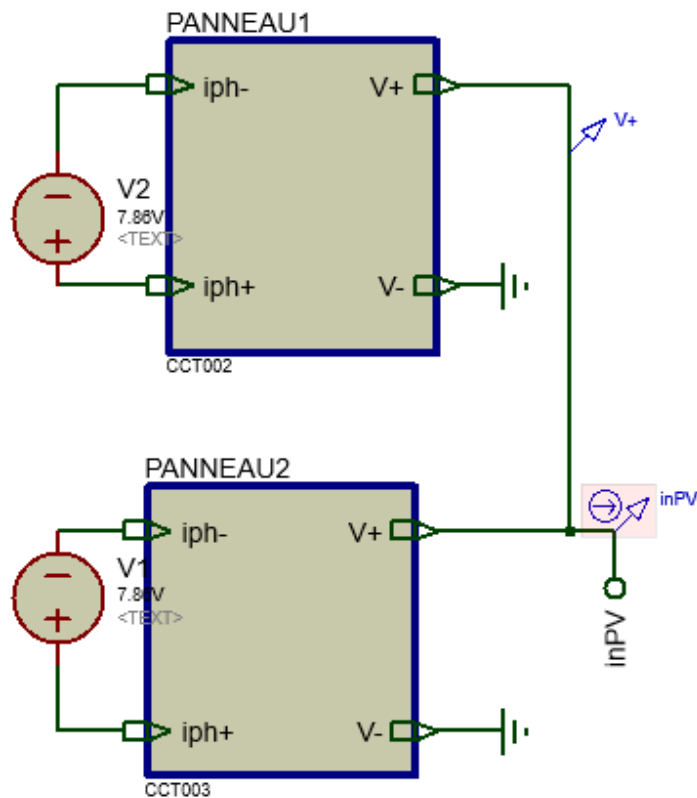


Figure III:18 Illustration du schéma pour la simulation du GPV

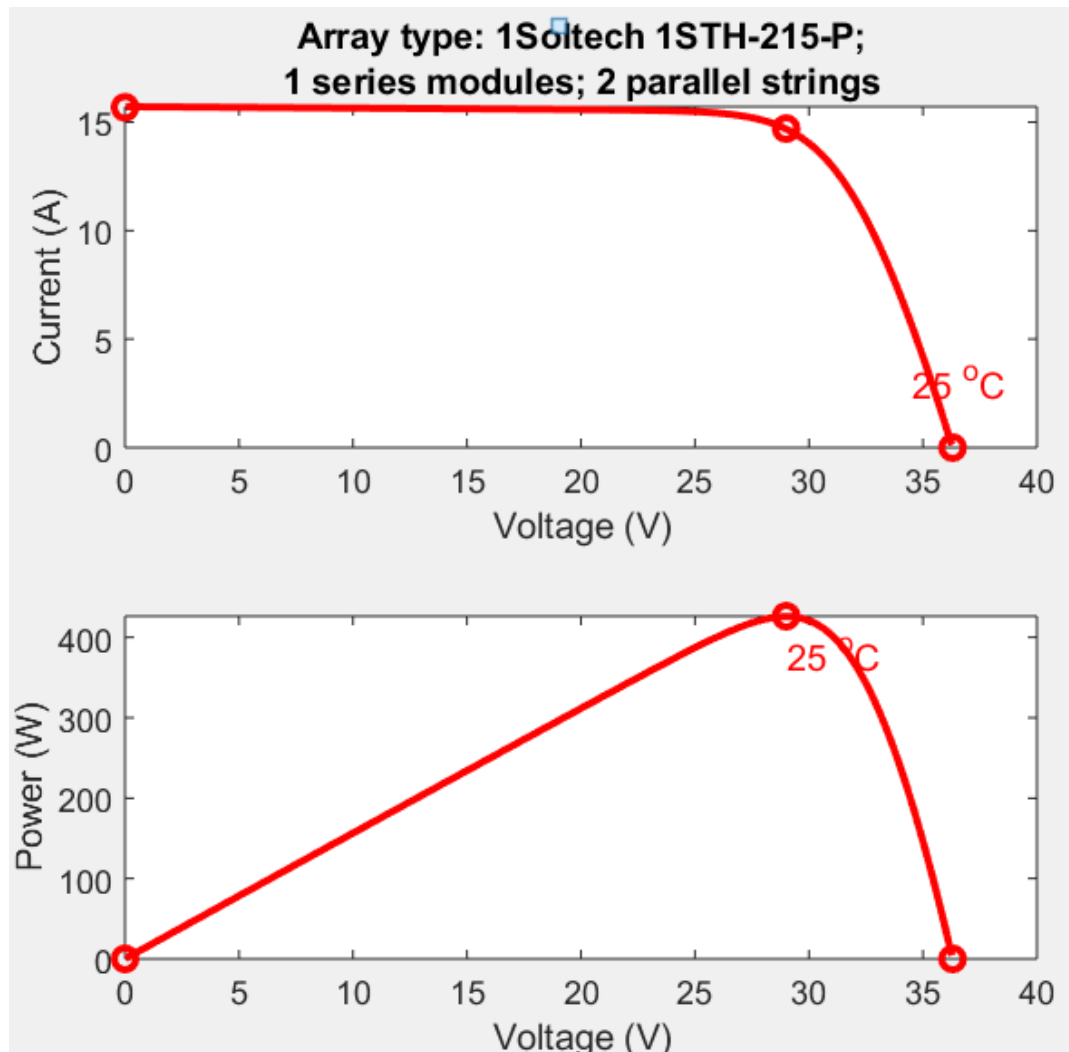


Figure III:19 courbes caractéristiques du GPV

Le schéma du régulateur présenté à la figure III :20 Comporte principalement trois parties dont :

- Le circuit de puissance du régulateur : composé principalement du convertisseur DC-DC (élevateur) ainsi que du transistor MOSFET Q1 qui le pilote via le signal de la carte Arduino
- Module Bluetooth : qui servira de connexion à distance avec l'application mobile.
- L'afficheur : composé d'un écran LCD permettant d'indiquer l'état du régulateur

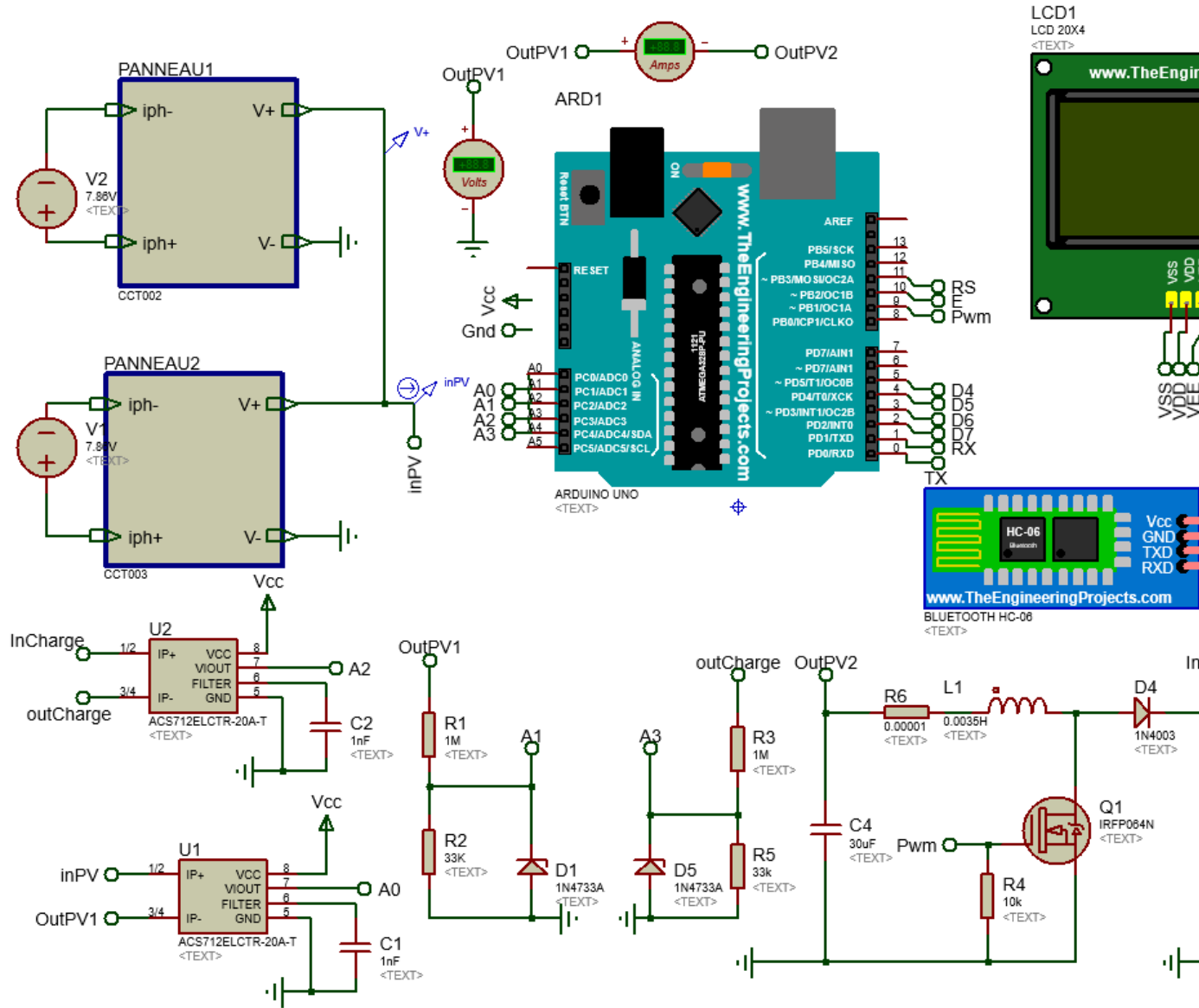


Figure III:20 Illustration complet du schéma du régulateur

III.4.5 Description des principaux matériels utilisés

a. Capteur de tension

Le capteur de tension est composé d'un pont diviseur de tension qui permet de prélever un niveau de tension et l'adapter à un niveau de tension que la carte Arduino peut analyser ; en effet la carte Arduino ne peut supporter qu'une tension maximale de 5V pourtant le plus souvent la grandeur d'entrée est supérieure à 5 V il faut donc une adaptation entre la tension à mesurer et la tension que peut supporter la carte Arduino ce qui est fait par un pont diviseur , la figure III :21 illustre le schéma d'un pont diviseur , on remarque la présence d'une diode zener D1 qui permet de limiter la tension au borne de la résistance R2 à la valeur permise par la carte , à l'occurrence 5V .

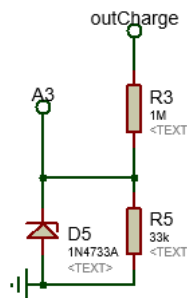


Figure III:21 Illustration du schéma du pont diviseur de tension avec la diode zener pour limiter la tension en sortie

Soit V_e la tension d'entrée, la tension V_S est déterminée par : $V_S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e$, on remarque que la tension de sortie V_S est moindre que celle d'entrée et dépend fortement des valeurs des résistances R_1 et R_2 , les résistances R_1 et R_2 doivent avoir une résistance élevée afin de limiter le courant et ainsi minimiser la perte de puissance. Pour dimensionner notre pont diviseur on considère la résistance $R_1 = 1M\Omega$ et on admet que pour une tension d'entrée $V_e = 170V$, la tension de sortie $V_S = 5V$. Ainsi on détermine R_2 à l'aide de l'expression de V_S on a : $R_2 = 33K$

b. Capteur de courant

Le capteur de courant ACS712 est un dispositif utilisé pour mesurer le courant électrique dans un circuit. Il est souvent utilisé dans des projets électroniques et des applications où la surveillance du courant est nécessaire. Ce capteur se branche en série avec la charge sur un circuit alternatif (AC) ou continu (DC) et permet de mesurer le courant qui traverse le capteur.

Le module ACS712 fonctionne grâce à l'effet Hall. Une cellule de Hall, plaquette semiconductrice d'une épaisseur d , est transverse longitudinalement par un courant de commande I_C (figure III :22). En présence d'une induction magnétique B , les porteurs de charge de ce courant subissent une force de Lorentz (F_L) perpendiculaire à leur mouvement et au champ B . Ceci entraîne une variation de leur nombre sur les côtés de la cellule se manifestant par une différence de potentiel que l'on appelle tension de Hall V_H . [13]

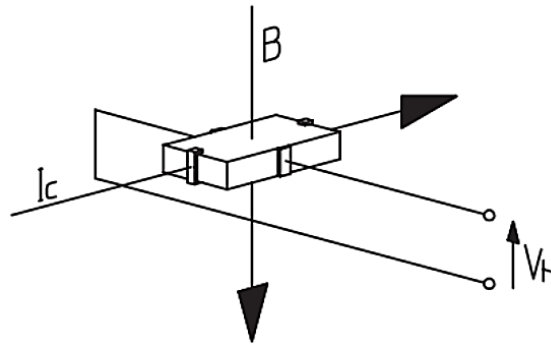


Figure III:22 L'effet Hall [13]

Le capteur produit une tension analogique proportionnelle au courant mesuré. Cette tension peut être lue à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un autre dispositif d'acquisition de données.

Caractéristiques

- Tension d'entrée : DC 5V
- Sortie : analogique
- Version : 30 ampères (A)
- Sensibilités : 66mV/A
- Plage de courant de mesure jusqu'à ± 30A

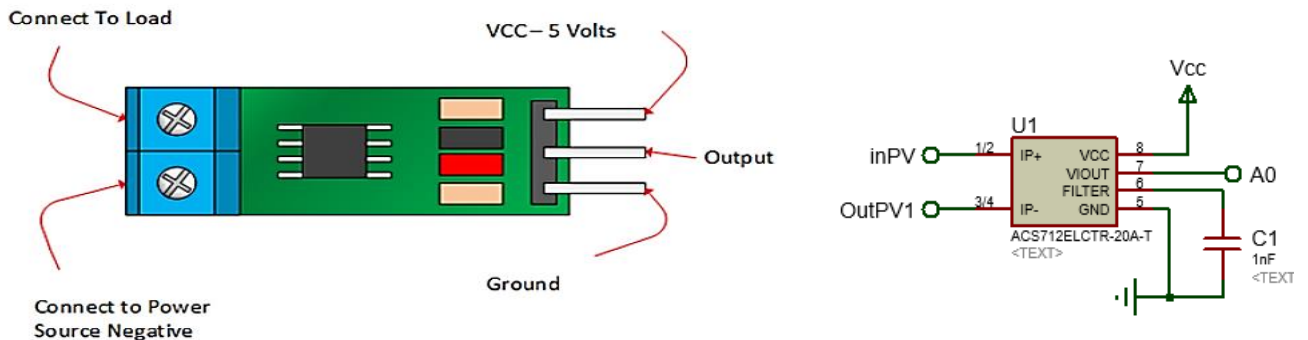


Figure III:23 Capteur de courant ACS712 [24] et son équivalent sous PROTEUS

Définition des pins du capteur ACS712

Tableau III:3 définition des pins du capteur de courant

Broche	Description	Fonction
VCC	+5V	Connecter à +5V
OUT	Sortie analogique	Connecter à la broche du microcontrôleur
GND	Terre	Connecter à la terre
Les 2 pins connecteurs	Broche d'interface	Connectez en série à la charge

c. Transistor de commutation [25]

L'interrupteur du convertisseur DC – DC est un MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor) ; en effet un MOSFET contrairement à un transistor bipolaire classique est commandé en tension. La figure III :24 donne l'illustration du symbole d'un MOSFET ainsi que les broches qui le compose.

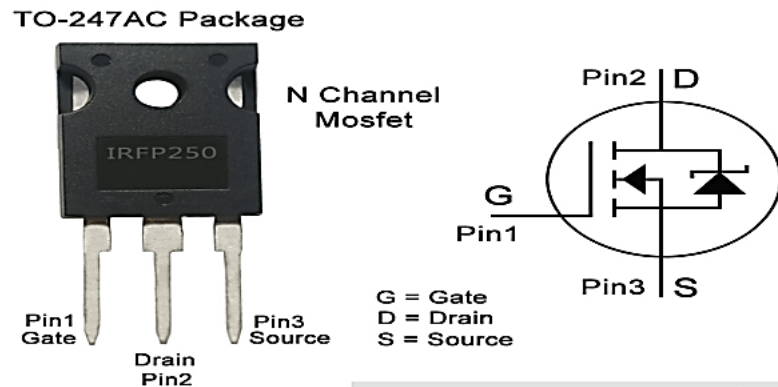


Figure III:24 MOSFET à canal N et son symbole [25]

La figure III :20 nous fait remarquer que le MOSFET se compose de trois broches, la grille G, le drain D et la source S. Pour qu'un MOSFET à canal N puisse commuter il faut que le courant I_D soit supérieur à 0 ($I_D > 0$) et la tension V_{GS} supérieure à 0 ($V_{GS} > 0$). La figure III.25 donne la caractéristique d'un MOSFET, on remarque que les valeurs du courant I_D et celles de la tension V_{DS} dépendent de la tension V_{GS} , la commande est donc en tension V_{GS} .

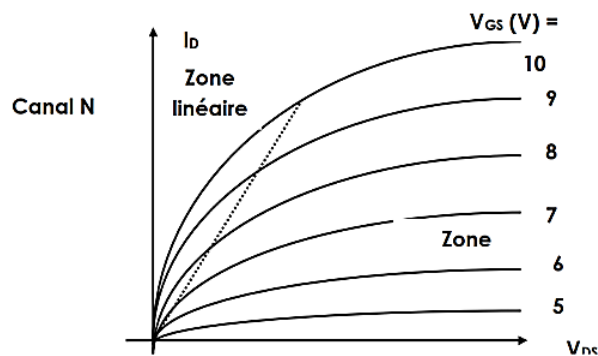


Figure III:25 Illustration de la courbe du courant I_D en fonction de la tension V_{DS} pour de tension de commande V_{GS} [26]

d. Module Afficheur LCD 4x20

L'afficheur LCD conviendra pour notre projet pour afficher les paramètres de fonctionnement. Grâce à la commande par le microcontrôleur, les écrans LCD permettent une visualisation aisée des messages.

L'afficheur LCD dispose 4x20 caractères avec 20 colonnes et 4 lignes.

Caractéristiques

- Tension d'alimentation : 5V
- Consommation en courant: 2mA

Tableau III :4 Définition des broches d'interfaçage et connexion avec le I2C PCF8574 [27]

Number	Symbol	states	Number	Symbol
1	VSS	GND	9	D2
2	VDD	VCC	10	D3
3	VL	VO	11	D4
4	RS	(V/L)	12	D5
5	R/W	Read/Write	13	D6
6	E	Enable	14	D7
7	D0	Date 1/0	15	BLA
8	D1	Date 1/0	16	BLK



*Figure III:26 Écran LCD 4*20 avec différentes broches[27]*

e. Module Bluetooth HC-05/ HC-06 [27]

Les modules Bluetooth HC-05 et HC-06 permettent d'établir une liaison Bluetooth (liaison série) entre une carte Arduino et un autre équipement possédant une connexion Bluetooth (Smartphone, tablette, seconde carte Arduino, etc....).

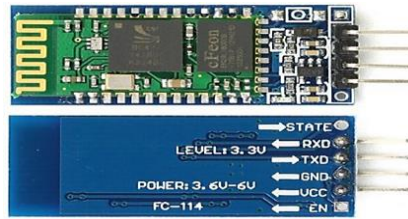


Figure III:27 Module Bluetooth H6.

La liaison peut être réalisée jusqu'à une distance de 9m. Le module HC-06 est un module "esclave" contrairement au module HC05 qui est "maître".

Un module "maître" peut demander à un autre élément Bluetooth de s'appairer avec lui alors qu'un module "esclave" ne peut recevoir que des demandes d'appairage.

Le module HC-05/HC-06 peut communiquer avec la carte Arduino via la liaison série (broches numériques N°0 et N°1) mais le moniteur série ne peut plus être utilisé. C'est pour cette raison qu'il est préférable d'utiliser la bibliothèque SoftwareSerial intégrée d'office dans l'IDE Arduino.

La broche RX de la carte Arduino doit être raccordée à la broche TX du module Bluetooth HC-05. La broche TX de la carte Arduino doit être raccordée à la broche RX du module HC-05/HC-06.

La tension d'alimentation de ces modules doit être comprise entre 3,3 et 5 V, mais la broche RX ne peut recevoir qu'une tension maximale de 3,3 V. Prévoir un pont diviseur de tension pour ne pas endommager la broche RX du module Bluetooth

Par exemple un pont constitué par 5k1 en série avec 10k ou 1k en série avec 2k

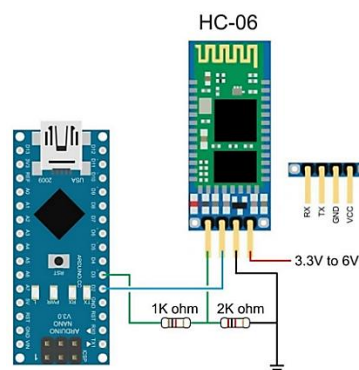


Figure III:28 Illustration du branchement du module Bluetooth sur le microcontrôleur.

III.4.6 Présentation de résultats

Notre GPV étant modélisé à une irradiation de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et a une température 25°C ; affichons sur l'écran d'une manière progressive l'état régulateur, du régime transitoire (quelques cas) au régime permanent.

La figure III :29 a) Illustre l'affichage de l'état du régulateur à temps égal à 0.143285331 seconde sous Proteus (régime transitoire), La figure III :29 b) Illustre l'affichage de l'état du régulateur à temps égal à 0.339825555 seconde sous Proteus (régime transitoire), la figure III :29 c) illustre l'affichage de l'état du régulateur en régime permanent 1 et la figure III :29 d) illustre l'affichage de l'état du régulateur en régime permanent 2.

Après un temps on constate qu'on retourne à la figure III :29 c) puis à la figure III :29 d), ainsi de suite.

Nous remarquons sur la figure III :29 d) qu'on se rapproche significativement à une puissance avoisinante 426W en régime permanent comme défini précédemment à la figure III :19 avec les courbes caractéristiques prélevées de nos modules photovoltaïques et que la puissance à la sortie est légèrement inférieure à celle de l'entrée d'une différence de quelques watts et cela dû aux pertes au pertes engendré par le convertisseur DC-DC. D'où la poursuite du point de fonctionnement optimale est bien implémentée sous la carte Arduino.

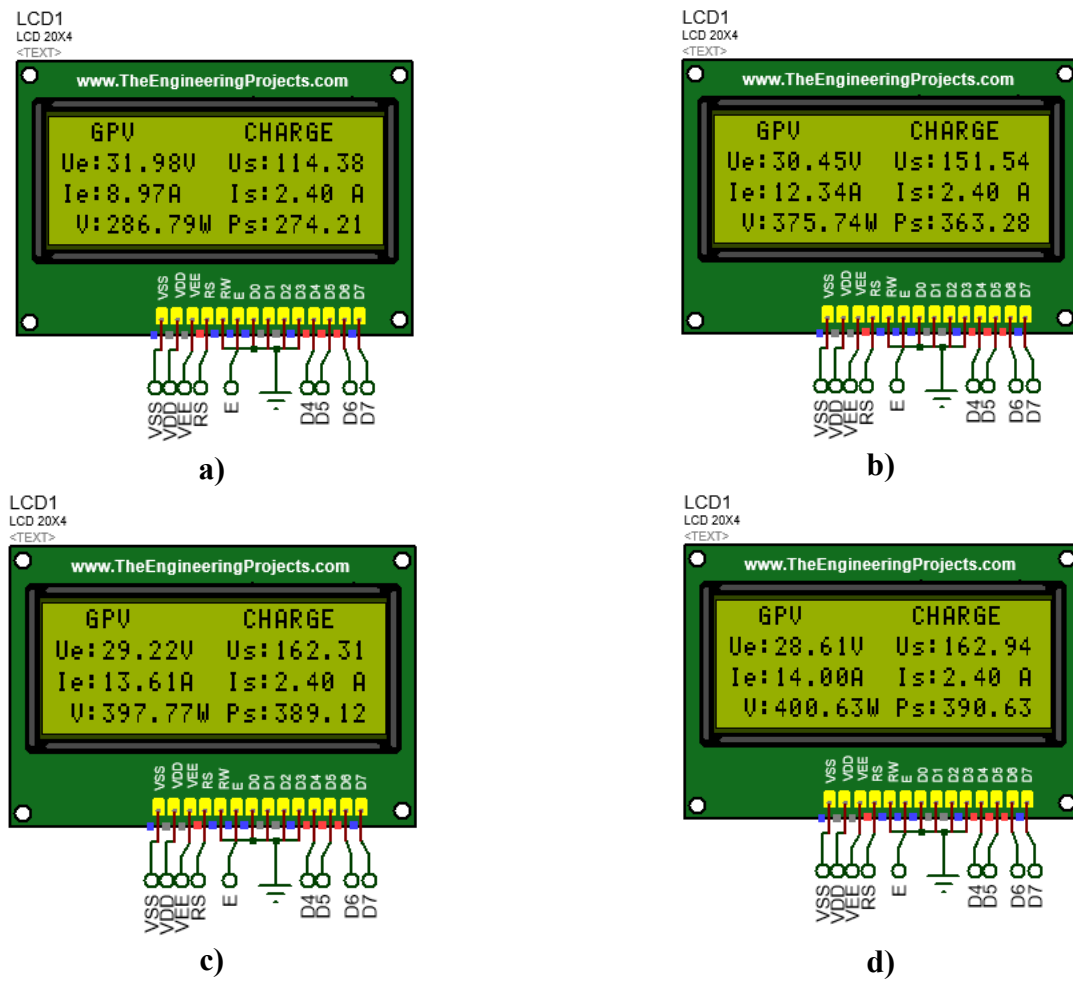


Figure III:29 Illustration de l'indication sur l'écran du régulateur

Tableau III:5 Illustration des résultats récapitulatifs de simulation sous Proteus.

	Pe(W)	Ps(W)	Rendement (%)	Taux d'ondulation (%)	
Régime transitoire	286.79	274.21	95.62	Formule	-
	375.74	363.28	96.73		
Régime permanent	397.77	389.12	97.82	$\tau_e = \frac{\Delta P}{P_{moy}}$ $= \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{moy}}$	0.7164
	400.63	390.63	97.50		

En analysant le tableau III.5 on constate que le rendement du régime transitoire au régime permanent est meilleur (écart entre la puissance prélevée en sortie et celle mesurée à la sortie du régulateur est faible) et que le taux d'ondulation en régime permanent est tellement faible que le fonctionnement de la charge ne peut être affecté.

La figure III :30 illustre l'interface de l'application sur téléphone ; en appuyant sur le bouton **Select Bluetooth**, l'application se connecte à notre régulateur via Bluetooth comme l'illustre la figure III :31 et la figure III :32 illustre l'affichage des paramètres du régulateur en régime permanent sur téléphone.

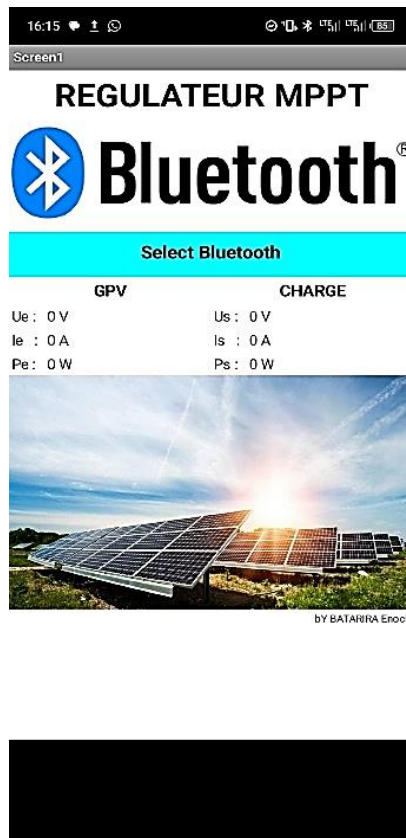


Figure III:30 Illustration de l'interface de l'application sur téléphone

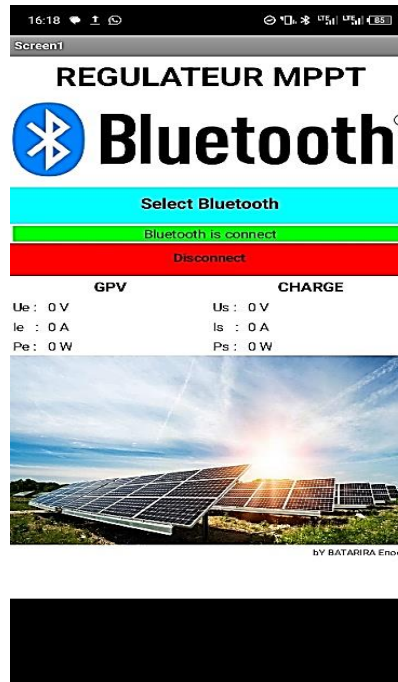


Figure III:31 Illustration de l'interface de l'application sur téléphone connecté via Bluetooth

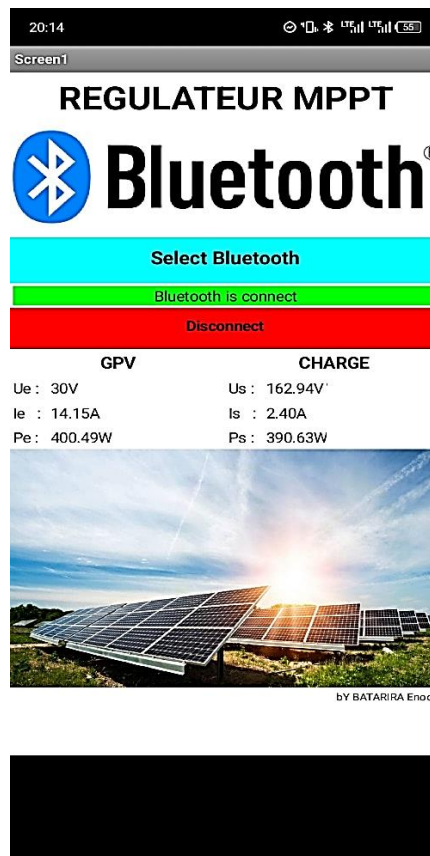


Figure III:32 interface de l'application en régime permanent

De la figure III :33, nous remarquons que les paramètres affichés sur l'écran du régulateur sont quasi le même avec ceux qu'affiche l'écran du régulateur. D'où la suivie du fonctionnement de notre régulateur est fait.

Néanmoins cette affichage présenté une grande latence c'est-à-dire la période entre l'émission et la réception des données à afficher est élevé ainsi que des erreurs à des valeurs affichées qui constituent un désavantage de la connexion Bluetooth.

III.4.7 Estimation du coût du régulateur

Le tableau III.6 présente les matériels utilisés ainsi que leur prix à Goma pour la réalisation de notre régulateur

Tableau III :6 Devis estimatif du régulateur

N ⁰	Nom du matériel	Quantité	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)
1	Afficheur LCD	1	6	6
2	Module Bluetooth	1	5	5
3	Capteur du courant	2	4	8
4	Capteur de tension	2	4	8
5	Carte Arduino UNO	1	10	10
6	MOSFET	1	4	4
7	Accessoires (inductance, capacités, résistances, fils, diode et étain)	-	10	10
8	Typon du convertisseur boost	1	5	5
9	Total	-	-	56
10	Main d'œuvre	-	-	15
11	TOTAL GENERAL			71

III.5. Conclusion partielle

À l'issu de ce chapitre nous avons conçu notre régulateur en dimensionnant les différents éléments qui le composent ainsi qu'en implémentant des algorithmes nous permettant d'effectuer les fonctions de notre régulateur MPPT.

Afin de valider notre conception nous avons procédé au cours de ce chapitre par l'analyse des résultats de nos simulations à l'aide des logiciels Matlab et Proteus.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours de notre travail nous nous sommes fixé l'objectif de concevoir un régulateur solaire de type MPPT permettant une maximisation de puissance offert par les panneaux solaires, ainsi qu'un affichage à distance à l'aide d'une application mobile des paramètres du générateur photovoltaïque. Afin de répondre à notre question de recherche, celle de s'assurer que l'énergie électrique extraite de l'énergie solaire est maximisée, ainsi qu'un affichage à distance est assuré, nous avons conçu un convertisseur DC-DC du type élévateur. Grâce à un contrôle de son rapport cyclique via l'algorithme "Perturb Observe" pour la poursuite du point de puissance maximale implémenté sur la carte Arduino et au module Bluetooth H6 pour assurer la connexion du microcontrôleur et l'application mobile, nous avons pu atteindre notre objectif et ainsi répondre à notre question.

Pour confirmer notre conception une série des simulations dans le logiciel Matlab et Proteus nous a permis d'affirmer que le régulateur conçu dans ce présent travail permet de (d') :

- Assurer la poursuite du point de fonctionnement maximale quel que soit les conditions d'irradiation et de température,
- Assurer le suivi de l'extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

La conception d'un régulateur solaire permettant une poursuite de point de puissance maximale tout en intégrant un système d'affichage à distance des paramètres d'un générateur photovoltaïque est donc possible ; cela a été montré au cours de ce travail d'où l'affirmation de notre hypothèse de départ.

Pour compléter ce travail, nous pouvons envisager les projets d'avenir suivant :

- L'intégration d'un système à notre régulateur pouvant commander un suiveur solaire.
- L'amélioration de l'algorithme Perturbation et Observation peut intégrer une autre approche comme la logique floue.
- Relier notre régulateur à une charge à alternative courant alternative via un onduleur.
- Etudier d'autres techniques de commande MPPT et faire une comparaison entre elles du point de vue performance.
- L'amélioration de connexion à distance par un module wifi en utilisant une application web.

Bibliographie

- [1] S. ABBOUDA, Contribution à la commande des système photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et Université de Sfax, 2015.
- [2] «Irradiation solaire», 28 Octobre 2022. [En ligne], https://fr.m.wikipedia.org/wiki/sp%C3%A9cial:History/Irradiation_solaire. [Accès le 20 mai 2024].
- [3] O. MUSHAGE, Cours de centrales et Reseaux Electrique, Goma: ULPGL, 2022.
- [4] Pasquinelli M., CARACTERISATIONS DES MATERIAUX ET DES DISPOSITIFS POUR LE PHOTOVOLTAÏQUE, 2018.
- [5] A. Hanen, A. Hafedh et L. Kais, Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Souse, Tunisie: International Journal of Control, Energy and Electrical Engineering , 2013.
- [6] Bernard BRULLOT, H.B., REPONSES DE PHOTODIODES SILICIUM À DES IMPULSIONS PROTONS SUB-NANOSECONDES., Direction de l'Information Scientifique et Technique, 1994.
- [7] P. Birindwa, Etude et conception d'un regulateur solaire avec une commande MPPT, Gooma: ULPGL, 2018.
- [8] G. MUMBERE, Conception et realisation d'un régulateur avec la commande MPPT, Goma: mémoire de gradué, ULPGL, 2022.
- [9] M. BELMADI et Y. ABID, Étude Technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome, Ain-Temouchent: Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [10] E. A. ANAS, Conception et realisation d'un regulateur solaire sous LabView a base de microcontrolleur, Rabbat: Universite Sidi Mohammed Ben Abdellah, 2014.
- [11] J. ABDALLAH, INTERCONNEXION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE SUR LE RESEAU ELECTRIQUE, QUÉBEC: UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2012.
- [12] BOULHARES I. et KADIRI H., Etude comparative des performances des différents commandes MPPT, Université Ahmed Draïa -Adrar, 2020.
- [13] C. CABAL, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à conversation photovoltaïque, Thèse de doctorat, université de TOULOUSE, 2008.
- [14] N. DEBILLI, Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque, mémoire de Master, université de CONSTANTINE, 2015.

- [15] P. Barrade, Cours d'électronique de puissance, conversation DC-DC, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne , 2020.
- [16] Y. AHMARN et A. BOUCENA, Etude en vue de la réalisation d'un regulateur mppt solaire, Guelma: mémoire de master à l'université 8 mai 1945, 2020.
- [17] A. AMRANI et R. GLIA, Modélisation et Optimisation d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau électrique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2017.
- [18] J. REYNAUD, Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques, thèse de doctorat ,université de Québec, 2011.
- [19] F.BENADEL, Etude Et Simulation D'une Commande MPPT pour Système PV, M'SILLA: Université de Mohamed Boudiaf, 2016.
- [20] C. Cedric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation dédiée à la conversion photovoltaïque, Toulouse: Université Paul Sabatier, 2008.
- [21] M. Jean-Noël, Initiation à la mise en oeuvre matérielle et logicielle de l'Arduino, Centre de Ressources Art Sensitif, 2006.
- [22] E. KUJIRAKWINJA, Position d'un système d'acquisition des paramètres électriques de fonctionnement d'une cabine MT\BT afin d'améliorer sa maintenance, Goma: mémoire de Bachelor ,ULPGL, 2023.
- [23] T. S. SIG, Débuter avec App Inventor, 2013-2014.
- [24] All Datasheet, Allegro MicroSystems LLC, Worcester,Massachusetts 01615-0036 U.S.A., Copyright 2006-2013.
- [25] Datasheet du IRFP250N (TO-247AC).
- [26] R. BAGUMA, Notes électroniques, Goma: ULPGL, 2022.
- [27] O. MUSHAGE, Notes d'Initiation à la programmation embarquée, Goma: ULPGL, 2023.
- [28] S. ABOUDA, Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage, Thèse de doctorat en cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.

Annexes

a. Code implémenté dans fonction MATLAB

```
1 function D = fcn(vpv,ipv)
2     Dinit=0.4;
3     Dmax=0.9;
4     Dmin=0.1;
5     deltaD=20e-6;
6
7     persistent Vold Pold Dold;
8
9     dataType="double";
10
11     if isempty(Vold)
12         Vold=0;
13         Pold=0;
14         Dold=Dinit;
15     end
16
17     P=vpv*ipv
18     dV=vpv-Vold;
19     dP=P-Pold
20
21     if dP~=0
22         if dP<0
23             if dV<0
24                 D=Dold-deltaD;
25
26                 else
27                     D=Dold+deltaD;
28                 end
29             else
30                 if dV<0
31                     D=Dold+deltaD;
32                 else
33                     D=Dold-deltaD;
34                 end
35             end
36         else D=Dold
37     end
38     if D>=Dmax||D<=Dmin
39         D=Dold;
40     end
41     Dold=D;
42     Vold=vpv;
43     Pold=P;
```

b. Code implémenté sous la carte Arduino

```
1 #include <LiquidCrystal.h>
2 #include <SoftwareSerial.h>
3 SoftwareSerial bluetooth(0,1); //RX,TX pour HC-05
4 // Définir les broches
5
6 const int PWM_PIN = 9; // Broche PWM pour contrôler le hacheur Boost
7 const int sensor_current_Pv = A0; // capteur de courant GPV
8 const int pin_tension_Pv= A1; // capteur de tension GPV
9 const int sensor_current_Charge = A2; // capteur de tension, pour mesurer la tension de la charge
10 const int pin_tension_Charge= A3; // capteur du courant, pour mesurer le courant de la charge
11
12 const float sensitivity = 0.1; // Sensibilité du capteur ACS712 (100 mV/A pour le modèle 20A)
13 const float offsetVoltage = 2.5; // Tension à vide (5V/2) du capteur courant
14 const float RES = 31.303030; // constante pour le pont diviseur de tension, cette valeur sera multiplier par la valeur
15 // de sortie du pont pour trouve la valeur de la tension d'entree
16 float voltage; // Pour stocker la tension mesurée du capteur de courant
17 float courantMesure; // Pour stocker le courant calculé
18 float tensionMesure; //variable qui stocke la valeur numerique du capteur de tension(A1 pin)
19 float courant_Pv, courant_Charge;
20 float tension_Pv, tension_Charge;
21 float puissance_Pv, puissance_Charge; // variable pour calculer la puissance de GPV et de la charge
22 int valeurAnalogiqueTension;
23 int valeurAnalogiqueCourant;
24 float valeurSize ;
25 // Paramètres du système
26 const float PWM_FREQ = 10000.0; // Fréquence PWM (10 kHz)
27 const float PWM_TOP = 16000000.0 / (PWM_FREQ * 2) - 1; // Calcul de la valeur TOP pour le timer
28
29 // Paramètres MPPT
30 const float STEP_SIZE = 0.01; // Taille de la perturbation (rapport cyclique)
31 float dutyCycle = 0.5; // Rapport cyclique initial (50%)
32 float prevPower = 0.0; // Puissance précédente
33 int perturbationDirection = 1; // Direction de la perturbation (+1 ou -1)
34
35 LiquidCrystal lcd(11,10,5,4,3,2);
36
37 // Configuration des broches et du PWM
38 void setupPWM() {
39
40 pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
41 TCCR1A = 0;
42 TCCR1B = 0;
43 TCNT1 = 0;
44 ICR1 = PWM_TOP; // Définir la valeur TOP pour la fréquence PWM
45 TCCR1A |= (1 << COM1A1) | (1 << WGM11);
46 TCCR1B |= (1 << WGM12) | (1 << WGM13) | (1 << CS10);
47 OCR1A = dutyCycle * PWM_TOP; // Définir le rapport cyclique initial
48 }
49
50 void setup() {
51
52 setupPWM(); // Configurer le PWM
53 pinMode(sensor_current_Pv, INPUT);
54 pinMode(pin_tension_Pv, INPUT);
55 pinMode(sensor_current_Charge, INPUT);
56 pinMode(pin_tension_Charge, INPUT);
57 Serial.begin(9600); // Initialiser la communication série
```

```

58
59 lcd.begin(20,4);      | // initialisation de l'ecrann 20*4, 20 lignes et 4 collonnes
60 lcd.setCursor(3,0);
61 lcd.print("ULPGL FSTA");
62 lcd.setCursor(3,1);
63 lcd.print("GENIE ELECTRIQUE");
64 lcd.setCursor(3,2);
65 lcd.print("L3 2024");
66 lcd.setCursor(3,3);
67 lcd.print("REGULATEUR MPPT");
68
69 lcd.clear();
70
71 }
72 // fonction pour lire la valeur de la tension
73 float mesure_tension(int pin){
74     valeurAnalogiqueTension = analogRead(pin);
75     tensionMesure =(valeurAnalogiqueTension *5.0/1023.0);
76     return tensionMesure * RES;
77 }
78 // fonction pour lire la valeur de courant
79 float mesure_Courant(int pin){
80     valeurAnalogiqueCourant = analogRead(pin);
81     voltage= valeurAnalogiqueCourant * (5.0 / 1023.0);
82     courantMesure = ((voltage - offsetVoltage) / sensitivity);
83     return courantMesure;
84 }
85
86 // Algorithme MPPT Perturb & Observe
87 void mpptPerturbAndObserve() {
88
89     courant_Pv = mesure_Courant(sensor_current_Pv);
90     tension_Pv = mesure_tension(pin_tension_Pv);
91     puissance_Pv = tension_Pv * courant_Pv;
92     float currentPower = puissance_Pv;
93
94     // Appliquer la perturbation
95     if (currentPower > prevPower) {
96         // Si la puissance a augmenté, continuer dans la même direction
97         dutyCycle += perturbationDirection * STEP_SIZE;
98     } else {
99         // Si la puissance a diminué, inverser la direction
100        perturbationDirection *= -1;
101        dutyCycle += perturbationDirection * STEP_SIZE;
102    }
103
104    // Limiter le rapport cyclique entre 0.1 et 0.9 pour éviter les extrêmes
105    dutyCycle = constrain(dutyCycle, 0.1, 0.9);
106
107    // Mettre à jour la sortie PWM
108    OCR1A = dutyCycle * PWM_TOP;
109
110    // Mémoriser la puissance actuelle pour la prochaine itération
111    prevPower = currentPower;
112 }
113
114 void affichage(){
115

```

```

116 // Mesure de la tension du courant et calculer de la puissance du PV
117 courant_Pv = mesure_Courant(sensor_current_Pv);
118 tension_Pv = mesure_tension(pin_tension_Pv);
119 puissance_Pv = tension_Pv * courant_Pv;
120
121 // Mesure de la tension, du courant et calculer de la puissance de la charge
122 tension_Charge = mesure_tension(pin_tension_Charge);
123 courant_Charge = mesure_Courant(sensor_current_Charge);
124 puissance_Charge = tension_Charge * courant_Charge;
125
126 // Affichage resultat des parametres des Generateurs PV
127
128 lcd.setCursor(0,0);
129 lcd.print("  GPV");
130 lcd.setCursor(0,1);
131 lcd.print("Ue:");
132 lcd.print(tension_Pv);|
133 lcd.print("V");
134 lcd.setCursor(0,2);
135 lcd.print("Ie:");
136 lcd.print(courant_Pv);
137 lcd.print("A");
138 lcd.setCursor(0,3);
139 lcd.print("Pe:");
140 lcd.print( puissance_Pv);
141 lcd.print("W");
142 // Affichage resultat des parametre pour la charge
143 lcd.setCursor(10,0);
144 lcd.print("  CHARGE ");

```

```

145 lcd.setCursor(10,1);
146 lcd.print(" Us:");
147 lcd.print(tension_Charge);
148 lcd.print(" V");
149 lcd.setCursor(10,2);
150 lcd.print(" Is:");
151 lcd.print(courant_Charge);
152 lcd.print(" A");
153 lcd.setCursor(10,3);
154 lcd.print(" Ps:");
155 lcd.print( puissance_Charge);
156 lcd.print(" W");
157 }
158
159 void loop() {
160 mpptPerturbAndObserve(); // Exécuter l'algorithme MPPT
161 affichage(); // affichage de resultats
162 delay(10); // Délai pour la stabilité
163
164 //affichage bluetooth
165 //String data[100];
166 //sprintf(data, "%d V x %d A x %d W x %d V x %d A x %d W x ",tension_Pv,courant_Pv,puissance_Pv,tension_Charge,tension_Charge,puissance_Charge);
167 String data= String(tension_Pv)+"V"+"x"+String(courant_Pv)+"A"+"x"+String(puissance_Pv)+"W"+"x"+String(tension_Charge)+"V"+"x"+String(courant_Charge

```

+"A"+"x"+String(puissance_Charge)+"W"+"x";

```

168 | Serial.print(data);
169 | }
170 | /*-----
171 | -----Realiser par MUHAWE BATARIRA Enock-----
172 | -----Copy right Mars 2025-----
173 | -----*/

```

c. Programmation en bloc de l'application en MIT Inventor

```

when select_bluetooth .BeforePicking
do set select_bluetooth . Elements to BluetoothClient1 . AddressesAndNames

when select_bluetooth .AfterPicking
do if call BluetoothClient1 .Connect address select_bluetooth . Selection
then set bl_statut . Visible to true
set bl_disconnect . Visible to true

initialize global name to create empty list

when bl_disconnect .Click
do call BluetoothClient1 .Disconnect
set bl_statut . Visible to false
set bl_disconnect . Visible to false

```

```

when Clock1 .Timer
do if BluetoothClient1 . IsConnected
then if call BluetoothClient1 .BytesAvailableToReceive > 0
then set global name to split text call BluetoothClient1 .ReceiveText
numberOfBytes call BluetoothClient1 .BytesAvailableToReceive
at "x"
if length of list list get global name >= 6
then set gpv_ue . Text to select list item list get global name
index 1
set gpv_ie . Text to select list item list get global name
index 2
set gpv_pe . Text to select list item list get global name
index 3
set ch_us . Text to select list item list get global name
index 4
set ch_is . Text to select list item list get global name
index 5
set ch_ps . Text to select list item list get global name
index 6

```