الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Energies Renouvelables

Option : Energies Renouvelables en Electrotechnique

THEME

Implémentation de la MPPT (PandO) à pas variable sur une carte Arduino Uno

Proposé et dirigé par,

Dr : OULD CHERCHALI Noureddine

Dr : SKENDER Mohamed-Ridha

Préparé et présenté par,

Mr : BOUZIANI Ammar

Mr : OMAR Ahmed

Année universitaire : juin 2017/2018

Dédicaces

,

À cet source de tendresse, de patience et de générosité,,,

À ma mère !

A celui qui a tant travailler pour moi mon plus cher père

À ma femme qui a toujours était à mes cotés

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À mes beaux-parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer .....

BOUZIANI Ammar

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre

A ma mère, Dieu a pitié d'elle

A celui qui a tant travailler pour moi mon plus cher père

À ma femme qui a toujours était à mes cotés

A mon fils

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À mes beaux-parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer …

OMAR Ahmed

Remerciements

Avant tout, Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

Je remercie vivement Dr.OULD CHERCHALI.N et Dr.SKENDER-M enseignants à l'université de MEDEA, j'adresse aussi mes remerciements aux autres membres du jury pour l'honneur de bien vouloir apporter leur jugement à notre travail.

Je souhaite également remercie, l'ensemble des enseignants de département d'électrotechnique de MEDEA et particulièrement ceux qui ont participé à notre formation.

Enfin, je ne saure terminer ce remerciement, sans mentionner tous cieux Qui de près ou de loin ont contribué à rende cette expérience des plus en particulier le plan humain.

BOUZIANI Ammar

OMAR Ahmed

الملخص

في هذا العمل ، قمنا بتطبيق و محاكاة نظام كهروضوئي وفقً التحكم بواسطة خوارزمية ومراقبة أقصى نقطة طاقة بواسطة آلية الاضطراب والمراقبة (العاديةو بخطوة متغيرة) ، والهدف هو الحصول على الحد الأقصى للنقطة باستخدام و المحول DC/DC وتطبيقه على برمجة الأردوينو .

الكلمات المفتاحية : نظام الكهروضوئي ، المحول الرافع ، آلية التحكم ، الإضطراب و المراقبة. (P&O) .

Résumé

Dans ce travail , nous avons appliqué et simulé un système photovoltaïque selon l'algorithme et le suivi du point d'énergie maximum par le mécanisme de perturbation et d'observation (normale et variable) , le but est d'obtenir le point maximum en utilisant le convertisseur DC/DC et pratiqué ce dernier a l'Arduino Uno .

Mots clés : Système PV – Convertisseur survolteur - Commande MPPT – perturbation et observation (P&O).

Abstract

In this work, we applied and simulated a photovoltaic system according to the algorithm and the monitoring of the maximum energy point by the perturbation and observation mechanism (normal and variable), the goal is to obtain the maximum point using the DC / DC converter and practiced the latter to the Arduino Uno.

Keywords: PV system - Boost converter - MPPT control – perturbation and observation (P&O).

Table des matières

Introduction Générale ……1

Chapitre I Générateur photovoltaïque

I.1.Introduction.....0**Erreur ! Signet non défini.**

I.2. Les différentes technologies.....0**Erreur ! Signet non défini.**

I.3. Effet photoélectrique et jonctionPN.....0**Erreur ! Signet non défini.**

I.3.1. La cellule photovoltaïque.....0**Erreur ! Signet non défini.**

I.3.2. Le module (panneau).....0**Erreur ! Signet non défini.**

I.3.3. Champ photovoltaïque.....07

I.4. Modélisation du module photovoltaïque.....0**Erreur ! Signet non défini.**

I.5. Paramètres électriques du module photovoltaïque.....09

I.5.1. Courant de court-circuit $\boldsymbol{Icc}$.....09

I.5.2. Tension à circuit ouvert $\boldsymbol{Vco}$.....09

I.5.3. Puissance maximale$\boldsymbol{Pmax}$.....**Erreur ! Signet non défini.**

I.5.4.Rendement d'un module.....10

I.5.5. Le facteur de forme.....11

I.6. Influence de l'éclairement et de la température.....11

I.6.1. Influence de l'irradiation.....11

I.6.2. Influence de la température.....12

I.6.3. Connexion de cellules solaires en parallèle.....13

I.6.4.Connexion des cellules solaires en série.....14

I.7.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....15

I.7.1.Avantages.....15

I.7.2.Inconvénients.....15

I.8.Conclusion.....15

Chapitre II Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT avec arduino uno

II.1.Introduction.....16

II.2.Convertisseurs DC/DC (hacheur.....16

II.2.1.Convertisseur DC/DC survolteur (Boost.....17

II.2.2.Convertisseur DC/DC dévolteur (BUCK).....19

II.2.3.Convertisseur DC/DC survolteur-survolteur (Boost-buck) : 21
II.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) 24
II.4. La méthode Perturbation et Observation (P&O) 26
II.4.1.méthode Perturbation et Observation (P&O)classique 26
II.4.2. La méthode Perturbation et Observation (P&O) a pas variable..... 30
II.5. Carte Arduino 33
II.5.1.Présentation d'Arduino..... 33
II.5.3. Description de la carte Arduino 34
II.5.4.Port USB 35
II.5.5.Le microcontrôleur..... 35
II.6.Langage de programmation..... 36
II.7.Capteur de tension …….37
II.8.Capteur de courant ……38
II.9.Afficheur LCD ……..38
II.7.Conclusion
……..……..**Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre III simulation d'un systéme photovoltaique

III.1.Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.2.L'outil Matlab/simulink ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.2.1.Simpower..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.3.Système photovoltaïque proposée..... 40
III.3.1.Modélisation du générateur photovoltaïque ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.3.2.Caractérisation du module PV 42
III.3.3.Schéma du module photovoltaïque dans Matlab..... 43
III.4.Modèle deSimulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT..... 46
III.5.Simulation de la méthode MPPT 46
III.5.1.Perturbation et observent (P&O) classique 47
III.5.2.Perturbation et observent (P&O) a pas variable 47
III.6.Système globale (GPV, convertisseur, MPPT,charge) 48
III.7.Résultats de simulation de PV..... 49
III.7.1.Caractéristiques du générateur photovoltaïque..... 49
III.7.1.1.Lescaractéristiquesd'I-Vet P-V dePV : 49

III.7.1.2.simulation PV avec variation de l'éclairement 51
III.7.2.simulation del'algorithmeP&O(classique et a pas variable) 52
III.7.2.1.méthodes P&O classique 52
III.7.2.2.méthodes P&O a pas variable 55
III.8.Conclusion 58

Chapitre IV **Réalisation et implémentation de MPPT**

IV.1.Introduction 59
IV.2.Système photovoltaïque proposé. 59
IV.3. Cahier charge 59
IV.3.1.Module photovoltaïque 60
IV.3.2.Carte Arduinouno 60
IV.3.3. capteur de tension 60
IV.3.4. capteur de courant 60
IV.3.5.Convertisseur survolteur 60
IV.3.6..Résistance rhéostat 62
IV.4.Réalisation du convertisseur survolteur 62
IV.5.Le programme implemanté dans la carte Arduino 63
IV.6. Résultats des tests pratiques et discussions 67
IV.6.1. Méthode P&O classique. 67
IV .6.2.Méthode P&O à pas variable 71
IV.7.Conclusion 74
Conclusion Générale 75

Bibliographie

Annexe

Table des matières

Introduction Générale ……01

Chapitre I Générateur photovoltaïque

I.1.Introduction 03
I.2. Les différentes technologies 03
I.3. Effet photoélectrique et jonctionPN 05
I.3.1. La cellule photovoltaïque 06
I.3.2. Le module (panneau) 07
I.3.3. Champ photovoltaïque 07
I.4. Modélisation du module photovoltaïque 08
I.5. Paramètres électriques du module photovoltaïque 09
I.5.1. Courant de court-circuit $\boldsymbol{Icc}$ 09
I.5.2. Tension à circuit ouvert $\boldsymbol{Vco}$ 09
I.5.3. Puissance maximale$\boldsymbol{Pmax}$ 10
I.5.4.Rendement d'un module 10
I.5.5. Le facteur de forme 11
I.6. Influence de l'éclairement et de la température 11
I.6.1. Influence de l'irradiation 11
I.6.2. Influence de la température 12
I.6.3. Connexion de cellules solaires en parallèle 13
I.6.4.Connexion des cellules solaires en série 14
I.7.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 15
I.7.1.Avantages 15
I.7.2.Inconvénients 15
I.8.Conclusion 15

Chapitre II Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT avec arduino uno

II.1.Introduction 16
II.2.Convertisseurs DC/DC (hacheur 16
II.2.1.Convertisseur DC/DC survolteur (Boost 17
II.2.2.Convertisseur DC/DC dévolteur (BUCK) 19

II.2.3.Convertisseur DC/DC survolteur-survolteur (Boost-buck) : 21
II.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) 24
II.4. La méthode Perturbation et Observation (P&O) 26
II.4.1.méthode Perturbation et Observation (P&O)classique 26
II.4.2. La méthode Perturbation et Observation (P&O) a pas variable..... 30
II.5. Carte Arduino 33
II.5.1.Présentation d'Arduino..... 33
II.5.3. Description de la carte Arduino 34
II.5.4.Port USB 35
II.5.5.Le microcontrôleur..... 35
II.6.Langage de programmation..... 36
II.7.Capteur de tension ……37
II.8.Capteur de courant ……38
II.9.Afficheur LCD ……..38
II.7.Conclusion ……..……..39

Chapitre III simulation d'un systéme photovoltaique

III.1.Introduction 40
III.2.L'outil Matlab/simulink 40
III.2.1.Simpower..... 40
III.3.Système photovoltaïque proposée..... 40
III.3.1.Modélisation du générateur photovoltaïque 41
III.3.2.Caractérisation du module PV 42
III.3.3.Schéma du module photovoltaïque dans Matlab..... 43
III.4.Modèle deSimulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT..... 46
III.5.Simulation de la méthode MPPT 46
III.5.1.Perturbation et observent (P&O) classique 47
III.5.2.Perturbation et observent (P&O) a pas variable 47
III.6.Système globale (GPV, convertisseur, MPPT,charge) 48
III.7.Résultats de simulation de PV..... 49
III.7.1.Caractéristiques du générateur photovoltaïque..... 49
III.7.1.1.Lescaractéristiquesd'I-Vet P-V dePV : 49
III.7.1.2.simulation PV avec variation de l'éclairement 51

III.7.2.simulation del'algorithmeP&O(classique et a pas variable) 52
III.7.2.1.méthodes P&O classique 52
III.7.2.2.méthodes P&O a pas variable 55
III.8.Conclusion 58

Chapitre IV **Réalisation et implémentation de MPPT**

IV.1.Introduction 59
IV.2.Système photovoltaïque proposé. 59
IV.3. Cahier charge 59
IV.3.1.Module photovoltaïque 60
IV.3.2.Carte Arduinouno 60
IV.3.3. capteur de tension 60
IV.3.4. capteur de courant 60
IV.3.5.Convertisseur survolteur 60
IV.3.6..Résistance rhéostat 62
IV.4.Réalisation du convertisseur survolteur 62
IV.5.Le programme implemanté dans la carte Arduino 63
IV.6. Résultats des tests pratiques et discussions 67
IV.6.1. Méthode P&O classique. 67
IV .6.2.Méthode P&O à pas variable 71
IV.7.Conclusion 74
Conclusion Générale 75

Bibliographie

Annexe

Nomenclature

$\boldsymbol{I_{pv}}$: Courant délivré par la cellule PV

I_{ph} : Photo-courant.

I_d : Courant de la diode

V_{pv} : Tension délivré par la cellule PV.

v_t : Tension thermique.

v_d : Tensionde la diode

T : Température absolue en ℃

T_c : Température de la cellule

I_0 : Courant de saturation de diode

I_{sh} : Courant shunt

R_s : Résistance série (Ω)

R_p : Résistances parallèle shunt (Ω)

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série

q : Charge de l'électron ($1{,}6.10^{-19}$C)

k : Constant de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}$ J / K)

η : Facteur d'idéalité de la jonction ($1<\boldsymbol{\eta}<2$)

A : surface de la diode

V_{co} : Tension de circuit ouvert

I_{cc} : Courant de court-circuit

FF : Facteur de forme

P_{MAX}: Puissance maximale

η : Rendement

K_2 : Constante de proportionnalité

I_{opt} : Courant optimal

V_{opt} : Tension optimal

P : Puissance

V : Tension

I : Courant

G : Irradiation solaire [W/m^2]

Abréviation utilisée

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur photovoltaïque.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PPM : point puissance maximal .

Introduction Générale

Introduction Générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leurs vitesses de régénération sont extrêmement lentes à l'échèle humaine, ce qui entrainera à courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croitre et tend dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole [1].

La source d'énergie la plus efficace et inoffensif est probablement l'énergie solaire. Pour de nombreuses applications, il est donc techniquement simple à utiliser. L'utilisation de l'énergie solaire au lieu de la combustion de carburant, en particulier pour simple application comme le chauffage à basse et moyenne température eau, peut réduire la charge sur l'environnement. Alors le système de production PV est considéré comme une source propre et respectueuse de l'environnement de l'énergie[2].

L'installation de photovoltaïque (PV) se développe rapidement malgré tout, les systèmes de génération de PV ont deux problèmes majeurs qui sont liés à une faible efficacité de conversion d'environ 9% à 12% notamment dans les conditions d'irradiation à faible et que la quantité d'énergie électrique générée par des panneaux photovoltaïques varie de façon continue avec des conditions météorologiques[2].

Notre objectif est de faire une Implémentation de la MPPT P and O (classique) et P and O(à pas variable) sur une carte Arduino Uno pour un système PV, qui a pour rôle de maximiser la puissance produite par ces panneaux avec un contrôleur utilisé pour suivre le point de puissance maximale de ces systèmes PV.

Pour atteindre l'objectif de notre travail, nous avons présenté et organisé dans ce mémoire quatre chapitres :

- Nous aborderons dans le premier chapitre une généralité sur les générateurs photovoltaïques, construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque, principe de fonctionnement et les avantages avec les inconvénients.

- Le deuxième chapitre présentera une description générale sur les convertisseurs DC-DC ainsi les différentes stratégies de commandes des systèmes de poursuite du point de puissance maximale MPPT, description et la programmation par arduino.
- Le troisième chapitre sera consacré à la simulation du système photovoltaïque.
- Le dernier chapitre sera la réalisation d'un Hacheur Boost MPPT programméà Base d'une Carte ARDUINO Uno.

Enfin, on se terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus pour ArduinoUno.

Chapitre I

Générateur photovoltaïque

Chapitre I

Générateur photovoltaïque

I.1.Introduction

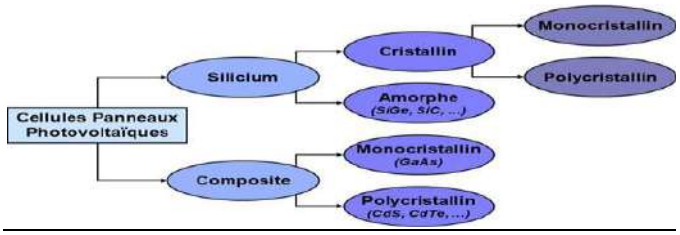
L'énergie renouvelable suscite une attention considérable dans les milieux universitaires et un effort pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les principales sources renouvelables sont la biomasse, géothermique, hydroélectrique, photovoltaïque et éolienne. La puissance photovoltaïque (PV) devrait avoir le taux de croissance annuel le plus rapide ayant déjà affiché un taux de croissance de plus de 50% en 2006 et en 2007. Les systèmes PV ont l'avantage que leur installation est statique (c'est-à-dire sans pièces mobiles), simple et rapide par rapport à d'autres sources renouvelables. Ainsi, ils ont une durée de vie plus longue (typiquement plus de 20 ans). De plus, en raison de leur faible coût d'exploitation et de maintenance, ils fournissent une solution significative pour alimenter les zones reculées.

Les cellules photovoltaïques sont des semi-conducteurs qui ont des électrons faiblement liés à un niveau d'énergie appelée bande de valence. Lorsque l'énergie frappe cette bande de valence, elle libère ces électrons liés et les déplace vers un autre niveau d'énergie appelé bande de conduction. Dans la bande de conduction, les électrons sont capables de conduire l'électricité à travers une charge électrique. Les cellules PV utilisent l'énergie des photons de la lumière du soleil pour briser leur énergie de bande interdite, produisant ainsi du courant continu. Typiquement, les cellules PV produisent une faible puissance (environ 2-3 Watts); par conséquent, plusieurs cellules sont connectées ensemble pour former des modules et des panneaux pour des applications de puissance supérieure. Des éléments de régulation de puissance (par exemple batterie, contrôleur de charge, convertisseur, etc.) sont également incorporés pour adapter la forme de puissance de sortie à l'application demandée[3].

I.2. Les différentes technologies

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium)[4].



Figure(I.1) : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

TAB (I.1) : Comparatif des différentes technologies [4].

Matériu	**Rendement**	**Longévité**	**Caractéristiques**	**Principales utilisations**
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	-Très performant. -Stabilité de production d'W. -Méthode de production coûteuse et laborieuse	Aérospatiale, modules pour toits, façades,…
Silicium poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	-Adapté à la production à grande échelle. -Stabilité de production d'W. -Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		-Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. -Fonctionnement si faible luminosité. -Fonctionnement par temps couvert. -Fonctionnement si ombrage partiel -La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composte mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		-Lourd, fissure facilement.	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CulnGaSe2, etc.)	8% (16% en Laboratoire)		-Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

I.3. Effet photoélectrique et jonction PN

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PNP, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [5].

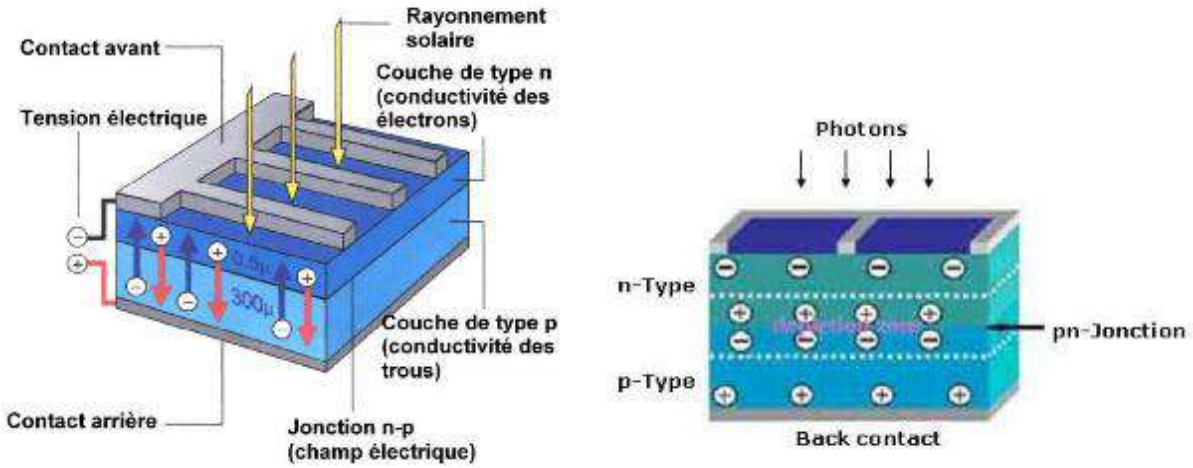
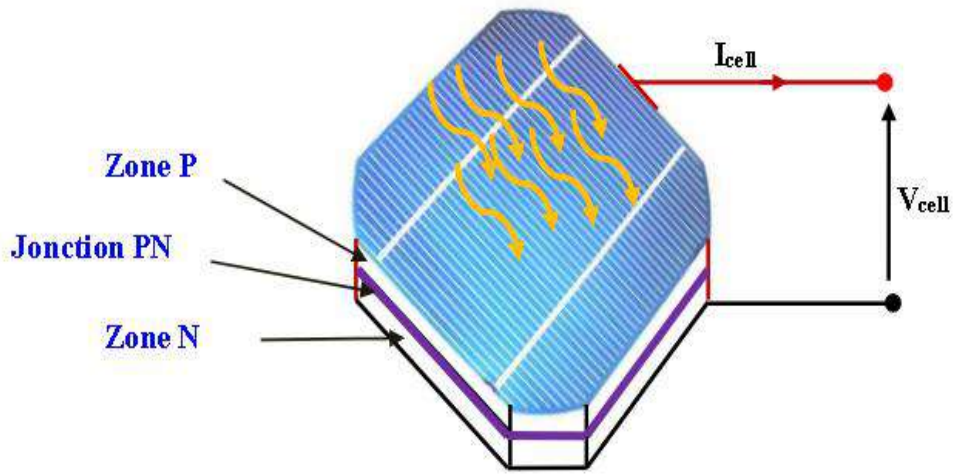


Figure (I.2) : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque

I.3.1. La cellule photovoltaïque

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

La figure(I.3) illustre une cellule PV typique. Elle montre clairement sa constitution détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable (varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé) entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [6].



Figure(I.3): coupe transversale d'une cellule PV

I.3.2. Le module (panneau)

Un module PV est le plus petit ensemble de cellules solaires interconnectées et complètement protégées contre l'environnement. Généralement il contient également des protections pour protéger les cellules PV d'un fonctionnement qui peut être destructif. Les connexions peuvent être réalisées en parallèle ou en série. Nous allons présenter le comportement de cellules PV lors de ces différentes connexions[7].



Figure(I.4):Module photovoltaïque

I.3.3. Champ photovoltaïque

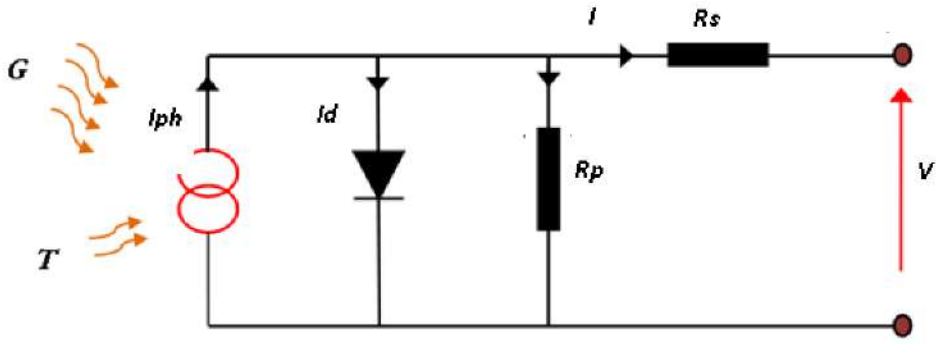
Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure. I.5 représente un champ photovoltaïque [8].



Figure(I.5) : Champ photovoltaïque

I.4. Modélisation du module photovoltaïque

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure.I.6 illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante[6].



Figure(I.6) : Schéma équivalent d'une cellule PV

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{I.1}$$

Avec :

I : le courant délivré par la cellule.

$I_{ph} = I_{cc}\left(\frac{G}{1000}\right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G) ce courant correspond également au courant de court-circuit.

$I_p = \frac{V+R_S I}{R_p}$: le courant délivré par la résistance parallèle.

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

$I_d = I_0(e^{\frac{V+I.R_S}{nK_T}} - 1)$: le courant traversant la diode.

I_0 : Le courant de saturation d'une diode.

$V_t = \frac{KT}{q}$: la tension thermique.

Où :

q : charge d'électron ($1{,}602^{\times}10^{-19}$C)

K : constante de Boltzmann ($1.381^{\times}10^{-23}J/K$)

n : facteur d'idéalité de la diode, compris entre 1 à 2 en pratique.

T:La température effective de la cellule en kelvin.

En utilisant les équations ci-dessus, on peut déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque:

$$I = I_{ph} - I_0(e^{\frac{V+R_S\ I}{n\ V_t}} - 1) - \frac{V+R_S\,I}{R_p} \qquad \text{(I.2)}$$

I.5. Paramètres électriques du module photovoltaïque

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc}, V_{co}, P_{max}, A, ff et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes modules éclairées dans des conditions identiques.

I.5.1. Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes du module (V= 0)Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination du module et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire :

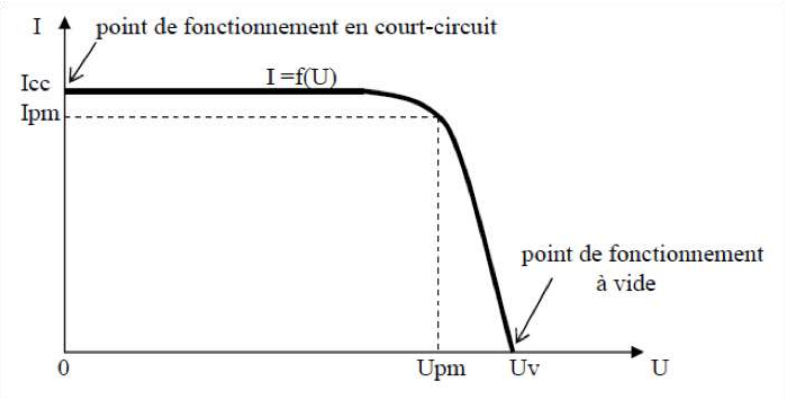
$$I_{cc}\,(V = 0) = I_{ph} \qquad \text{(I.3)}$$

I.5.2. Tension à circuit ouvert V_{co}

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse le module est nul.

la température et varie peu avec l'intensité lumineuse :

$$V_{co}\,(I = 0) = AU_T\ \mathrm{Ln}\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \qquad \text{(I.4)}$$

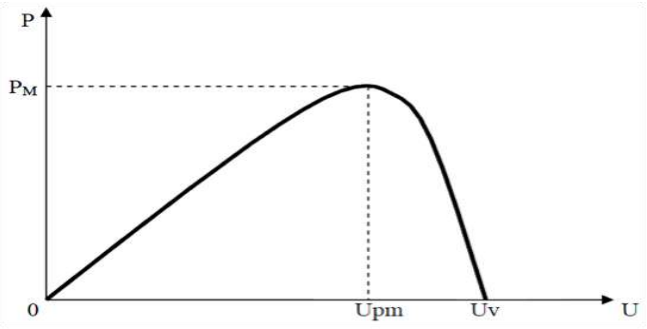


Figure(I.7) : Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m²

I.5.3. Puissance maximaleP_{max}

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes du module). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max}, V_{max})de la courbe courant-tension (courants compris entre 0et I_{cc} et tension comprise entre 0etVco).

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} \qquad \text{(I.5)}$$



Figure(I.8) : Courbe P(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m²

I.5.4.Rendement d'un module

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente

$$\eta\rho\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}\, V_{max}}{A\ G_a} \qquad \text{(I.6)}$$

Où G_a est l'irradiation ambiante et A est la zone du module.

I.5.5. Le facteur de forme

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit$I_{cc}\ V_{co}$, correspondant à la puissance maximale idéale.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}\ V_{co}} = \frac{P_{max}}{I_{cc}\ V_{co}} \qquad (I.7)$$

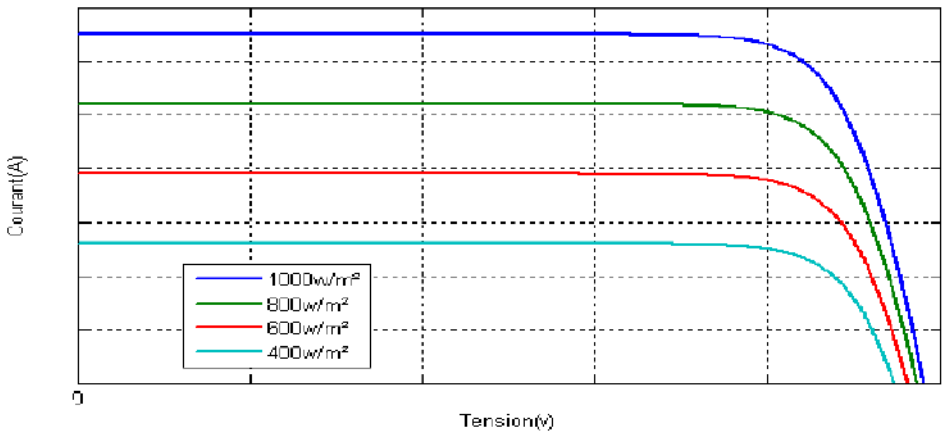
Le fill factor est la mesure réelle de la caractéristique I-V sa valeur est supérieure à 0.7 pour une bonne cellule. Le fill factor diminue lorsque la température de la cellule est augmentée[9].

I.6. Influence de l'éclairement et de la température

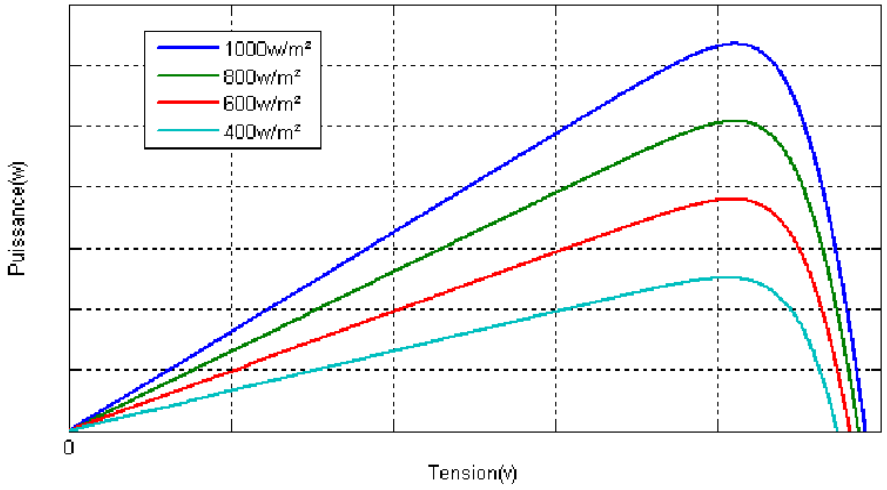
Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque (cristallin, amorphe, CdTe, Cis, Triple jonction, etc.), les variations des paramètres courants (V_{oc}, I_{sc} et P_{max}) seront différentes.

I.6.1. Influence de l'irradiation

D'après la figure (I.9) la caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'irradiation pour une température standard (25^0**C)**: quand l'irradiation augmente, la courbe se translate vers le haut et vers la droite[5].



Figure(I.9): Caractéristique Courant-Tension du module PV



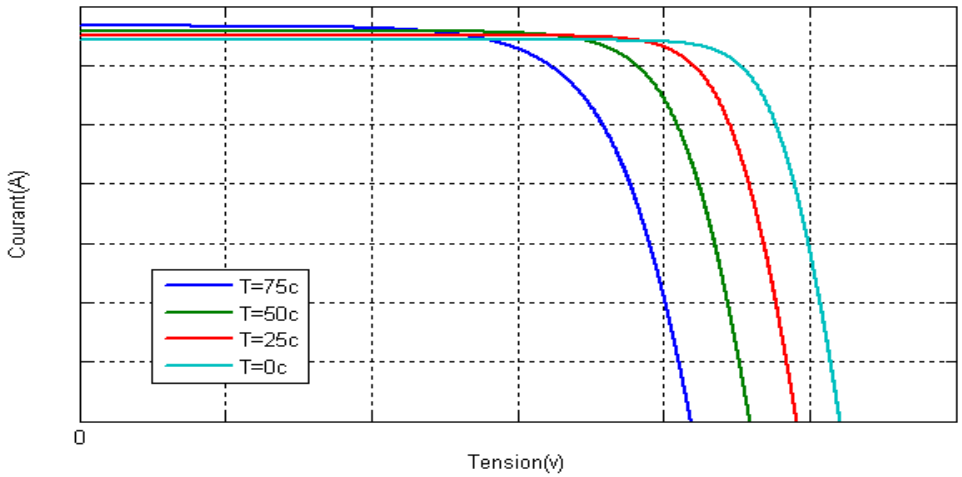
Figure(I.10): Caractéristique Puissance-Tension du module PV

On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant de court-circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM proportionnellement à l'éclairement.

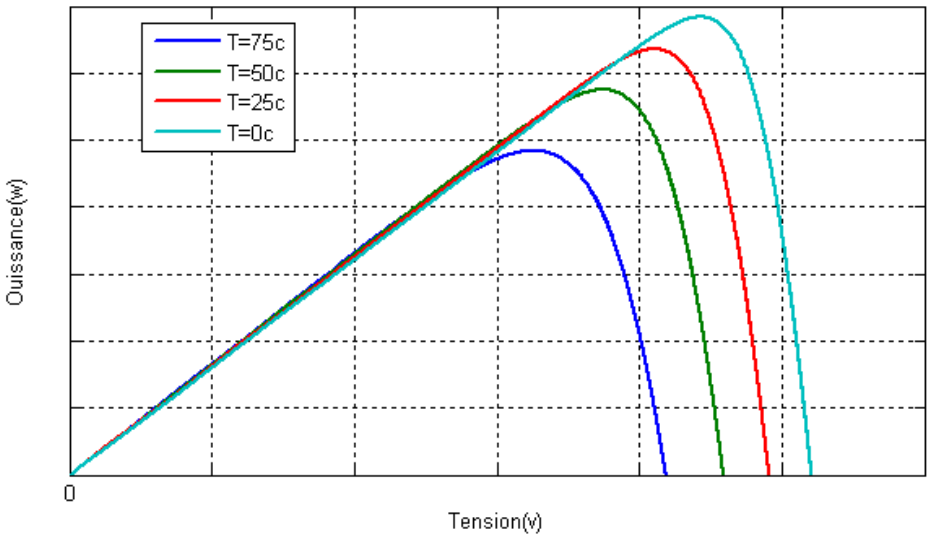
On peut remarquer sur la figure(I.10) que l'augmentation de l'éclairement traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale disponible

I.6.2. Influence de la température

Les figures(I.11) et (I.12) montrent les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque pour différentes valeurs de température, à un éclairement constant. On observe que la tension de circuit ouvert diminue considérablement lorsque la température augmente. Par contre, le courant du court-circuit augmente légèrement. On peut remarquer que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale.



Figure(I.11): Caractéristique Courant-Tension du module PV pour d'efférentes températures



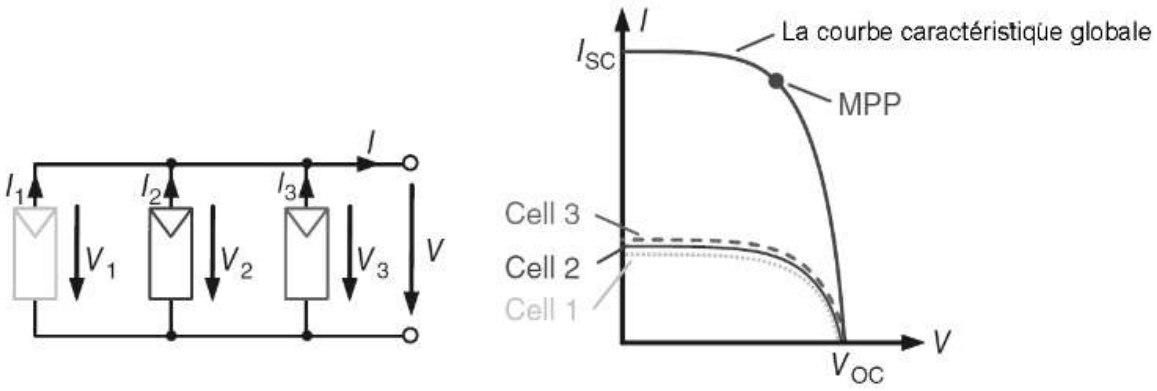
Figure(I.12): Caractéristique Puissance-Tension du module PV pour d'efférentes températures

I.6.3. Connexion de cellules solaires en parallèle

Dans la figure(I.13) nous représentons trois cellules solaires en parallèle. Ce type de raccordement force à ce que toutes les cellules aient la même tension et en même temps les courants individuels sont additionnés [10] :

$$V = V_1 = V_2 = V_3 \quad \text{(I.9)}$$

$$\mathrm{I} = I_1 + I_2 + I_3 \quad \text{(I.10)}$$



Figure(I.13):Fonctionnement des cellules solaires en parallèle sans défauts d'ombrage.

I.6.4.Connexion des cellules solaires en série

Dans un panneau solaire, plusieurs cellules PV sont connectées en série afin d'obtenir des tensions décentes. Dans la figure (I.14) on présente un mini module PV composé de trois cellules PV connectées en série. En absence de défaut : le courant dans les de trois cellules PV est identique et la tension globale du mini-panneau est la somme des tensions individuelles de toutes les cellules connectées en série. Donc on peut écrire [10] :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad \text{(I.11)}$$

$$\mathrm{I} = I_1 = I_2 = I_3 \quad \text{(I.12)}$$

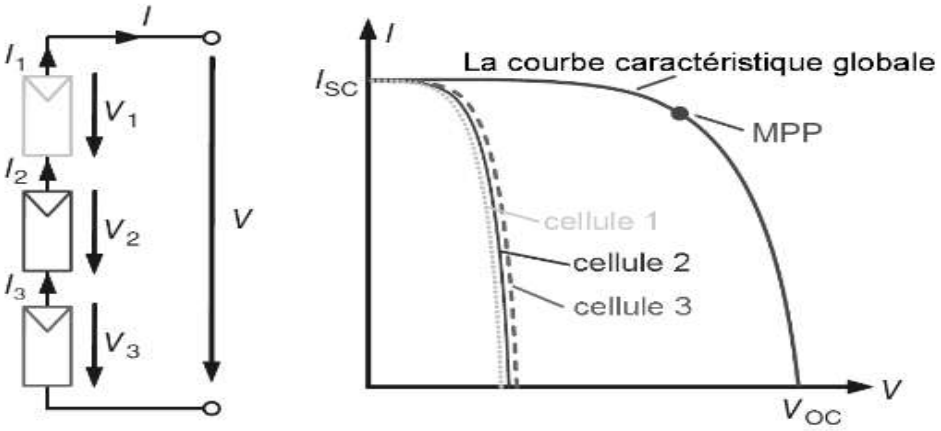


Figure (I.14) : connexion des cellules PV en série, les tensions individuelles des cellules s'additionnent

I.7.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.7.1.Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.7.2.Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes[11].

I.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes technologies d'un système photovoltaïque et les cellules monocristallines qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation des systèmes photovoltaïques et leurs secteurs d'application.

On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Et ensuite un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Chapitre II

Les Convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT avec Arduino uno

Chapitre II

Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT avec Arduino Uno

II.1.Introduction

Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température, Comme on a vu dans le chapitre précédent. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur photovoltaïque et le récepteur un convertisseur statique DC-DC (hacheur) commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking)associées à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique Courant-Tension est fortement non linéaire [8].

Dans cette partie nous présentons le principe des trois types structures principales des convertisseurs DC-DC (Boost, Buck, buck-Boost) utilisés dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour 1'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges ainsi que la cartes Arduino utilisées pour commander les systèmes PV. Ensuite, on présente le capteur de courant, le capteur de tension et l'afficheur LCD.

II.2.Convertisseurs DC/DC (hacheur):

Dans cette section, les principes de la conversion de la puissance de commutation sont introduits et les détails des différents circuits de convertisseurs DC-DC sont discutés. Les modèles mathématiques pour les convertisseurs buck, boost et buck/boost sont dérivés de représenter l'état stable du circuit et des comportements dynamiques.

Une commutation d'un convertisseur est constituée de condensateurs, des inductances et des interrupteurs. Tous ces dispositifs idéalement ne consomment pas d'énergie, qui est la raison de la haute efficacité de commutation des convertisseurs. L'interrupteur est réalisé avec un dispositif à semi-conducteurs en mode commuté, généralement un MOSFET.

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul et donc la dissipation de puissance est égale à zéro. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à travers sera proche de zéro et donc la puissance dissipée sera très faible.

Au cours de l'opération du convertisseur, le commutateur est commuté à une fréquence constante fs avec un temps de fermeture DTs, et un temps d'ouverture (1-D) Ts, où Ts est la période de commutation égal 1/fs et D est le rapport cyclique de commutation (D∈ [0, 1]) (voir Figure (II.1)[4].

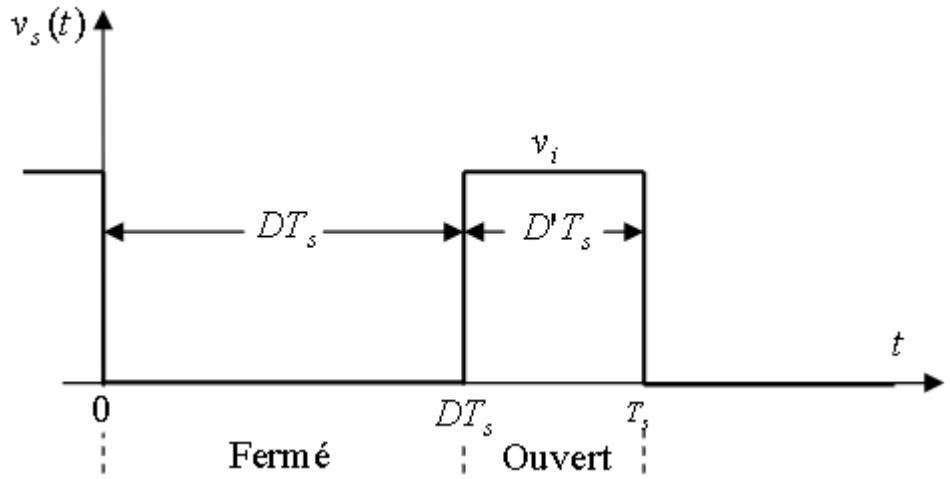
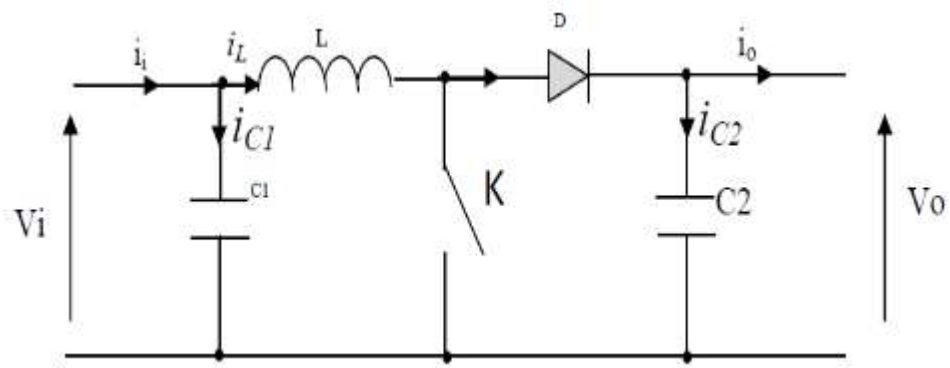


Figure (II.1) : Tension idéale du commutateur Vs(t), rapport cyclique D et période de commutation Ts

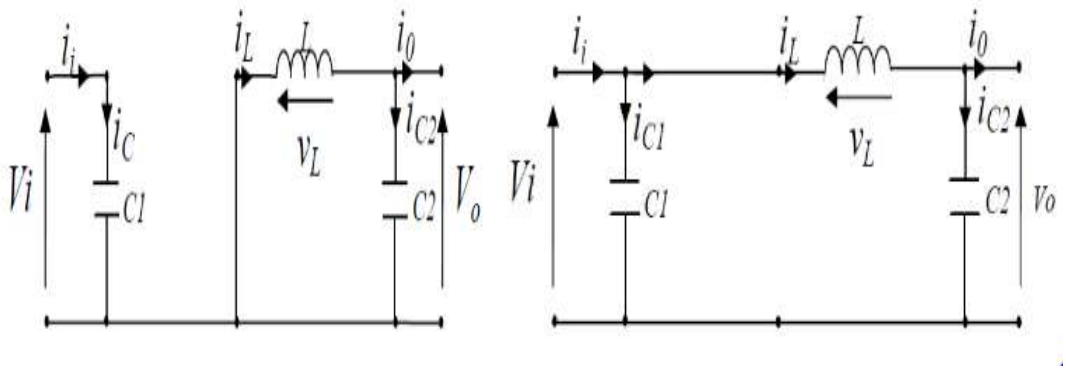
II.2.1.Convertisseur DC/DC survolteur (Boost) :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (II.2), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (DT), le transistor (K) est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (K) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposent à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [26].



Figure(II.2) : Circuit idéal d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne [12].



(a) K : fermé (b) K: ouvert

Figure(II.3) : Schémas équivalents du hacheur survolteur

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.3), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour le premier intervalle (0-*DT)*:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_1}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

Pour la deuxième intervalle *[DTs-Ts]*:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.2)}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période *Ts*, on utilise généralement l'expression suivante :

$$< \frac{d_x}{d_t} > T_S = \frac{d_x}{dt_{(\,DT_S\,)}} + \, DT_s + \frac{d_x}{dt_{(\,1-D)T_S}} (\,1 - D)T_s \qquad \text{(II.3)}$$

Où $<\frac{dx}{dt}>$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période

. Cette relation est valide si $\frac{dx}{dt_{DTs}}$ et $\frac{dx}{dt_{(1-D)Ts}}$ sont constants sur les périodes et respectivement.

En appliquant la relation (II.3) surles systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

$$\begin{cases} i_l(t) = \, i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o(t) = (\,1 - D)i_l - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} + (\,1 - D\,)v_o \end{cases} \qquad \text{(II.4)}$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient:

$$\begin{cases} i_o = \, (1 - D)\, i_l \\ i_i = \, i_l \\ v_i = \, (1 - D)\, v_l \end{cases} \qquad \text{(II.5)}$$

Le rapport de conversion est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit :

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \qquad \text{(II.6)}$$

II.2.2.Convertisseur DC/DC dévolteur (BUCK) :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur «Buck» ou hacheur série. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. La figure (II.4) représente le schéma de principe du convertisseur dévolteur.

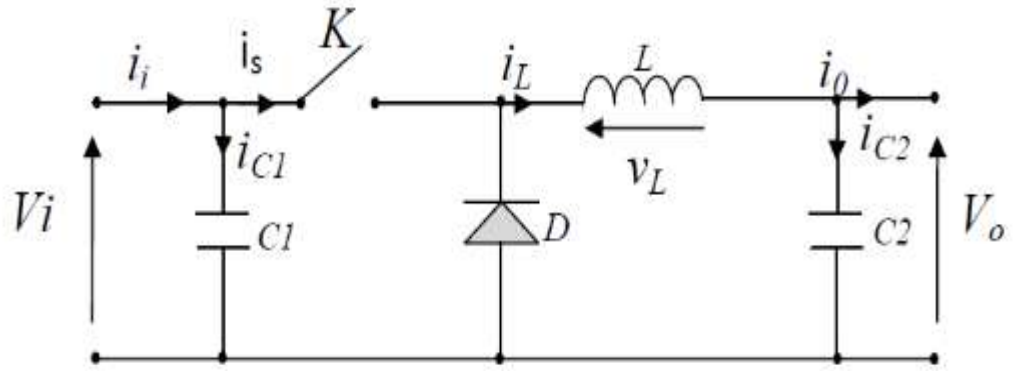
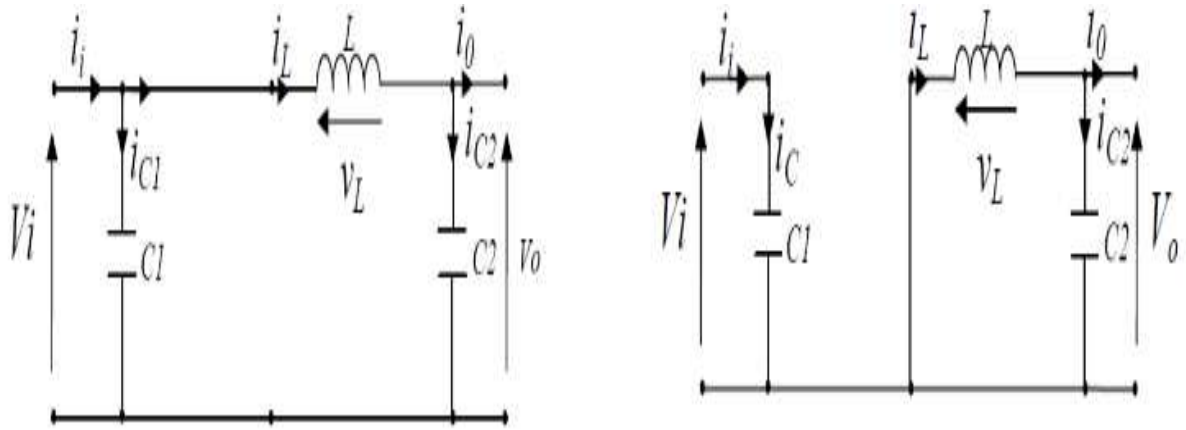


Figure (II.4):Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du convertisseur dévolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La figure (II.5) représente les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur pour les deux cycles de fonctionnements [8].



(a) : K fermé (b) : K ouvert

Figure(II.5) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur

Comme pour le convertisseur survolteur, en appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.5), on obtient les systèmes d'équations suivants:

Pour la première période *DTs*:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_i}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.7)}$$

En appliquant la relation (II.3)sur les systèmes d'équations (II.7) et (II.8),on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur.

Pour la deuxième période *(1-D)Ts*:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.7) et (II.8), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur.

$$\begin{cases} i_0(t) = i_L(t) - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d}\left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt}\right) \\ v_i(t) = \frac{1}{d}\left(l \frac{di_L(t)}{dt} + v_0(t)\right) \end{cases} \quad \text{(II.9)}$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient:

$$\begin{cases} i_i = di_l \\ i_o = i_l \\ dv_i = v_o \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

Le rapport de conversion du convertisseur dévolteur est donné par [8] :

$$M = \frac{V_o}{V_i} = D \quad \text{(II.11)}$$

II.2.3.Convertisseur DC/DC survolteur-survolteur (Boost-buck) :

Le convertisseur dévolteur-survolteur a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sortie d'un transformateur hybride (abaisseur/élévateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure (II.6).

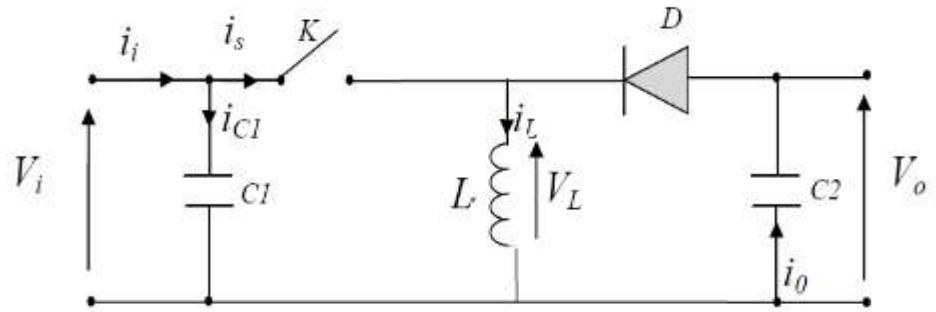
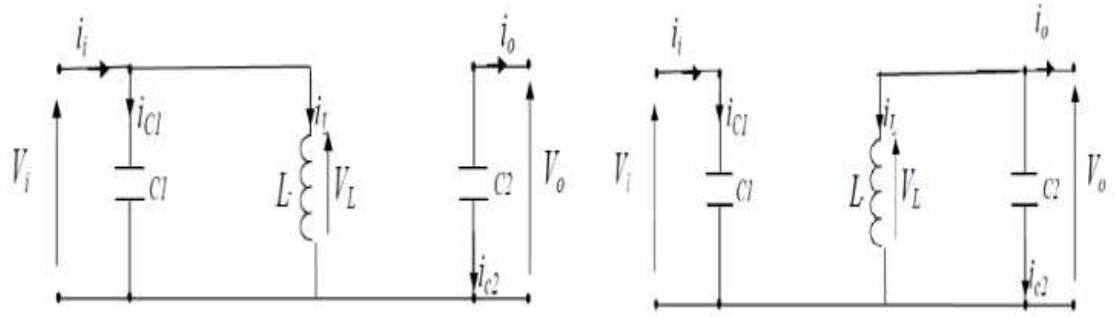


Figure (II.6) : Schéma de base d'un dévolteur- survolteur

La figure (II.7) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [8].



(a) : K fermé (b) : K ouvert

Figure (II.7) : Schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient:

Pour la première période *DT*

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

Pour la deuxième période *(1 – D)*T_s :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.12) et (II.13), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d}\,(\,i_l - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = -(1-D\,)i_L - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ v_i(t) = \frac{1}{d}(-(1-D)V_0 + L\frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

Comme précédemment, en annulant les dérivées du variable dynamique, en remplaçant ces signaux par leurs grandeurs moyennes. Le système d'équation devient :

$$\begin{cases} i_i = \ di_l \\ i_o = -(\,1-D)i_l \\ dv_i = -(1-D\,)\,v_o \end{cases} \quad \text{(II.15)}$$

A partir le système d'équations (II.15), on peut calculer le rapport de conversion du convertisseur dévolteur-survolteur.

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{1-D} \quad \text{(II.16)}$$

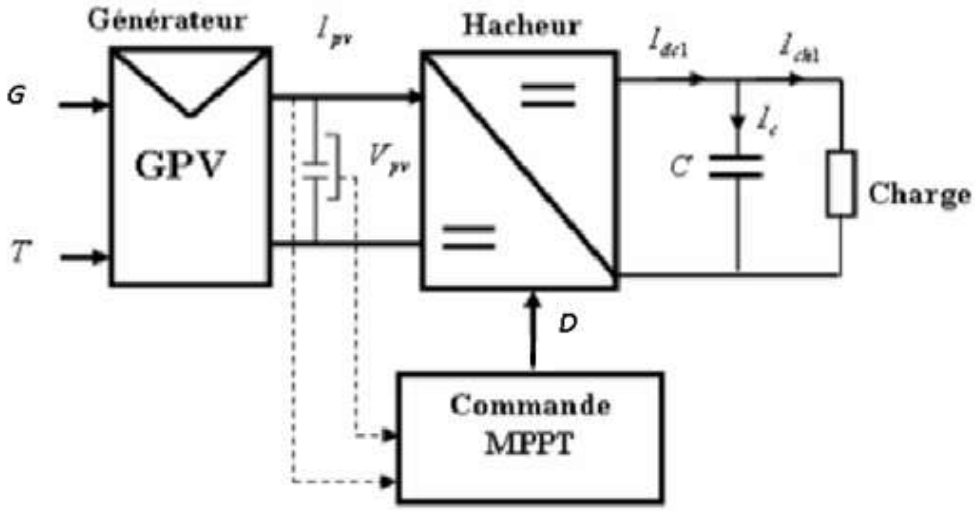
Le tableau suivant résume les trois structures du convertisseur statique :

Tableau(II.1) : Classification des convertisseurs statiques.

Convertisseur	Rapport de transformation	Isolation galvanique
Buck	D	Non
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Non
Buck-boost	$\frac{-D}{1-D}$	Non

II.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal(MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

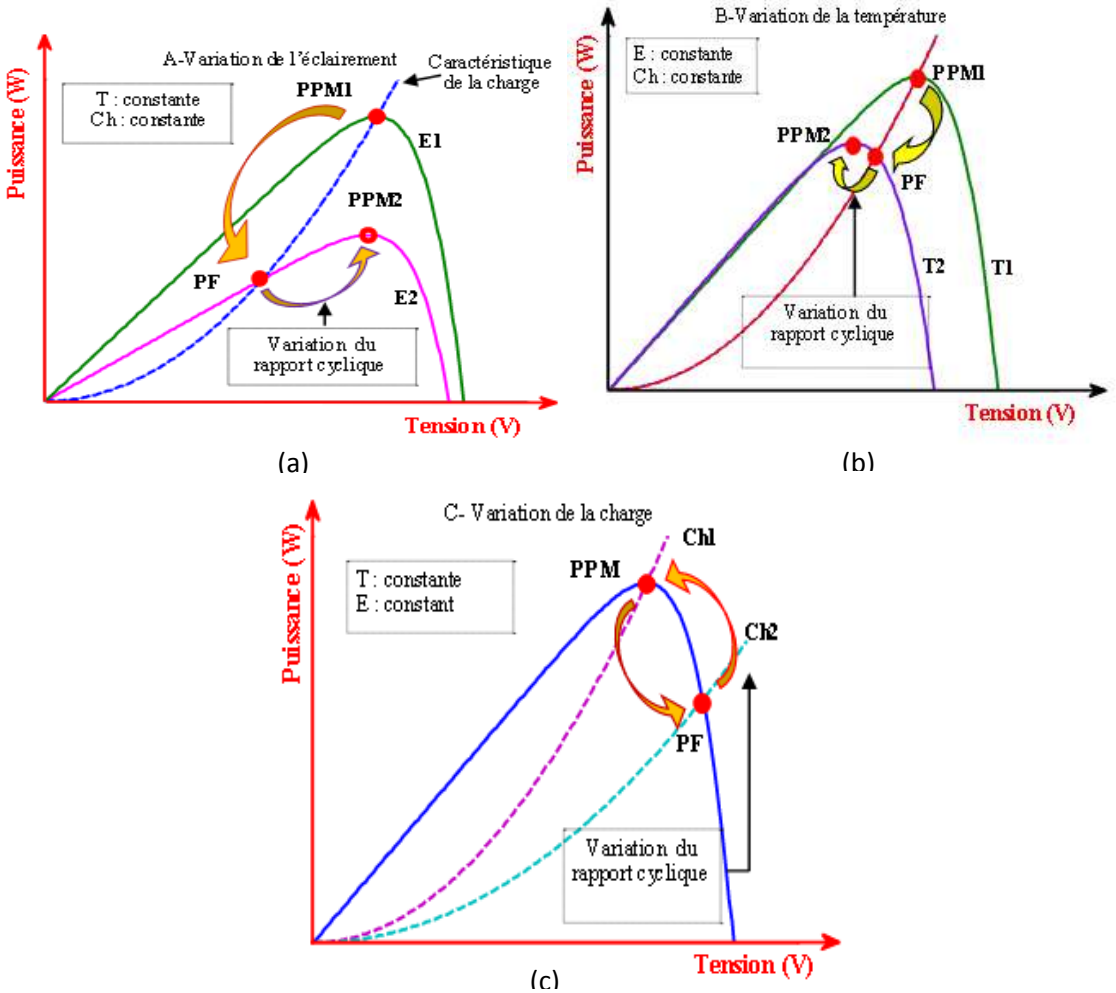


Figure(II.8) : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

La figure(II.8) Représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [13].

La figure (II.9) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM vers un nouveau point de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Comme La montre la figure(II.9), pour une puissance incidente E1, la puissance optimale transférée à la charge est le point PPM1. Si la puissance incidente change (E2), alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point de fonctionnement. Il

suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.Dans une moindre mesure, un cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas B). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande. Il en sera de même que lorsque la charge change (cas C), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS)pour rechercher et atteindre le PPM du GPV [6].



Figure(II.9) Variation du Point de Puissance Maximal avec l'éclairement, la température et la charge

a) suit à une variation d'ensoleillement,

b) suite à une variation de charge,

c) suite à une variation de température

II.4. La méthode Perturbation et Observation (P&O)

II.4.1.méthode Perturbation et Observation (P&O) classique

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte Ainsi, comme l'illustre la figure (II.10), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv}, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, 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 PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [1].

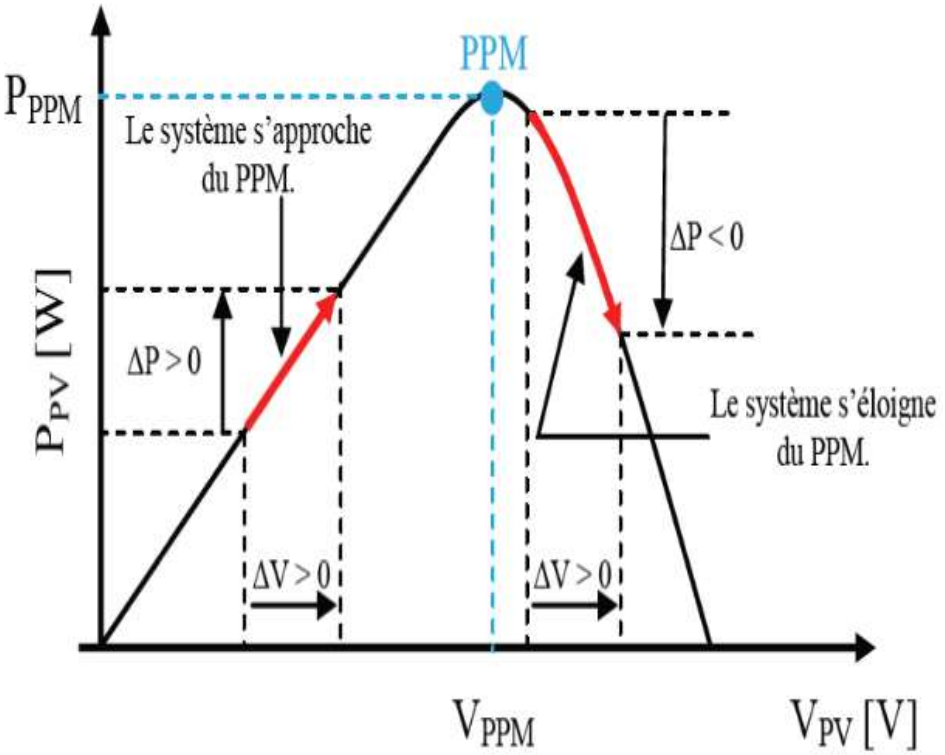


Figure (II.10) Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire

La figure (II.10) 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. La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [1].

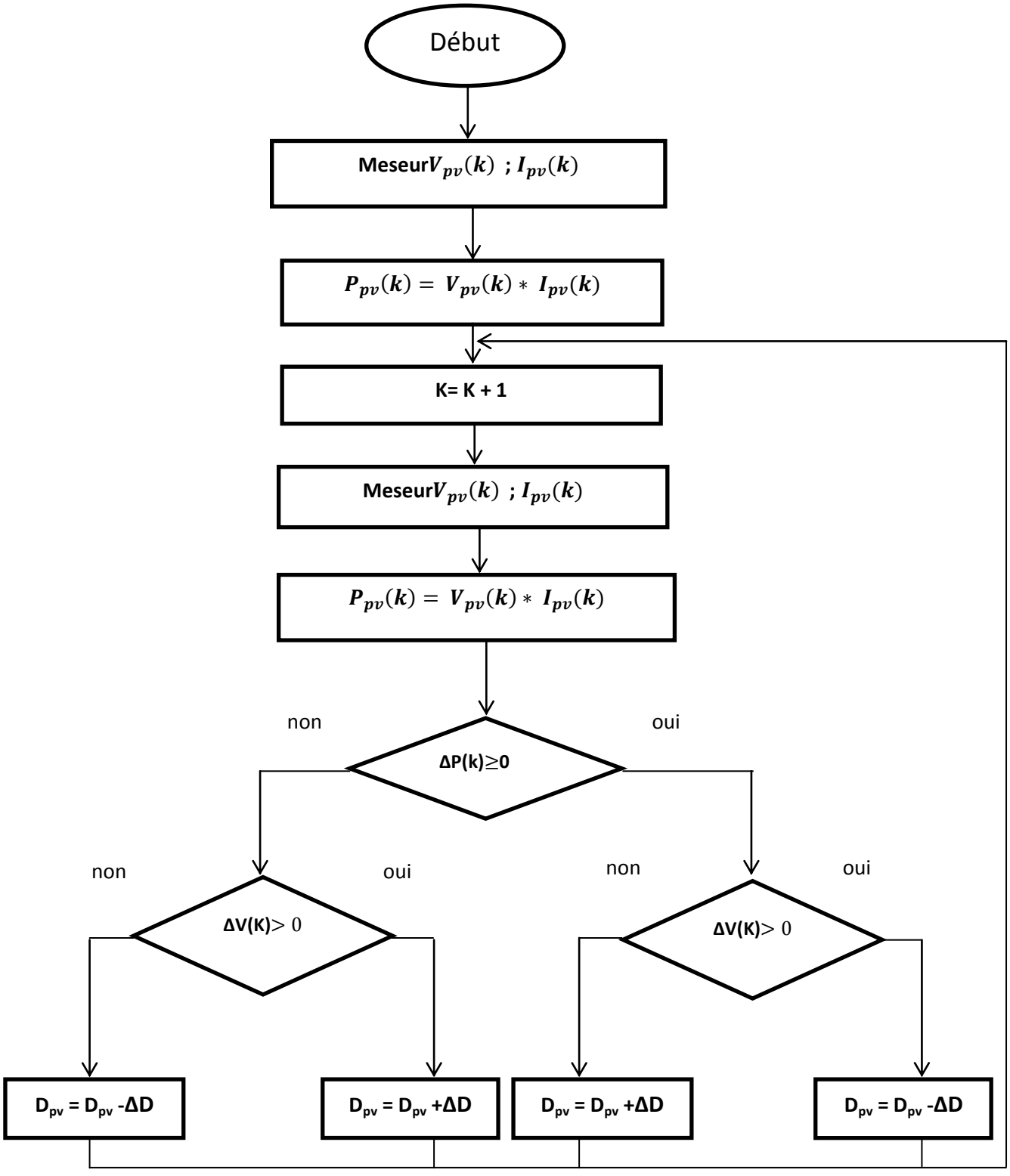


Figure (II.11) : Organigramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation"

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure (II.12) [1].

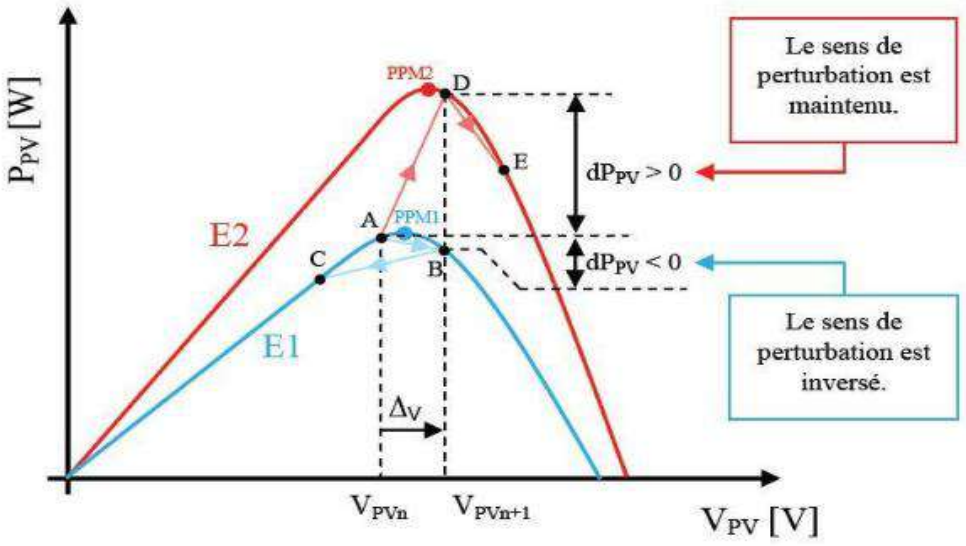


Figure (II.12) Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairement donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur ΔV, ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairement ,une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entrainant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C.

On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques P(V) du module de (E1), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance.

Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne

momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance momentanée.

Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables de fortes lacunes au niveau de la commande [1].

II.4.2. La méthode Perturbation et Observation (P&O) a pas variable

Lorsqu'on possède de l'expérience et une bonne connaissance de l'algorithme P&O, on peut "facilement" tracer, Figure (II.13), l'évolution du pas d'incrément ΔV en fonction de $\left[\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}\right]$. Cette figure montre qu'au voisinage du PPM $\left[\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \simeq 0\right]$; le pas d'incrément oscillera sur deux valeurs ΔV_{S2} et $-\Delta V_{S2}$ Ce phénomène produira des oscillations. La performance de l'algorithme P&O peut donc être améliorée en lui imposant un pas d'incrément Variable selon la logique suivante : le pas doit être grand lorsque l'on est loin du PPM $\left[\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}\right] > 0$ et le pas doit être petit lorsque l'on est proche du PPM [19].

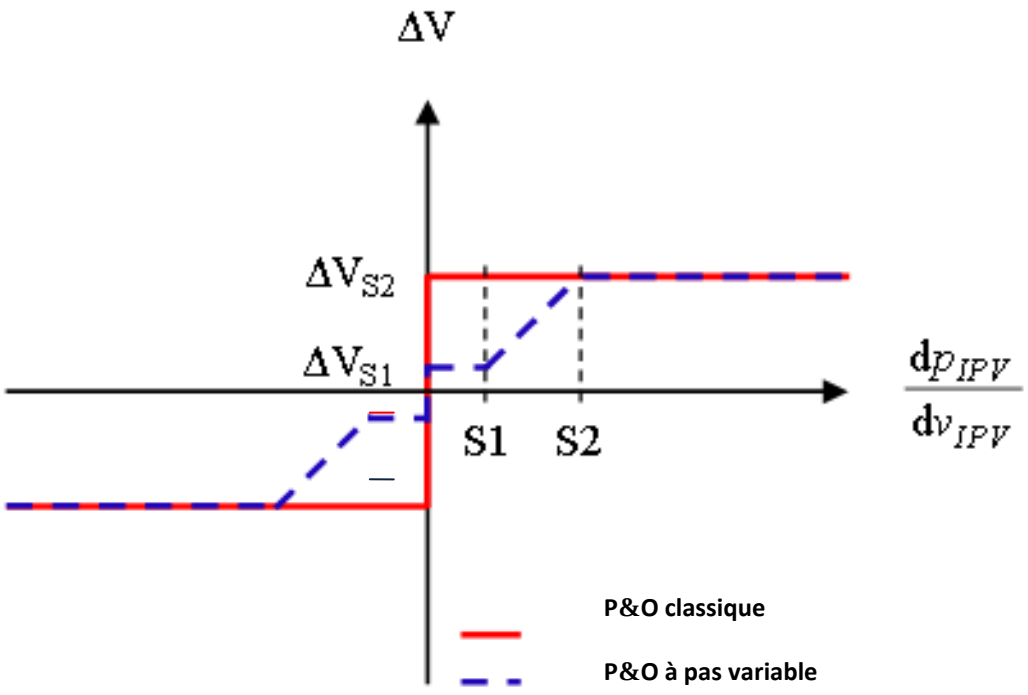


Figure (II.13) : Principe de fonction des algorithmes P&O classique et P&O à pas variable.

La Figure (II.13) illustre cette idée. En effet, entre le PPM et S1 nous imposons un pas d'incrément ΔV_{S1}, entre S1 et S2 le pas d'incrément varie linéairement (choix arbitraire) et à partir de S2 nous imposons un pas d'incrément ΔV_{S2}, (avec $\Delta V_{S1} < \Delta V_{S2}$).

Afin d'analyser les performances énergétiques des algorithmes MPPT, une comparaison, suite à des tests expérimentaux, est proposée. En vue de cette comparaison, pour une raison de cohérence, la valeur numérique de ΔV_{S2} doit être identique à celle utilisée avec un algorithme P&O à pas fixe.

De plus, il faut également déterminer la valeur de ΔV_{S1} et la valeur des deux seuils S1 et S2. Enfin, l'implémentation de cet algorithme requiert une méthodologie itérative basée sur une certaine expérience. Par ailleurs, pour l'instant rien ne prouve que la prise en compte d'une variation linéaire entre S1 et S2 soit meilleure qu'une variation parabolique ou autre [14].

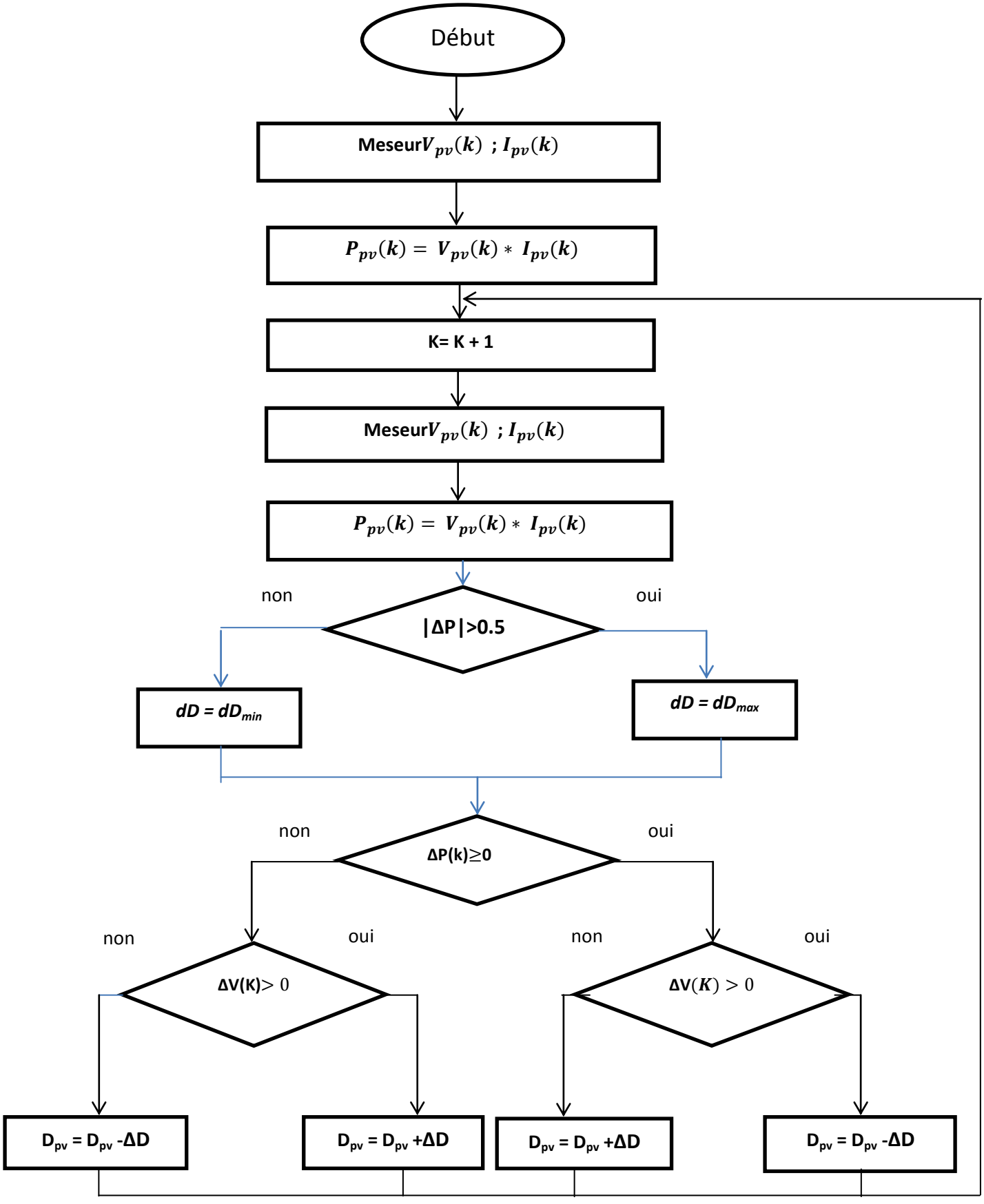


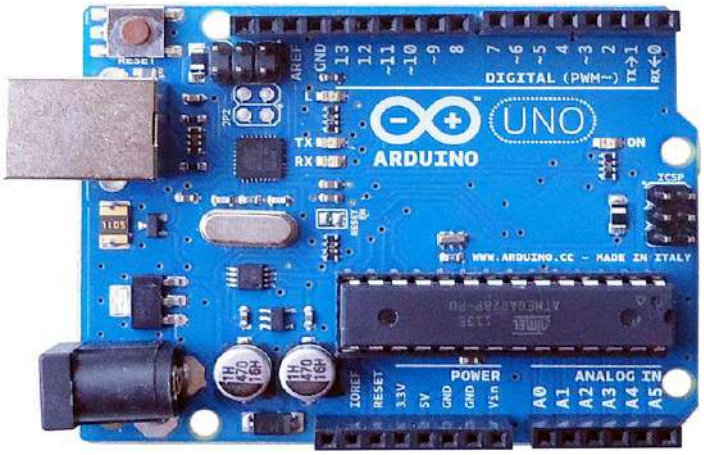
Figure (II.14) : Organigramme P&O à pas variable

II.5. Carte Arduino

Les cartes Arduino sont conçues pour réaliser des prototypes et des maquettes des cartes électroniques pour l'informatique embarquée. Ces cartes permettent un accès simple et peu couteux à l'informatique embarquée. De plus, elles sont entièrement libres de droit, autant sur l'aspect du code source (Open Source) que sur l'aspect matériel (Open Hardware). Ainsi, il est possible de refaire sa propre carte Arduino dans le but de l'améliorer ou d'enlever des fonctionnalités inutiles au projet. Le langage Arduino se distingue des langages utilisés dans l'industrie de l'informatique embarquée par sa simplicité. En effet, beaucoup de librairies et de fonctionnalités de base occulte certains aspects de la programmation de logiciel embarquée afin de gagner en simplicité [8].

II.5.1.Présentation d'Arduino

L'Arduino est une carte électronique en matériel libre pour la création artistique interactive, elle peut servir : pour des dispositifs interactifs autonomes simple, comme interface entre capteurs/actionneurs et ordinateur et comme programmateur de certains microcontrôleurs [8].



Figure(II.15) : Carte Arduino Uno

Une carte Arduino, comme toutes les cartes à microcontrôleur, permet de piloter un système de manière interactive à partir du programme que l'on aura défini et mis dans sa mémoire. Par exemple gérer automatiquement l'ouverture d'une porte de garage, envoyer un SMS quand le jardin est trop sec et gérer le système d'arrosage à distance, piloter un nouveau robot.

Il faut pour cela associer à la carte Arduino des capteurs comme capteur de lumière, de température et de position. Et des actionneurs comme moteurs et pompe, ainsi des organes de sortie comme lampe et chauffage. On peut associe aussi des circuits de puissance, une alimentation (piles, panneaux solaire,...), des interfaces de dialogue (boutons, leds,écran,...),

Des interfaces de communication (réseau filaire, réseau sans fil, ...)

II.5.3. Description de la carte Arduino

L'Arduino est une famille de cartes électronique à microcontrôleur open-source née en Italie en 2005. Ces cartes basées sur une interface entrée/sortie simple et sur un environnement de développement proche du langage C.

La carte Arduino Uno est la première version stable de carte Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation. Elle utilise une puce ATmega328P cadencée à 16 Mhz. Elle possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2ko de SRAM (mémoire vive) et 1 ko d'EEPROM (mémoire morte destinée aux données).

Elle offre 14 pins (broches) d'entrée/sortie numérique (donnée acceptée 0 et 1) dont 6 pouvant générer des PWM (Pulse width Modulation). Elle permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces 6 entrées analogiques. Chaque broche est capable de délivré un courant de 40 mA pour une tension de 5V. Cette carte Arduino peut aussi s'alimenter et communiquer avec un ordinateur grâce à son port USB. On peut aussi l'alimenter avec une alimentation comprise en 7Vet 12V grâce à son connecteur Power Jack.

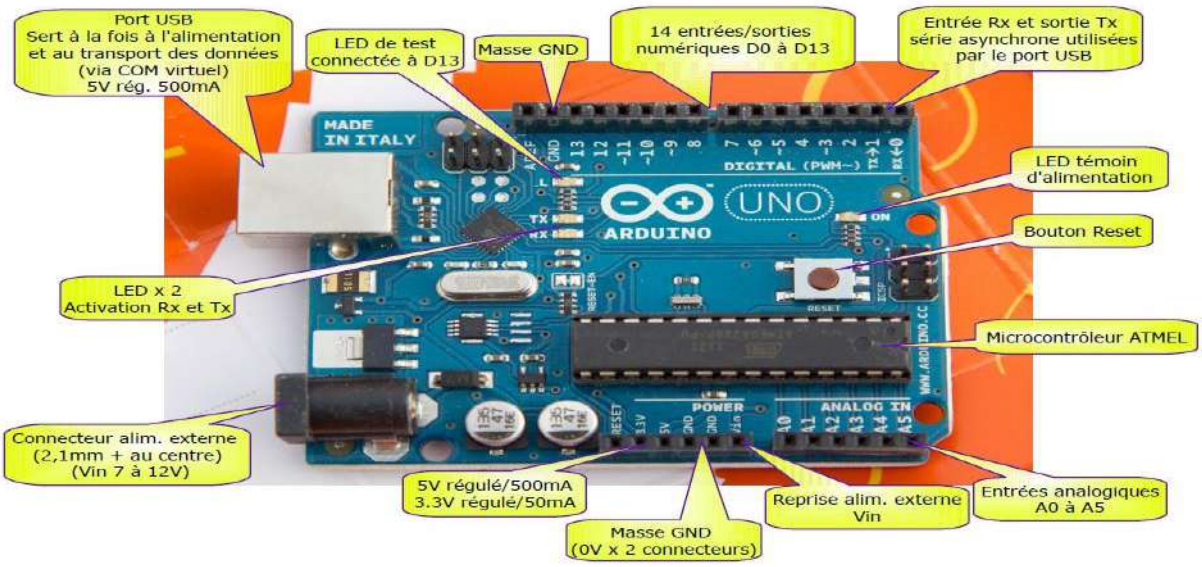


Figure (II.16): Description d'une carte Arduino Uno

II.5.4.Port USB

Le port USB permet à la fois l'alimentation de la carte Arduino et la communication série entre la carte et l'ordinateur. Une fois connectée, la carte Arduino apparaît dans le gestionnaire de matériel de votre ordinateur, connecté à un port série (COM1, COM4, …). Vous devez vérifier que l'IDE (le programme fourni par Arduino) est bien configuré pour dialoguer sur le bon port COM (et pour le bon type de carte Arduino !). L'IDE permet de scanner le port COM et de récupérer les messages éventuels de la carte. Utiliser toujours cet outil pour debugger votre programme quand il y a des informations qui circulent sur le port série : Outils / Moniteur série.

II.5.5.Le microcontrôleur

Le microcontrôleur correspond au **cerveau du système**. C'est lui qui va traiter les informations provenant des capteurs et qui va donner la réponse voulue aux actionneurs

Le microcontrôleur est composé de quatre parties :

- **microprocesseur** qui va prendre en charge la partie traitement des informations et envoyer des ordres. Il est lui-même composé d'une unité arithmétique et logique(UAL) et d'un bus de données. C'est donc lui qui va exécuter le programme embarqué dans le microcontrôleur.

- **mémoire de données** (RAM ou EEPROM) dans laquelle seront entreposées les données temporaires nécessaires aux calculs. C'est en fait la mémoire de travail qui est donc volatile.

- **mémoire programmable** (ROM), qui va contenir les instructions du programme pilotant l'application à laquelle le microcontrôleur est dédié. Il s'agit ici d'une mémoire non volatile puisque le programme à exécuter est à priori toujours le même. Il existe différents types de mémoires programmables que l'on utilisera selon l'application. Notamment :
- OTPROM : programmable une seule fois mais ne coute pas très cher.
- UVPROM : on peut la refuser plusieurs fois grâce aux ultraviolets.
- EEPROM : on peut la refuser plusieurs fois de façon électrique comme les mémoires flash.

La **dernière partie** correspond aux ressources auxiliaires. Celles-ci sont généralement :
-Ports d'entrées/ sorties parallèle et série.

- Des timers pour générer ou mesurer des signaux avec une grande précision temporelle.
- Des convertisseurs A/N pour traiter les signaux analogiques.

II.6.Langage de programmation

La façon dont le microcontrôleur gère ses entrées / sorties est fixée par un programme, contenu dans le microcontrôleur. Ce programme doit être écrit par l'utilisateur. En pratique, l'utilisateur écrit le programme en langage C, en utilisant un environnement de développement spécialisé (IDE) installé sur un ordinateur. Ce programme est ensuite compilé et télé versé dans le microcontrôleur par liaison série (USB).

Nous utiliserons l'IDE standard Arduino (arduino.exe). Il suffit de taper le code dans la fenêtre dédiée, de compiler et de télé verser le programme sur la carte arduino. La carte doit être reliée à l'ordinateur par un câble USB. La modèle de la carte arduino (il y a plusieurs type de carte) ainsi que le port série sur lequel elle est branchée doivent être déclarés dans le menu de l'IDE Outils/type de carte et Outils/port série.

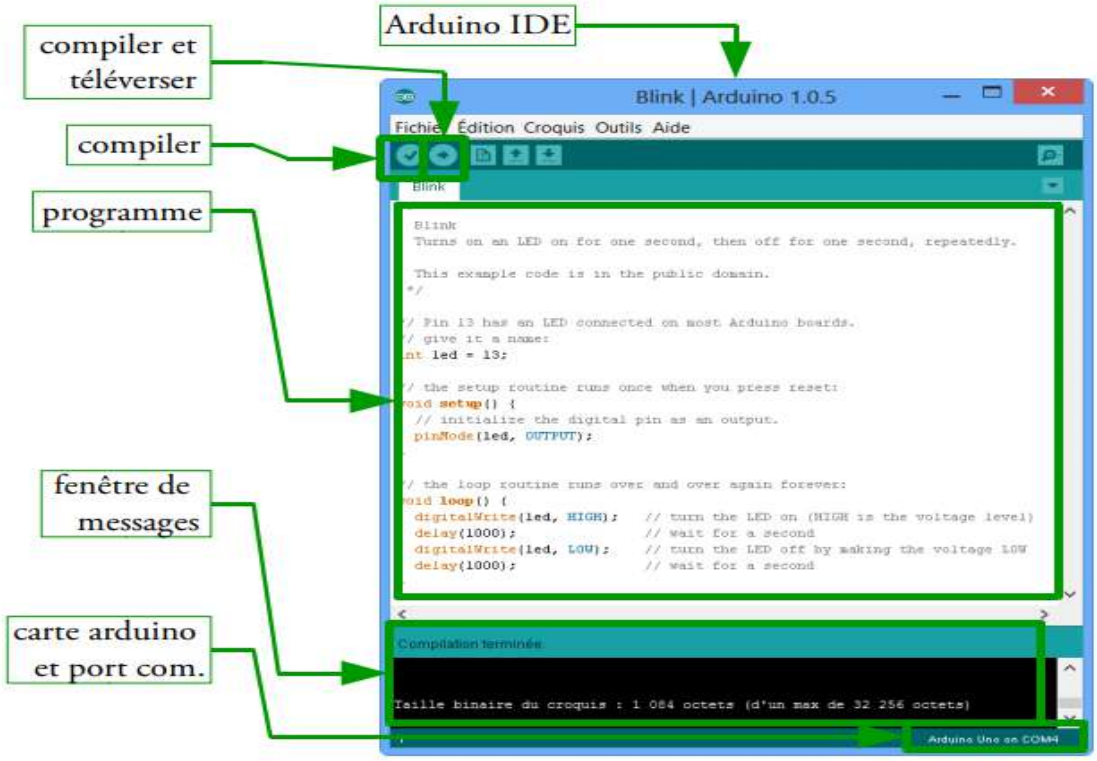


Figure (II.17) : Logiciel Arduino

Une fois télé versé dans le microcontrôleur, le programme s'exécute. La fonction setup() s'exécute une seule fois, la fonction loop() s'exécute en boucle. De nombreux

exemples de programmes sont disponibles via le menu Fichier/Exemples de l'IDE, classés par thèmes. N'hésitez pas à vous inspirer de ces exemples pour vos propres programmes. N'hésitez pas non plus à regarder sur internet les nombreux sites d'exemples et de conseils liés à Arduino, mais essayez de bien comprendre la logique des exemples que vous utiliserez.

II.7.Capteur de tension

Le diviseur de tension figure (II.18) peut détecter la tension d'alimentation jusqu'à 25V. Le module DF Robot diviseur de tension est basé sur le principe diviseur de résistance. Le module de détection de tension permet à la tension d'entrée pour réduire la 5 fois. Comme la tension d'entrée analogique Arduino est à 5V, si la tension d'entrée de tension module de détection ne peut pas être supérieure à la 5Vx5 = 25V [1].

Spécification :

- Type: Analogique
- Tension d'entrée (DC): 25V maximum, minimum 0.0245V
- Détecte la tension d'alimentation jusqu'à 25V
- 3 Pins JST modulent d'interface

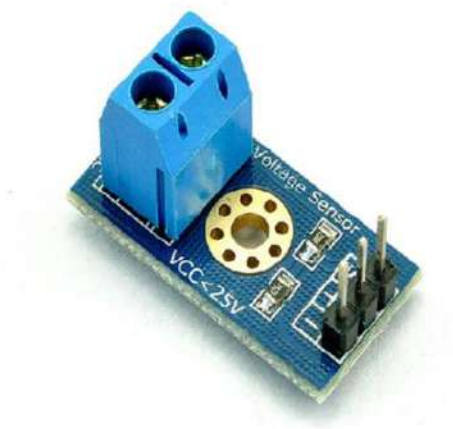


Figure (II.18): Capteur de tension

II.8.Capteur de courant

Le dispositif ACS712 Allegro offre un moyen économique et précis de détection de courants AC et DC. Ce capteur de courant Allegro ACS712 est basée sur le principe de l'effet Hall, le principe quand un conducteur de courant est placé dans un champ magnétique déposé, une tension est générée sur ses bords perpendiculaires à la direction à la fois du courant et du champ magnétique. La figure (II.19) représente la photo d'un capteur de courant ACS712 de 5A utilisé dans notre travail.



Figure (II.19): Capteur de courant ACS712

La sortie du dispositif a une pente positive lorsqu'un courant augmentant circule à travers le chemin de conduction de cuivre. Le ACS712-5B peut mesurer le courant jusqu'à ± 5A et fournit la sensibilité de sortie de 185 mV/A (à +5V), qui signifie que pour chaque augmentation de 1A dans le courant à travers les bornes de conduction dans le sens positif, la tension de sortie augmente aussi par 185 mV. Au zéro de courant, la tension de sortie est la moitié de la tension d'alimentation (Vcc / 2). Il est à noter que la sortie fournit ACS712 ratio métrique, ce qui signifie que le courant de sortie de zéro et la sensibilité de l'appareil sont à la fois proportionnel à la tension d'alimentation VCC. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour l'utilisation de la ACS712 avec un convertisseur analogique-numérique

II.9.Afficheur LCD

Les afficheurs à cristaux liquides, autrement appelés afficheurs LCD 2x16 figure (II.20) (Liquid Crystal Display), sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement. Ils consomment relativement peu (de 1 à 5

mA), sont relativement bons marchés et s'utilisent avec beaucoup de facilité. Plusieurs afficheurs sont disponibles sur le marché et diffèrent les uns des autres, non seulement par leurs dimensions, (de 1 à 4 lignes de 6 à 80 caractères), mais aussi par leurs caractéristiques techniques et leur tension de service [5](voir ANNEXE C).

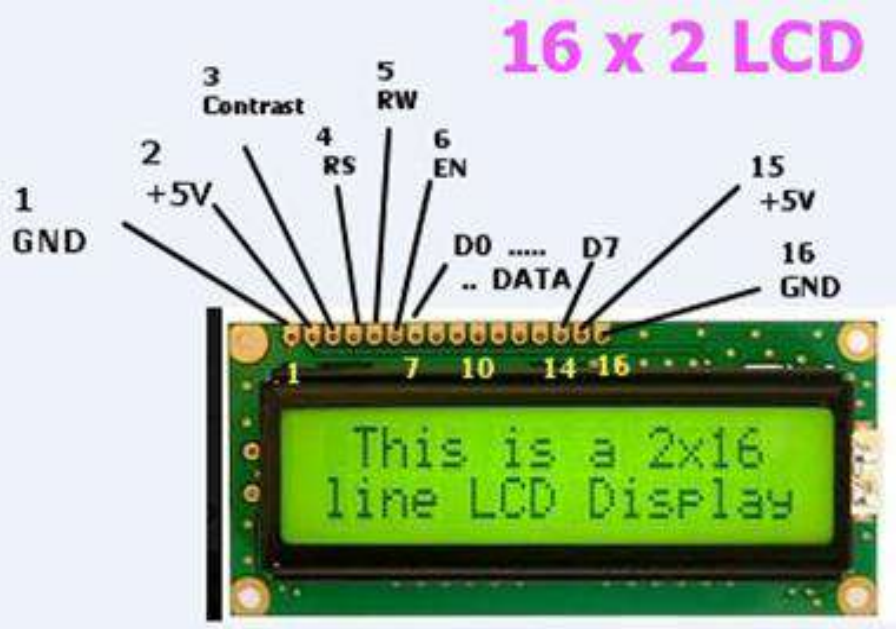


Figure (II.20):Afficheur LCD

II.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques types des convertisseurs statiques continu-Continu utilisés dans les systèmes PV. Comme le convertisseur dévolteur, le convertisseur survolteur et le convertisseur mixte (dévolteur survolteur). Ensuite, nous avons exposé brièvement la commande MPPT des convertisseurs DC-DC et la méthode de perturbation et observation (classique, amélioré) a pas variable.

A la fin nous avons fait un bref aperçu sur : la définition d'Arduino Uno et son contenu avec sa programmation, le capteur de courant, le capteur de tension et l'afficheur LCD.

Chapitre III

Simulation d'un système photovoltaïque

Chapitre III

Simulation d'un Système photovoltaïque

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter Sous Matlab /Similink un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique et les résultats de simulation de PV sons commandent. Ce système Est constitué d'un module photovoltaïque, un convertisseur survolteur« boost », une commande MPPT «P&O» ainsi qu'une charge. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simpower.

III.2.L'outil Matlab/simulink

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble

III.2.1.Simpower

Est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes d'électronique de puissance et commande.

III.3.Système photovoltaïque proposée

La figure (III.1) représente le schéma synoptique d'un système PV alimente une charge

•Le module PV (ET-M53620) [voir l'annexe1] est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 20 W, un courant de 1.14A sous une tension optimale de 17.82V.

•Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur (boost) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17.82V.

•La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque, (voir figure II.8)

III.3.1.Modélisation du générateur photovoltaïque

Le champ PV est constitué de modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance souhaitée. Chaque module est lui-même composé de cellules. Pour la modélisation du champ PV, nous partirons donc de l'élément de base qui est la cellule. De nos jours il existe plusieurs modèles électriques de la cellule [36].

Ce modèle est constitué de photo-courant, de diode, de résistance parallèle, et de résistance série comme l'indique la Figure (III.1). L'équation de la caractéristique tension-courant de la cellule solaire est donnée par l'équation (III.1).

$$I = I_{ph} - I_0(e^{\frac{V+R_S\,I}{n\,V_t}} - 1) - \frac{V+R_S\,I}{R_p} \qquad \text{(III.1)}$$

Où I_{ph} est le photo-courant, I_o le courant de saturation, R_s la résistance série de la cellule, R_p la résistance parallèle de la cellule, a le facteur d'idéalité de la diode et V_t est la tension thermique.

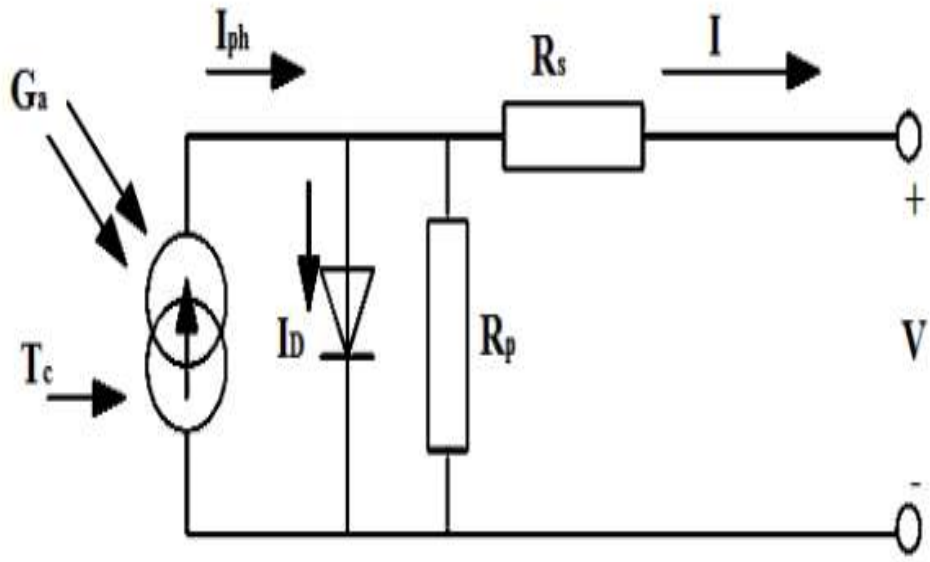


Figure (III.1): Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les expressions du photo-courant et du courant de saturation sont données par les équations (III.1) et (III.2) :

$$I_{ph} = (I_{cc} + KidT)\frac{G}{G_n} \quad \text{(III.2)}$$

$$Io = \frac{I_{cc} + K_i dT}{e^{\frac{V_{CO}+K_v dT}{Vta}} - 1} \quad \text{(III.3)}$$

Où Isc est le courant de court-circuit, Ki le coefficient de température de court-circuit, Kv le coefficient de température en circuit ouvert, T la température, Voc la tension en circuit ouvert, G l'irradiance solaire et $G_n$est l'irradiance solaire nominale.

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV est donnée par l'équation (III.3) :

$$Im = Npp\ Iph - NppIo\ [e^{V + (RsNss/Npp)I\ /\ Vta} - 1] - \frac{V+\left({}^{RsNss}/_{N_{PP}}\right)I}{RpNss/Npp} \quad \text{(III.4)}$$

$$V + \left({}^{RsNss}/_{Npp}\right) I$$

III.3.2.Caractérisation du module PV

Le modèle suivant utilise des méthodes différentes pour calculer la résistance série et la résistance parallèle. Les paramètres d'ET-M53620 sont donnés dans le tableau IV. Qui est essentiel pour modeler le panneau photovoltaïque PV [Annexe A].

Tableau (III.1) fiche technique de ET-M53620de module de PV au STC

Puissance maximale	20W
Tension à puissance maximale ou tension optimale	17.82V
Courant à puissance maximale ou courant optimal	1.14A
Courant de court-circuit	1.27A
Tension à circuit ouvert	21.96V
Nombre des cellules en séries	36
Coefficient de température de Courant de court circuit	0.058%/°C
Coefficient de température de tension à circuit ouvert	-0.367%/°C
Coefficient de température de puissance	-0.485%/°C

III.3.3.Schéma du module photovoltaïque dans Matlab

La simulation du module photovoltaïque est réalisée avec le bloc de Simulink. Le modèle de matlab de module photovoltaïque est basé sur la référence. Certaines variables sont modifiées pour l'application avec la poursuite de point de puissance maximale. Les paramètres d'entrée exigée pour le modèle sont :

Imp: courant à la puissance maximale au STC

Ns: nombre de cellules en série

Npp: nombre de modules en parallèle

Nss: nombre de modules en série

A: surface de la diode.

K: $1{,}38.10^{-23}$ $J/^{0}K$, constante de Boltzmann

Iscn: courant nominale de court-circuit

Kp: Coefficient de la température de tension

Ki: coefficient de température courant

V_{mp}: Tension maximum de puissance au STC (standard température condition).

La fiche technique des caractéristiques de PV d'est employée pour calculer les valeurs nécessaire pour R_s, R_p.et d'autres paramètres pour le point de puissance maximale. Le montage initial est employé pour obtenir les caractéristiques de la courbe I-V de Panneau PV et pour Prouver le point de puissance maximale du PV. Le modèle du PV est employé avec le convertisseur DC-DC(Boost) pour déterminer l'exécution du traqueur le point de puissance maximale.

Le modèle du générateur photovoltaïque a été mis en application dans Simulink suivant les indications. La température et l'irradiante sont spécifiées. La simulation laisse avoir les caractéristiques I-V et P-V. Le modèle de Simulink emploie une source courante, et une source de tension et la valeur de résistance en série et en parallèle du PV.

Le nombre de modules en série et le parallèle sont données avec le N_{ss} et la N_{pp}. Le résultat du courant $I_m$est employé pour le bloc de Simulink comme source de courant pour obtenir la tension et le courantI_{pv} fournis du PV.

La figure (III.2) est le bloc qui représente le panneau photovoltaïque et qui peut être employé avec différents circuits de puissance dans Simulink. On peut noter que les entrées du PV sont l'irradiation et la température, les sorties sont la tension et le courant [23].

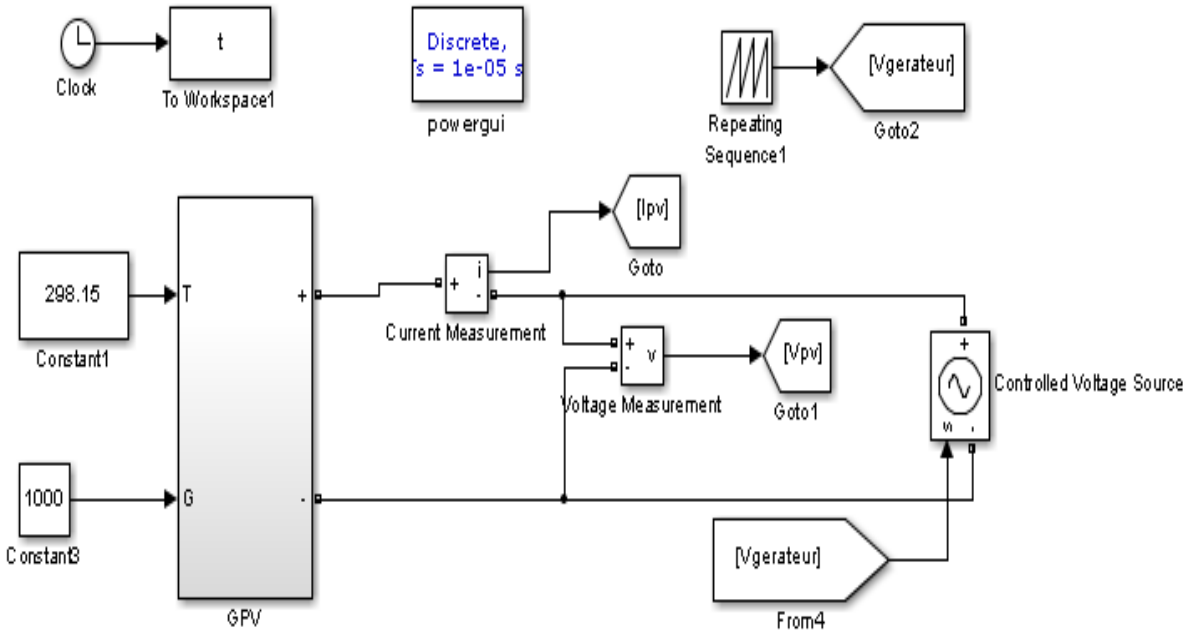
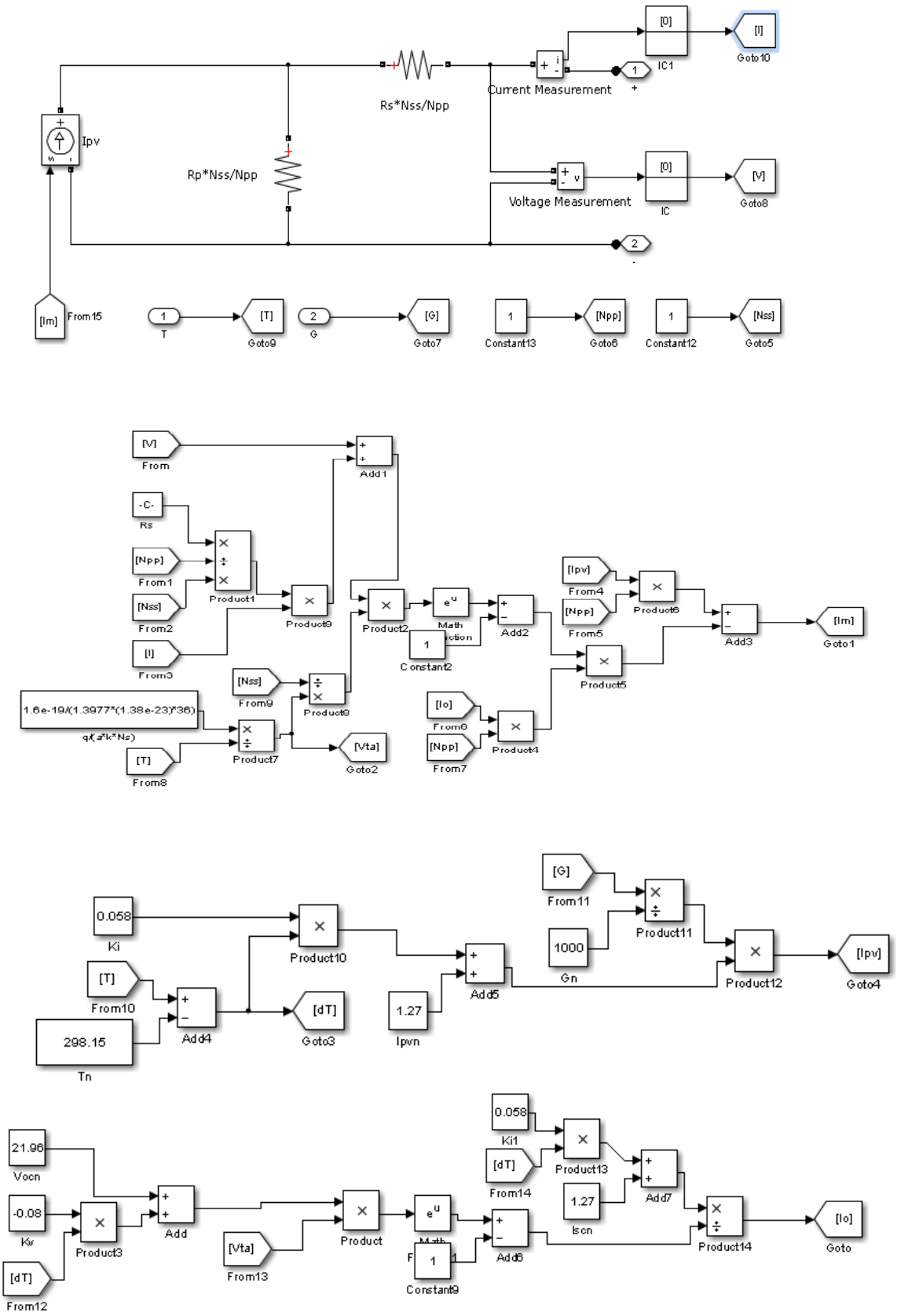


Figure (III.2): bloc de Simulink de générateur photovoltaïque

La figure(III.3) montre l'interface de masque de ce modèle de PV. Le paramètre d'entrée pouce modèle est le courant photovoltaïque. La variation du courant du photovoltaïque varie la tension photovoltaïque de sortie. Le modèle de Simulink est dérivé du modèle décrit dans

La partie de Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque (Chapitre I)

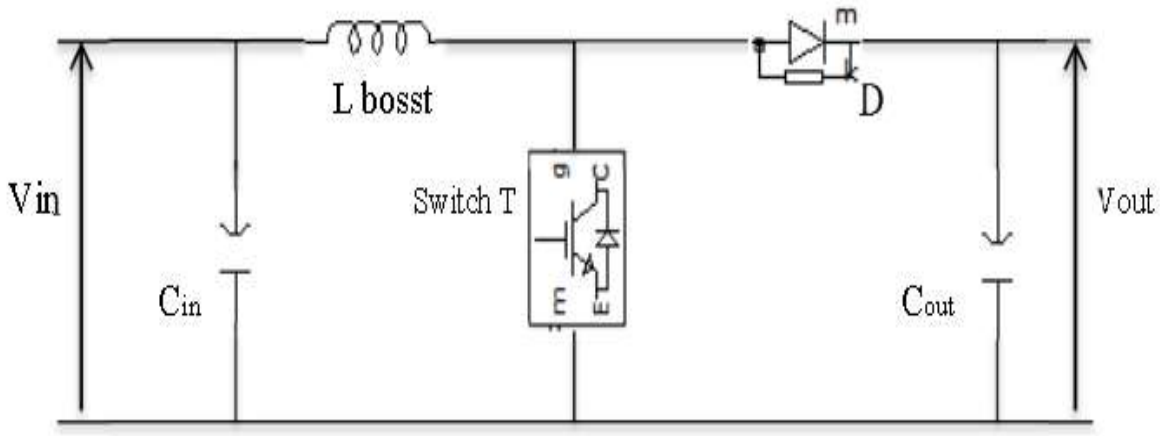


Figure(III.3): Modèle de sous-système de Simulink du panneau de 20 watts (ET-M53620) [15][16]

III.4.Modèle deSimulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT

La figure (III.4) montre schéma de convertisseur boost. L'entrée de convertisseur est la tension de sortie de panneau photovoltaïque. L'inductance et le condensateur ont besoin

D'être spécifiés. La commande de commutation du transistor est obtenue à partir du contrôleur MPPT.



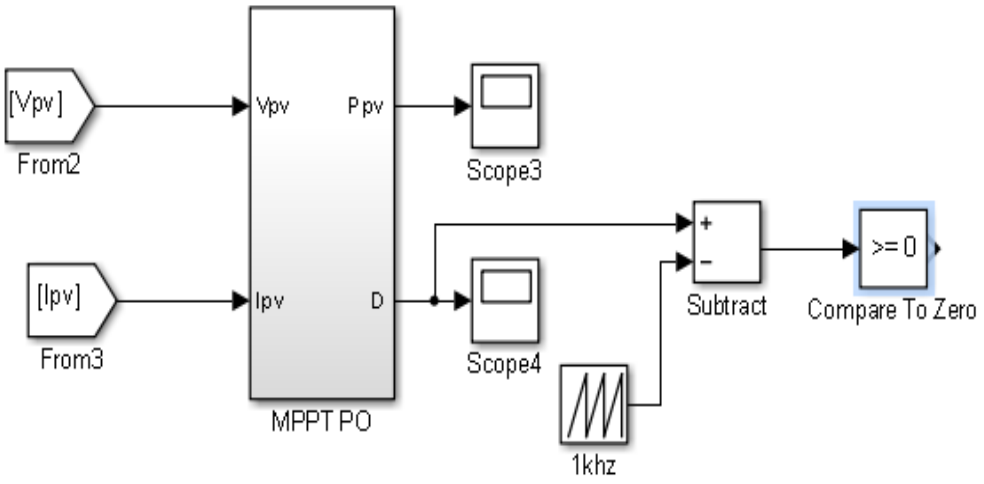
Figure(III.4): Simulation de convertisseur boost

La relation entre la tension d'entrée V_{in} et de sortie V_o du convertisseur est donnée par l'équation

$$V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \qquad \text{(II.5)}$$

III.5.Simulation de la méthode MPPT

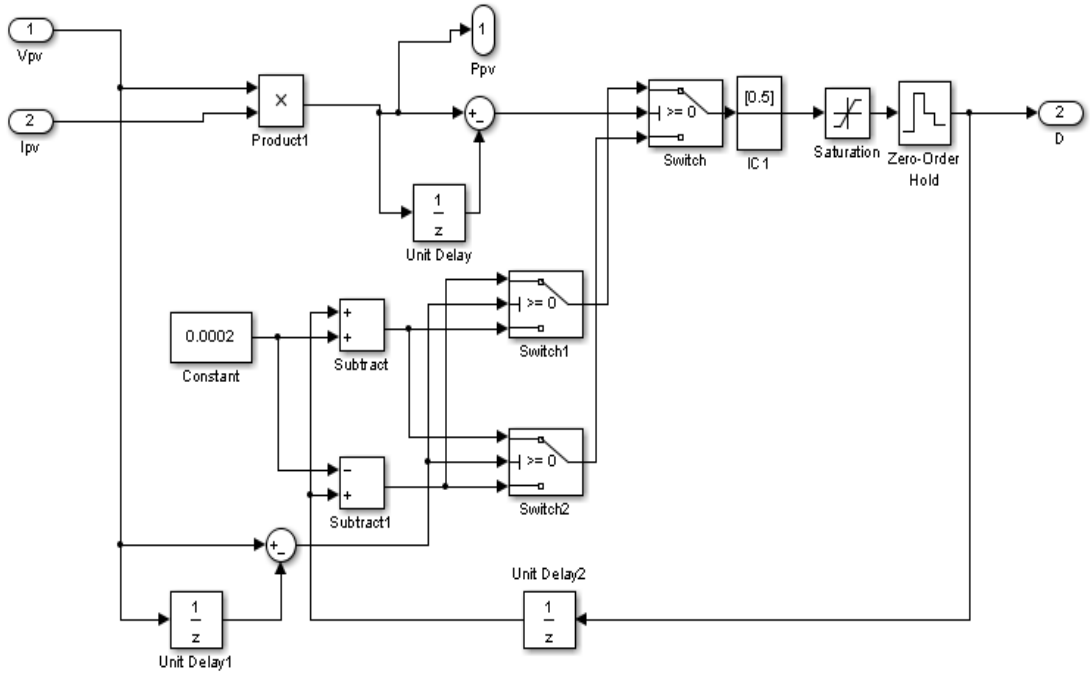
Le bloc de contrôleur du point de puissance maximale est montré sur la figure (III.5) La tension et le courant de panneau photovoltaïque sont les entrées, et le rapport cyclique (D) est la sortie. Le rapport cyclique est comparé à un signal triangulaire pour produire la MLI. La fréquence De signal triangulaire est la fréquence des impulsions du convertisseur boost.



Figure(III.5):Bloc de Simulink pour MPPT

III.5.1.Perturbation et observent (P&O) classique

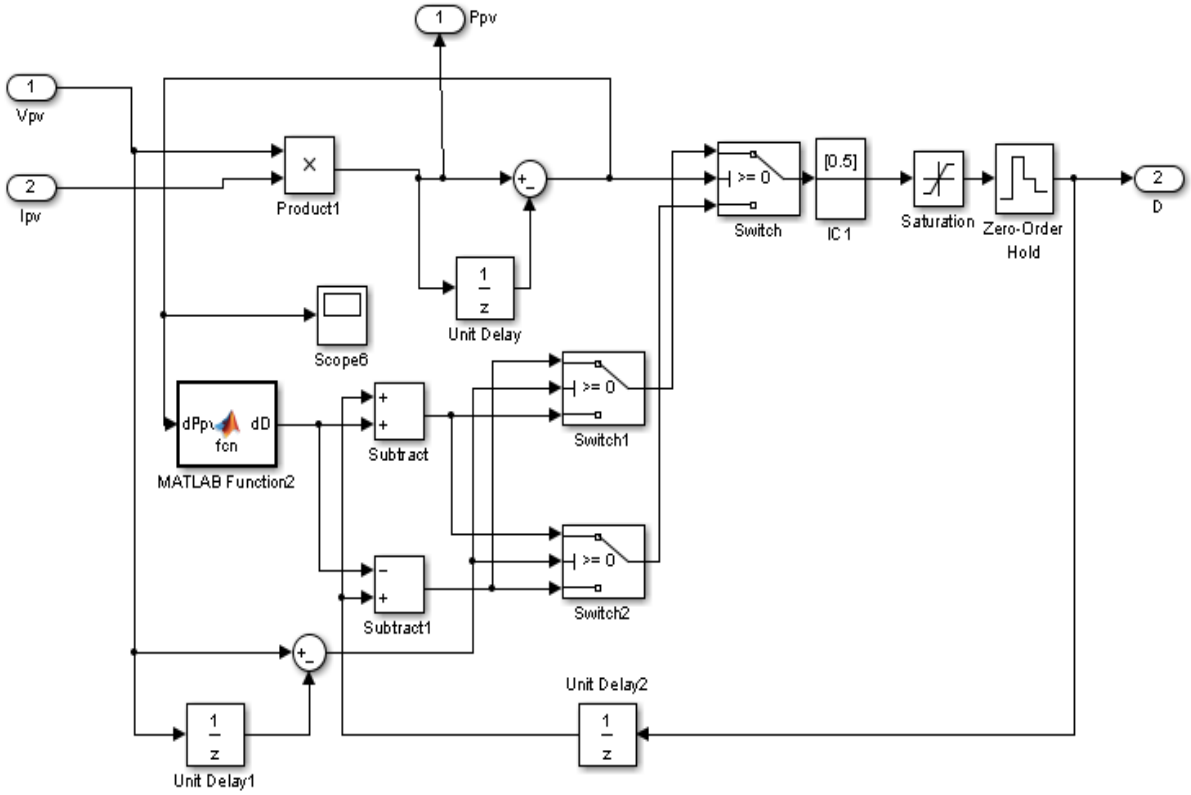
L'algorithme de perturbation et observent (P&O) classique est mis en application et montré sur la figure(III.6).à partie de la figure(II.11).



Figure(III.6): simulation de commande P&O classique

III.5.2.Perturbation et observent (P&O) a pas variable

L'algorithme de perturbation et observent (P&O) a pas variable est mis en application et montré sur la figure(III.7).à partie de la figure(II.11).



Figure(III.7): simulation de commande P&O à pas variable

III.6.Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

La figure(III.8) est le montage du convertisseur boost, de panneau photovoltaïque et du contrôleur de point de puissance maximale (MPPT) dans Simulink .Le système à une charge résistive pour tester la simulation.

Le Tableau (III.2) présente les paramètres du convertisseur boost calculé dans l'annexe A

Rch	57.8Ω
L	≥74mH
Cin	≥699.05µF
Cout	≥821.79µF

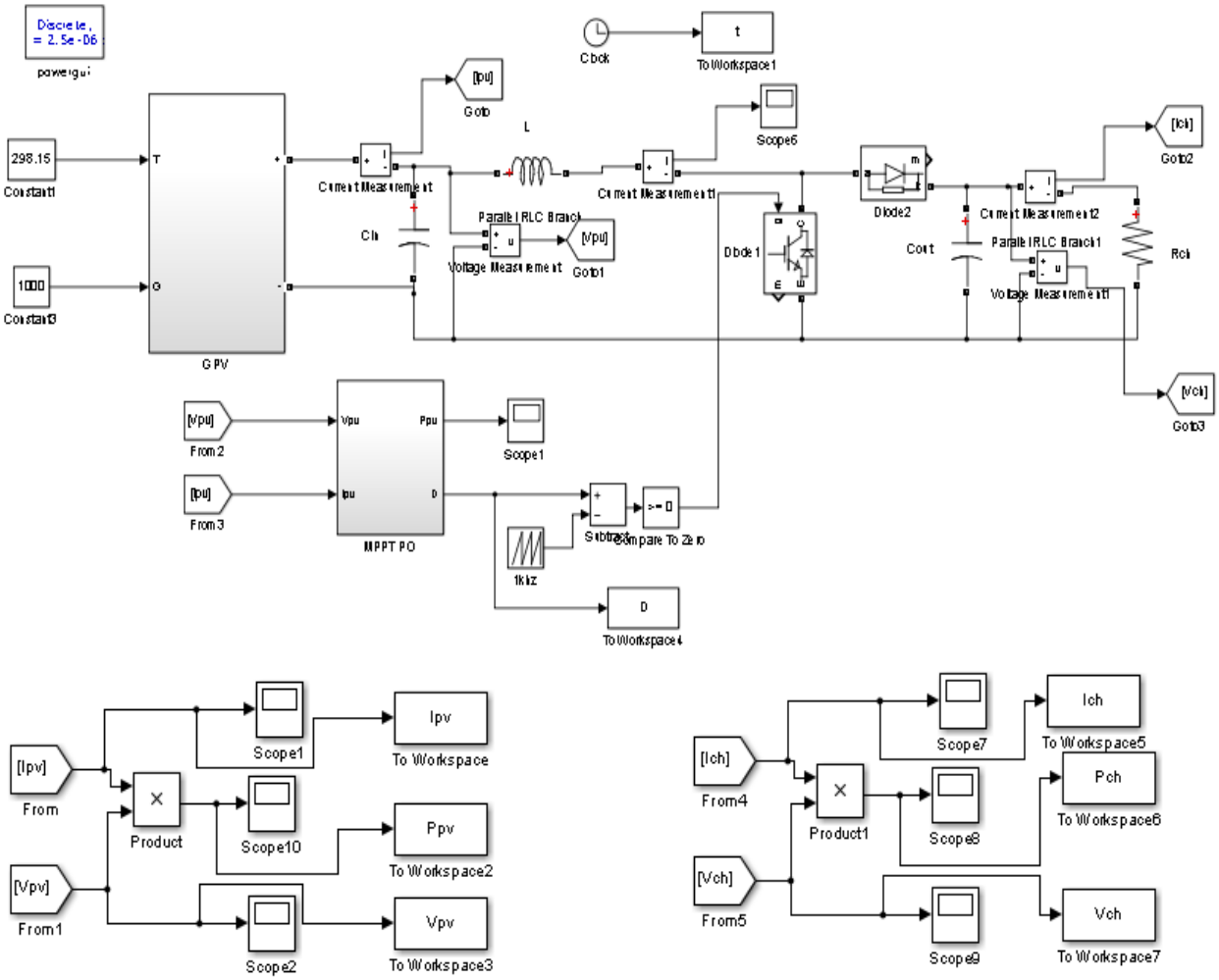


Figure (III.8):Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

III.7.Résultats de simulation de PV

Le modèle du système photovoltaïque dans le chapitre II est employé pour déterminer l'exécution du contrôleur de MPPT avec le convertisseur boost. Cette simulation présente une analyse du panneau photovoltaïque avec le convertisseur boost et la charge résistive. La température, l'irradiante et la charge, sont variés pour déterminer l'exécution du MPPT et pour tracer la puissance maximale du PV.

III.7.1.Caractéristiques du générateur photovoltaïque

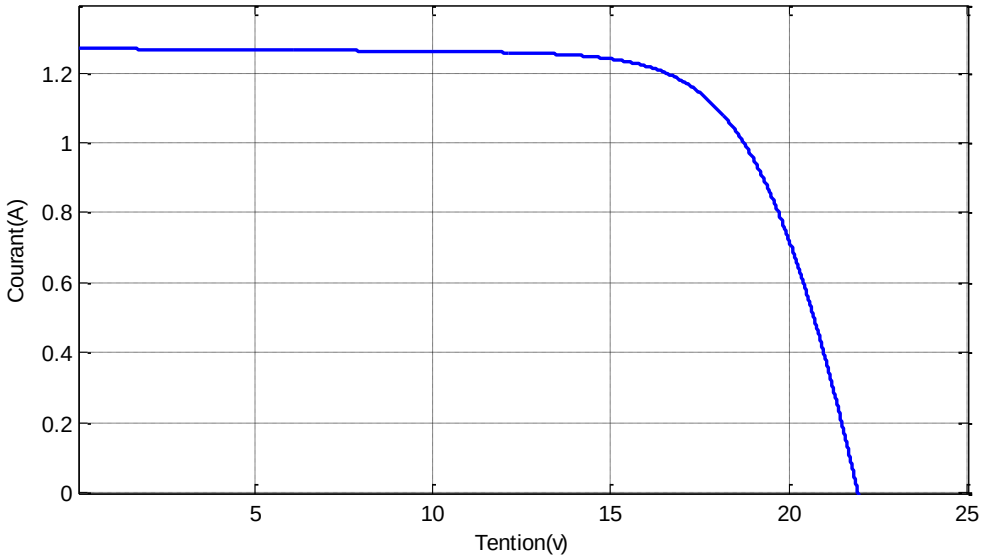
III.7.1.1.Les caractéristiques d'I-V et P-V de PV :

Le modèle photovoltaïque utilisé est ET-M53620. Ila une puissance maximale20W. La fiche technique du PV est donnée dans l'annexe.

La tension V_{mpp} et courantI_{mpp}sont identiques avec les valeurs données par le fabricant dans le tableau(III.2).

La figure(III.9) est la courbe de courant en fonction de la tension de panneau ET-M53620.

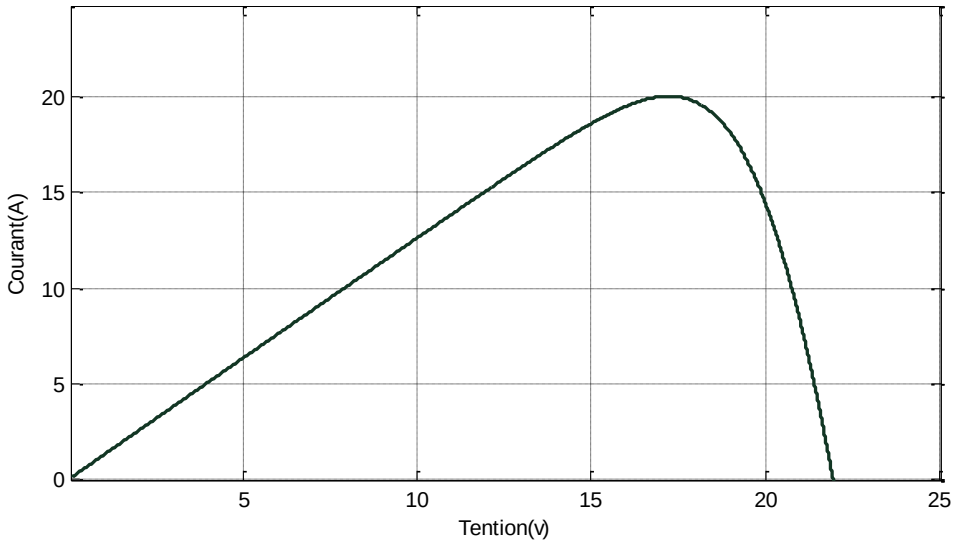
Il peut noter que la puissance maximale du module simple est 20W



Figure(III.9):Caractéristique I=f(V) du panneau PV (T=25C°, G=1000W/m²)

La figure(III.10) est la courbe de puissance en fonction de la tension de panneau ET-M53620.

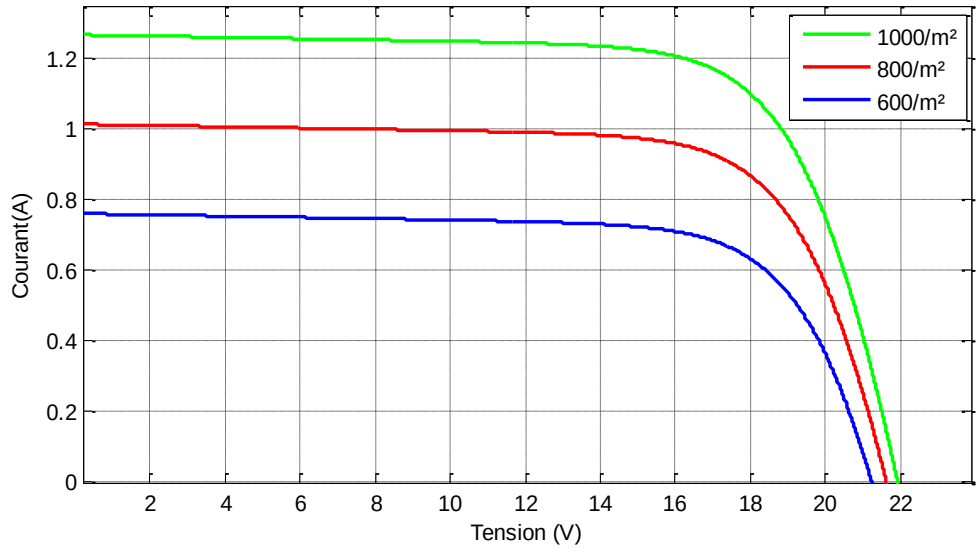
Il Peut noter que la puissance maximale du module simple est 20W.



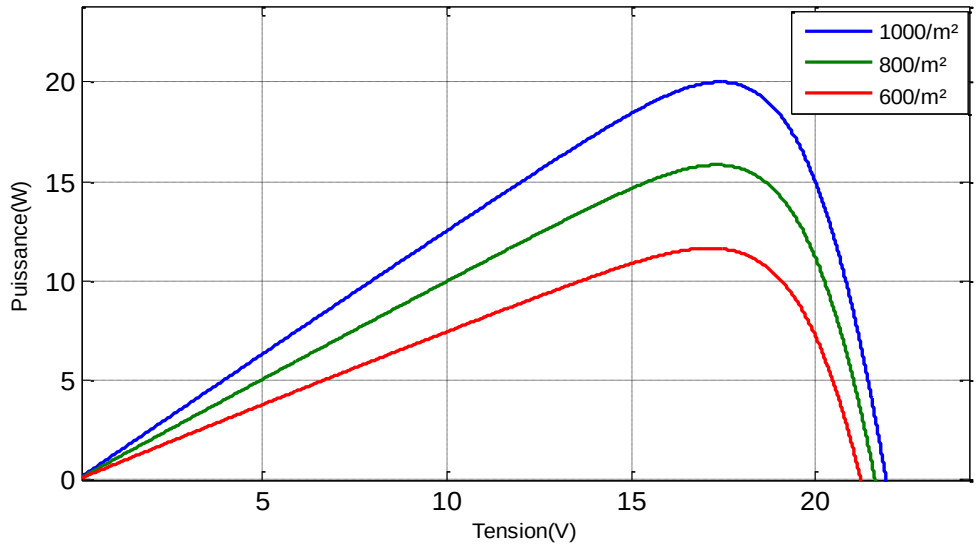
Figure(III.10):Caractéristique P=f(V) du panneau PV(T=25C°, G=1000W/m²)

III.7.1.2.simulation PV avec variation de l'éclairement

Les figures (III.11) et (III.12) montrent les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque «ET-M53620» pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante T=25°C.



Figure(III.11): Résultats de simulation de la caractéristique Courant-Tension du module PV



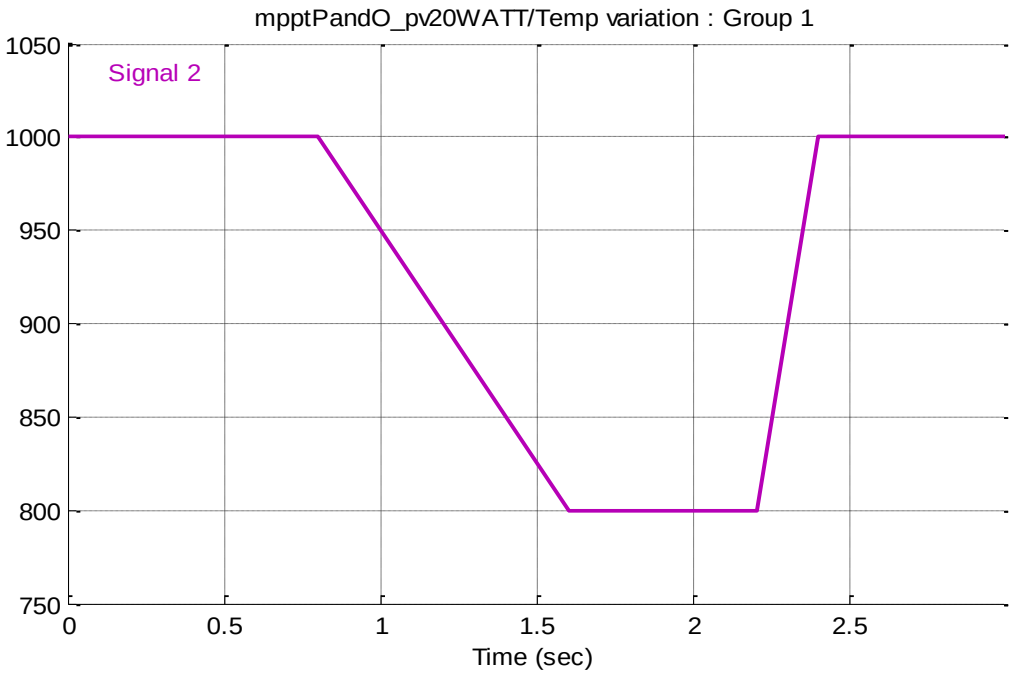
Figure(III.12): Résultats de simulation de la caractéristique Puissance-Tension du module PV

On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant de court-circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM proportionnellement à l'éclairement.

III.7.2.simulation de l'algorithme P&O (classique et a pas variable)

Dans cette simulation, nous nous proposons deux tests différents (a conditions standards, avec un changement d'irradiation) pour deux méthodes (P**&**O classique, P**&**O à pas variable)

- Test1: a Conditions standards: les valeurs d'irradiation et la température sont fixées à:G=1000W/m² et T=298.15°K (25°C)
- Test2: a un changement d'irradiation: Dans ce cas la température étant considérée constante (T=298.15°K (25°C).

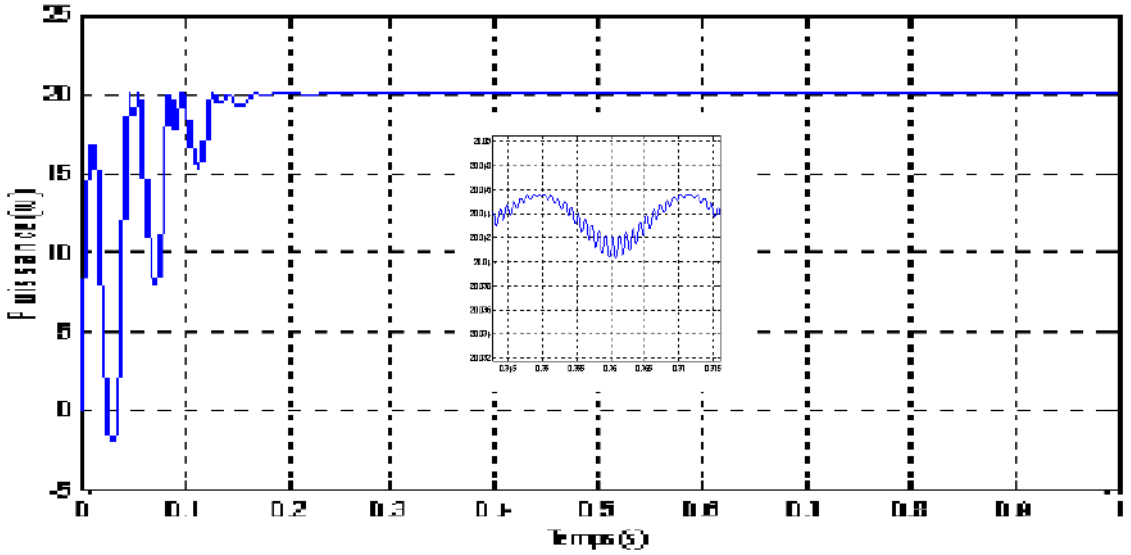


Figure(II.13) : variation d'irradiation

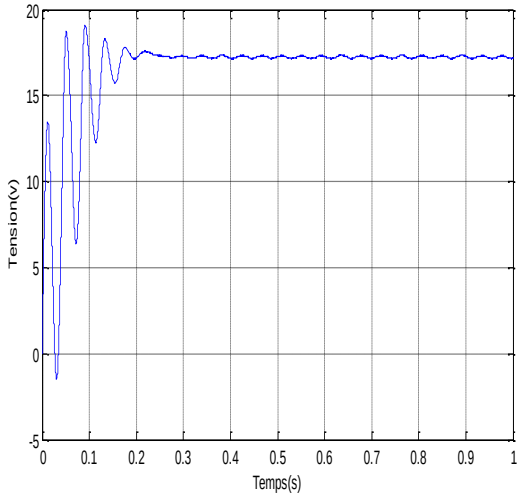
III.7.2.1.méthodes P&O classique

a-conditions standards (T=25₀C & G=1000W/m²)

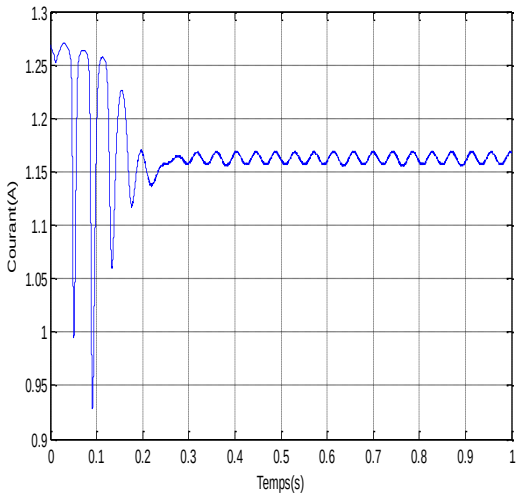
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation (P&O) classique» représentent par les figures suivant:



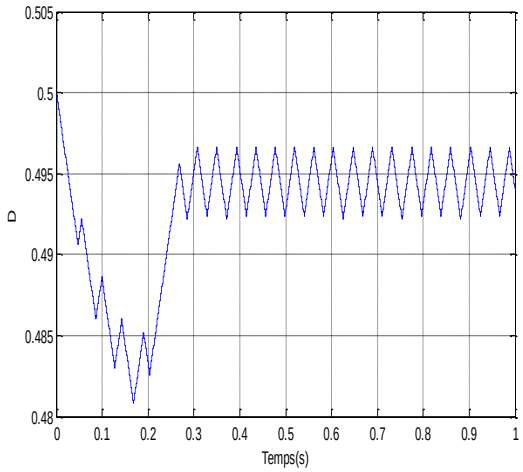
a-Puissance(PV)



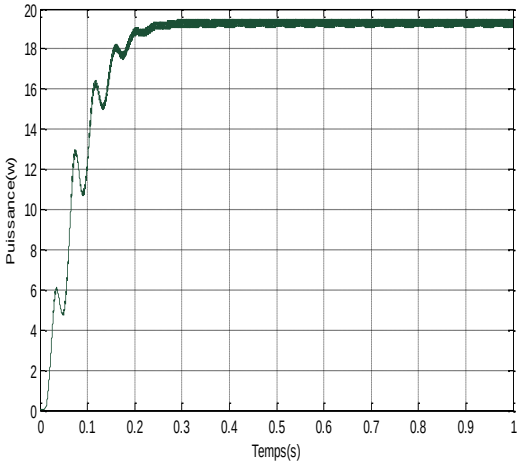
b-Tension(PV)



c-Courant(PV)



d-Rapport de cyclique

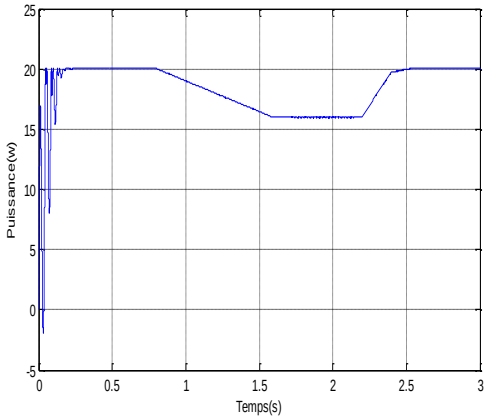


e-Puissance (charge)

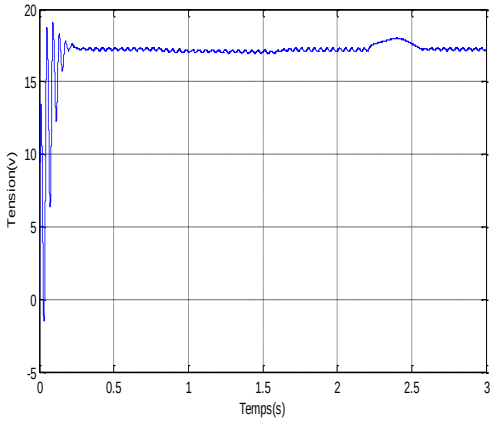
Figure(III.14): réponse de l'algorithme P&O classique dans les conditions standards (T=25oC &G=1000W/m²)

b-Comportement de la méthode à un changement d'irradiation

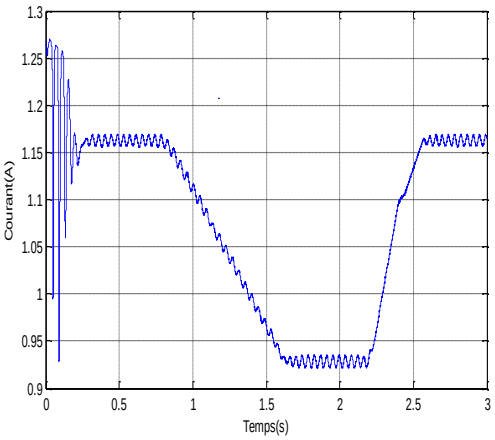
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation (P&O) classique» représentent par les figures suivant:



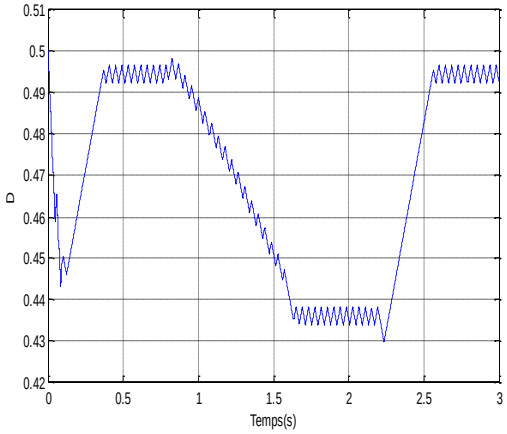
a-Puissance(PV)



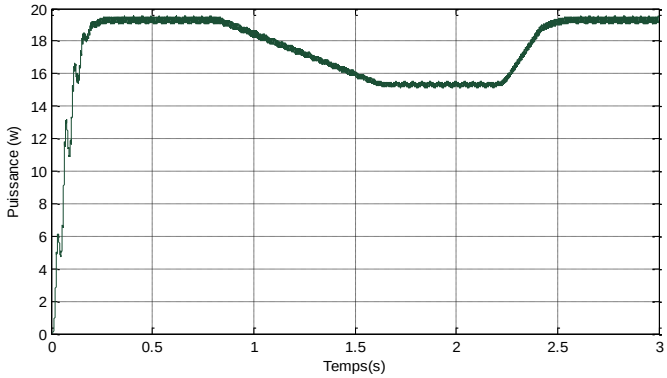
b-Tension(PV)



c-Courant(PV)



d- rapport cyclique



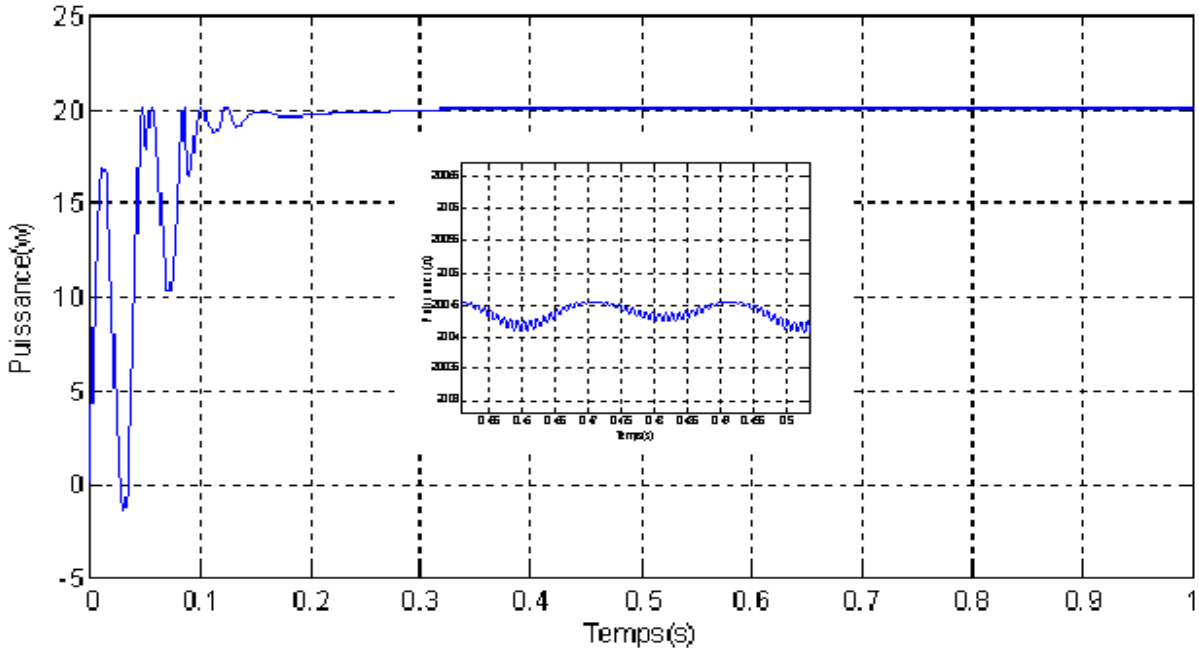
e-Puissance (charge)

Figure(III.15): Réponse du contrôle P&O classique pour une variation d'irradiation dans(T=25C°).

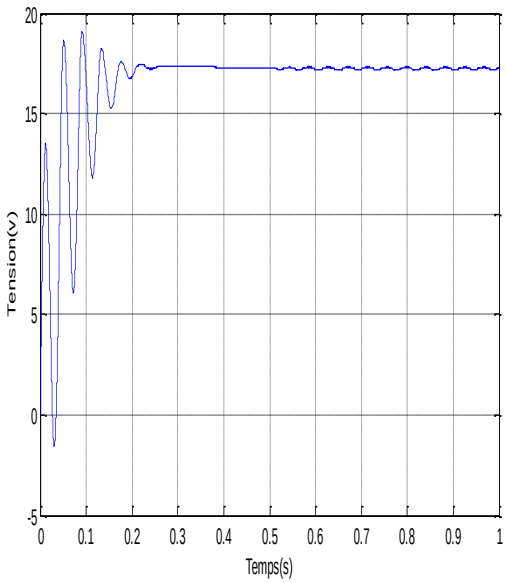
Pour l'algorithme P&O, nous remarquons une Relation de corrélation directe entre la puissance produite par le système PV et l'éclairement G_a si la température est fixe. Mais il a des oscillations autour du PPM.

III.7.2.2.méthodes P&O à pas variable

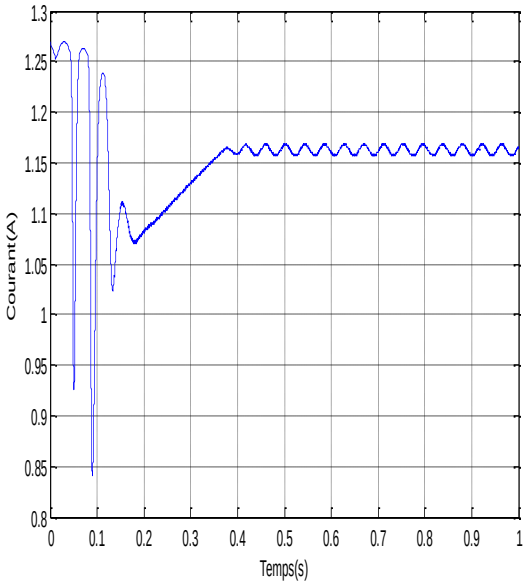
a-conditions standards (T=25₀C & G=1000W/m²)



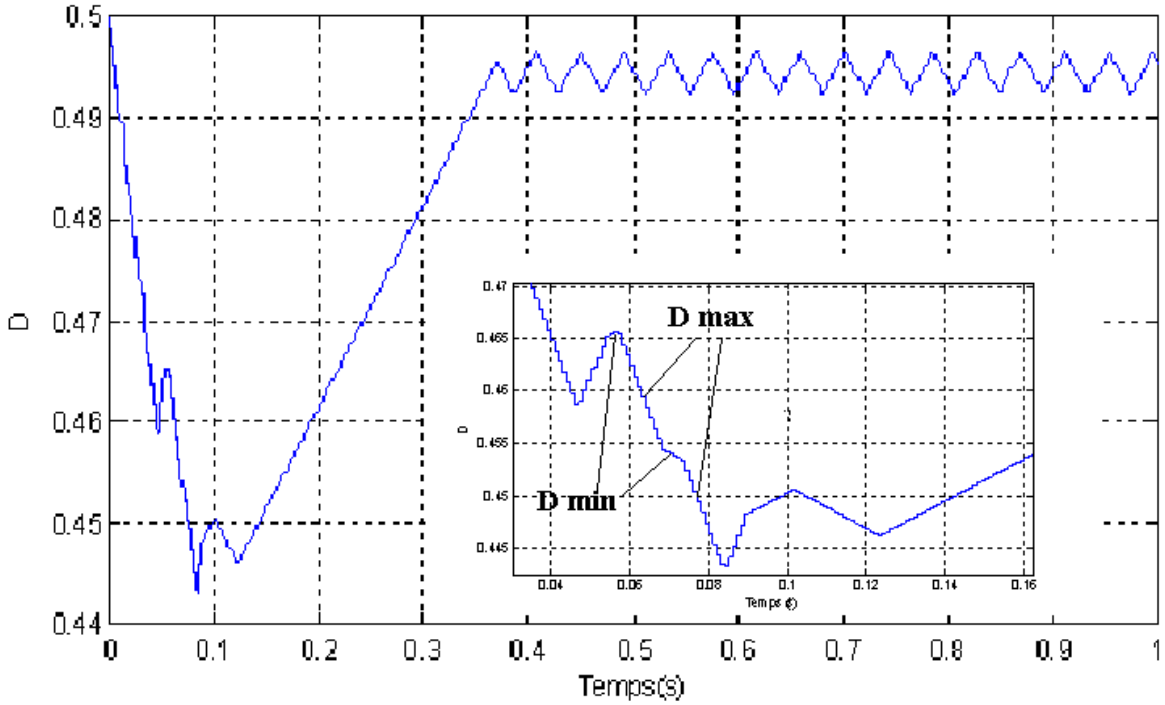
a-Puissance(PV)



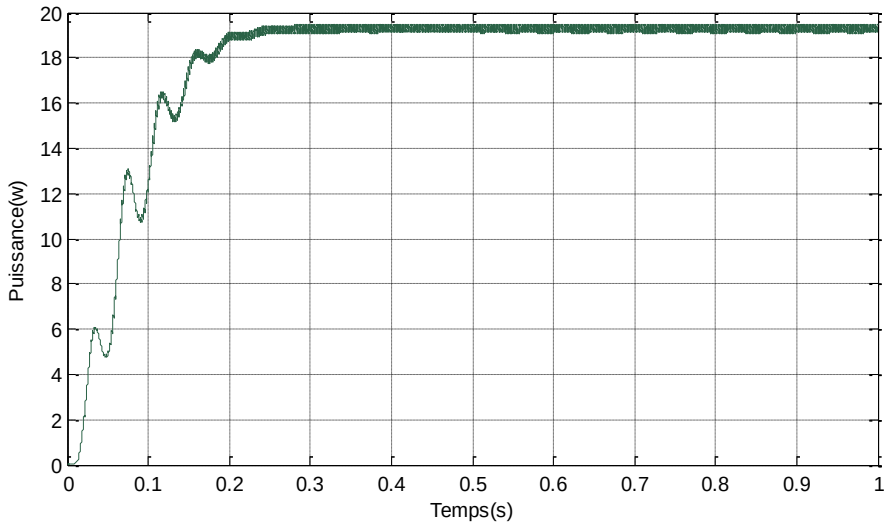
b-Tension PV



c-Courant PV



d-Rapport cyclique

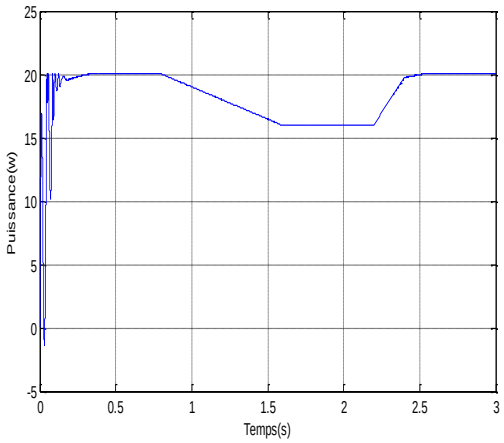


e-Puissance charge

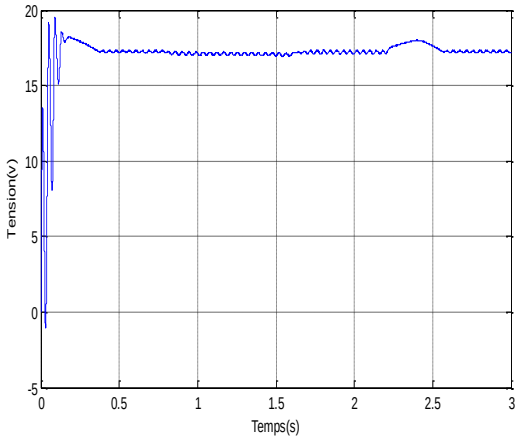
Figure(III.16): Réponse du contrôle P&O à pas variable dans les conditions standards (T=25oC &G=1000W/m²)

b-Comportement de la méthode à un changement d'irradiation

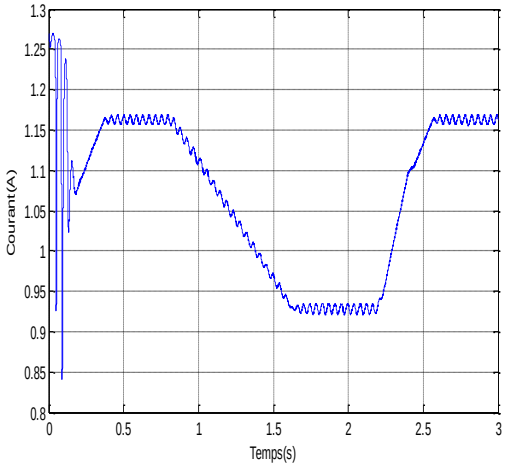
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation (P&O) à pas variable» représentent par les figures suivant:



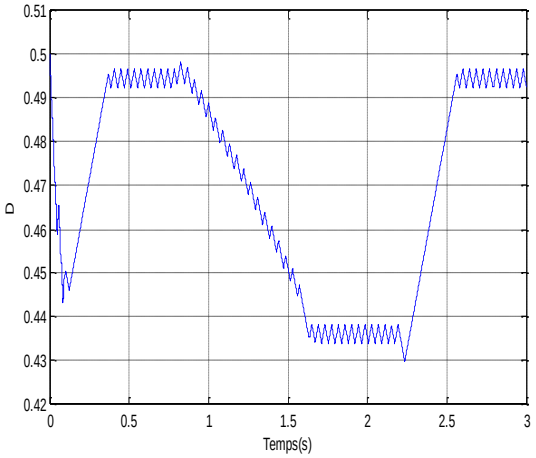
a-Puissance(PV)



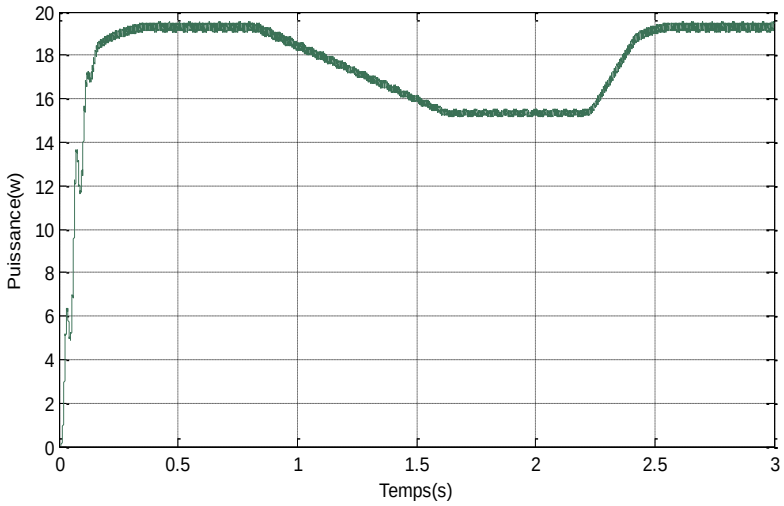
b-Tension(PV)



c-Courant(PV)



d-Rapport cyclique



e-Puissance charge

Figure(III.17): Réponse du contrôle P&O à pas variable pour une variation d'irradiation dans(T=25C°).

III.8.Conclusion

Dans ce chapitre nous avant effectué la simulation de notre system qui est constitué d'un panneau photovoltaïque, un hacheur Boost avec sa commande et une charge résistive pour tester le modèle par deux techniques MPPT P&O classique et P&O à pas variable pour obtenir un bon résultat entre eux.

À travers Le résultat de cette commande MPPT, on remarque que l'ondulation de la méthode P&O à pas variable est bon par rapport l'ondulation de la méthode P&O classique.

Chapitre IV

Réalisation et implémentation de MPPT

Chapitre IV

Réalisation et implémentation de MPPT

IV.1.Introduction

Ce dernier chapitre sera consacré à la réalisation d'un système photovoltaïque. Nous présentons en premier temps le matérielle qui est utilisé dans cette réalisation et l'algorithme des deux méthodes perturbation et observation (classique et amélioré) pour la recherche d'une puissance maximale. Enfin, nous testeront le système PV ainsi que ses composants par plusieurs tests pratique.

IV.2.Système photovoltaïque proposé

La figure (V.1) représente le schéma synoptique du système PV alimente une charge résistive qui aura réalisé. Ce système PV est composé d'un module photovoltaïque ET-M53620et de deux circuits. Le circuit de puissance est composé d'un convertisseur survolteur à base d'un MOSFET et d'une charge résistive. Ainsi pour le circuit de commande, une carte Arduino Uno, un capteur de tension, un capteur de courant ACS712 et leurs alimentations.

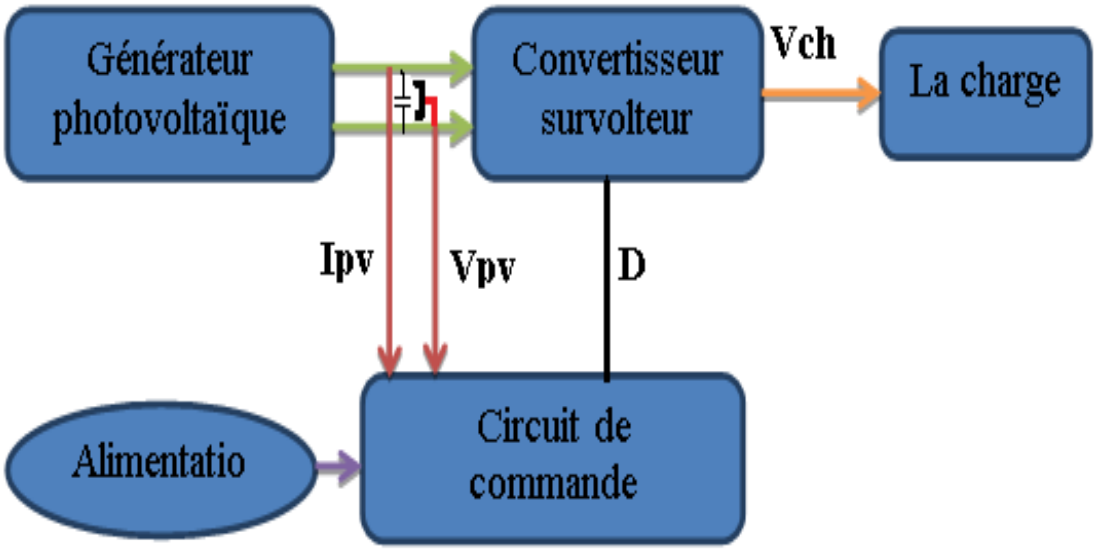


Figure (IV.1) : schéma synoptique du système PV

IV.3.Cahier charge

De notre projet, on va implémenter deux techniques MPPT (P&O simple et P&O à pas variable) sur une carte Arduino Uno pour commander un hacheur Boost qui alimente une charge résistive à l'aide d'un panneau photovoltaïque du 20W.

IV.3.1.Module photovoltaïque

Dans notre réalisation, nous utilisons un module PV du type ET-M53620, Ce module PV est en silicium monocristallin et constitué de 36 cellules PV élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 20 W, un courant de 1.14A sous une tension optimale de 17.82V.

Les caractéristiques électriques de ce module PV sont données dans le chapitre III (tableau III.1)

IV.3.2.Carte Arduino Uno

Comme programmateur de certains microcontrôleurs nous avons vu dans le deuxième chapitre.

IV.3.3.capteur de tension

Comme la tension d'entrée analogique Arduino est à 5V, si la tension d'entrée de tension module de détection ne peut pas être supérieure à la 5Vx5 = 25V (voir ANNEXE B).

IV.3.4.capteur de courant

Le capteur de courant ACS712-5B peut mesurer le courant jusqu'à ± 5A et fournit la sensibilité de sortie de 185 mV/A (a +5V) (voir ANNEXE B).

IV.3.5.Convertisseur survolteur (Boost)

Comme nous avons vu dans le chapitre (II) précédent la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée dans un convertisseur survolteur. Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (transistor Mosfet).

a-Transistor

Le transistor doit être dimensionné pour supporter le courant maximal délivré à la charge. Nous choisissons un MOSFET «IRF840N». Ce MOSFET peut fonctionner avec une tension V_{DSS} jusqu'à 500V, et un courant I_D allant jusqu'à 41A. Il peut aussi fonctionner à une fréquence de 2Khz (voir ANNEXE C).

b-Diode

La diode utilisée doit être rapide et pouvant supporter le courant maximal fourni à la charge, son rôle est d'éviter le retour du courant provenant de la charge. Dans ce travail, nous avons placé une diode de référence «1N5822» (voir ANNEXE C).

c-Bobine

Cet élément est le plus délicat à déterminer. En effet, une inductance trop faible ne permet pas le fonctionnement de la carte de puissance, et une inductance trop forte quant à elle provoquerait d'importantes pertes de puissance par effet Joule. Alors, l'inductance du circuit Boost est calculée pour des ondulations de courant dans l'inductance de 10% et une fréquence minimale de 1Khz (c'est la fréquence de la sortie analogique de l'Arduino PWM) de avec un courant maximal de 4A.

d-Condensateur

Nous plaçons en sortie de condensateur chimique pour filtrer les variations des tensions de sortie. La valeur de capacités calculée en fonction de l'ondulation voulues ainsi que des grandeurs moyennes désirées

e-Optocoupleur

Nous plaçons un optocoupleur pour isolation entre partie commande et partie puissance (voir ANNEXE D).

Tableau (IV.1) : Les composants électriques du convertisseur survolteur

Désignation	Valeur ou Référence	image
Transistor	IRF840N	
Diode	1N5822	
Inductance (Bobine)	2 mH	
Capacité 'S'	470 µF	
Optocoupleur	4N35	

IV.3.6.Résistance rhéostat (la charge)

Le rhéostat est un appareil servant à introduire une résistance variable dans un circuit électrique et permettant ainsi de modifier l'intensité du courant. Figure (IV.2) Il peut être utilisé comme résistance fixe ou comme diviseur de tension.



Figure (IV.2):Résistance rhéostat

IV.4.Réalisation du convertisseur survolteur

La figure (IV.9) représente le schéma du convertisseur survolteur réalisé. les composants électriques sont donnés dans le tableau(IV.2). Les tests faits sur ce convertisseur donnent l'efficacité de ce circuit pour jouer son rôle dans le système PV qu'aura réalisé

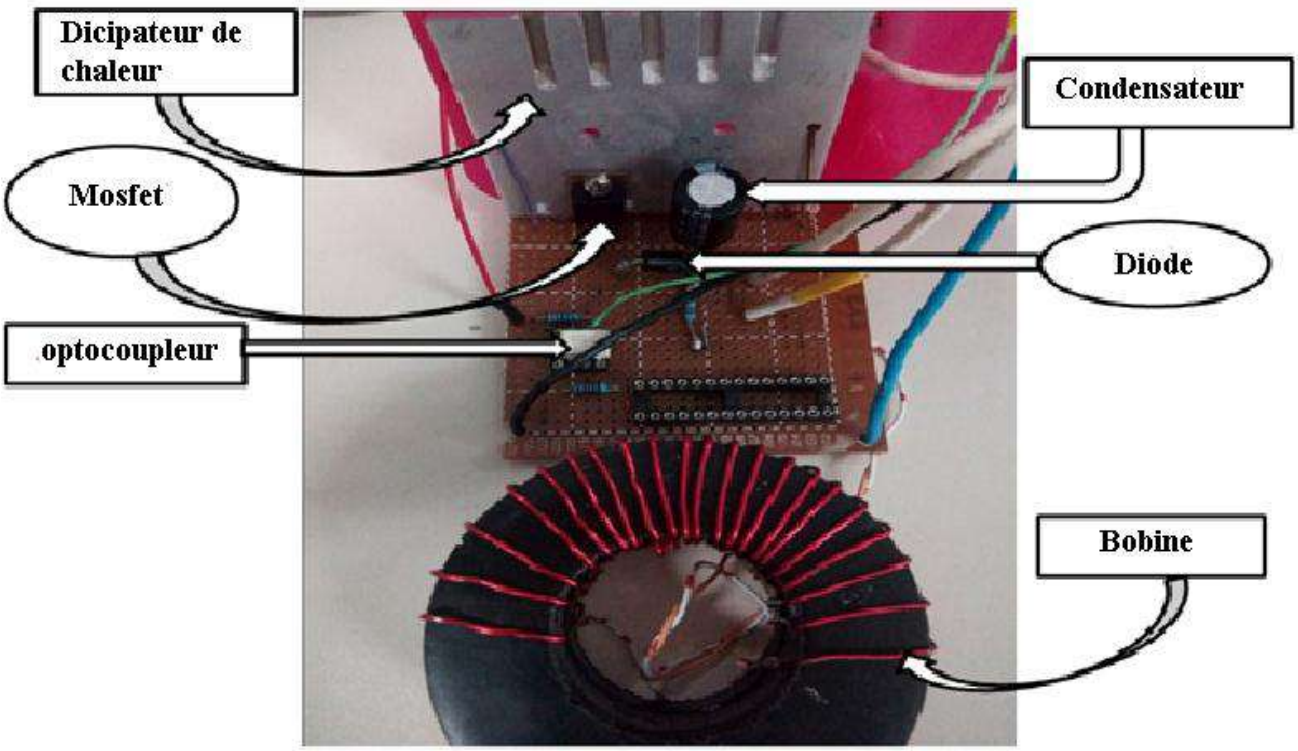
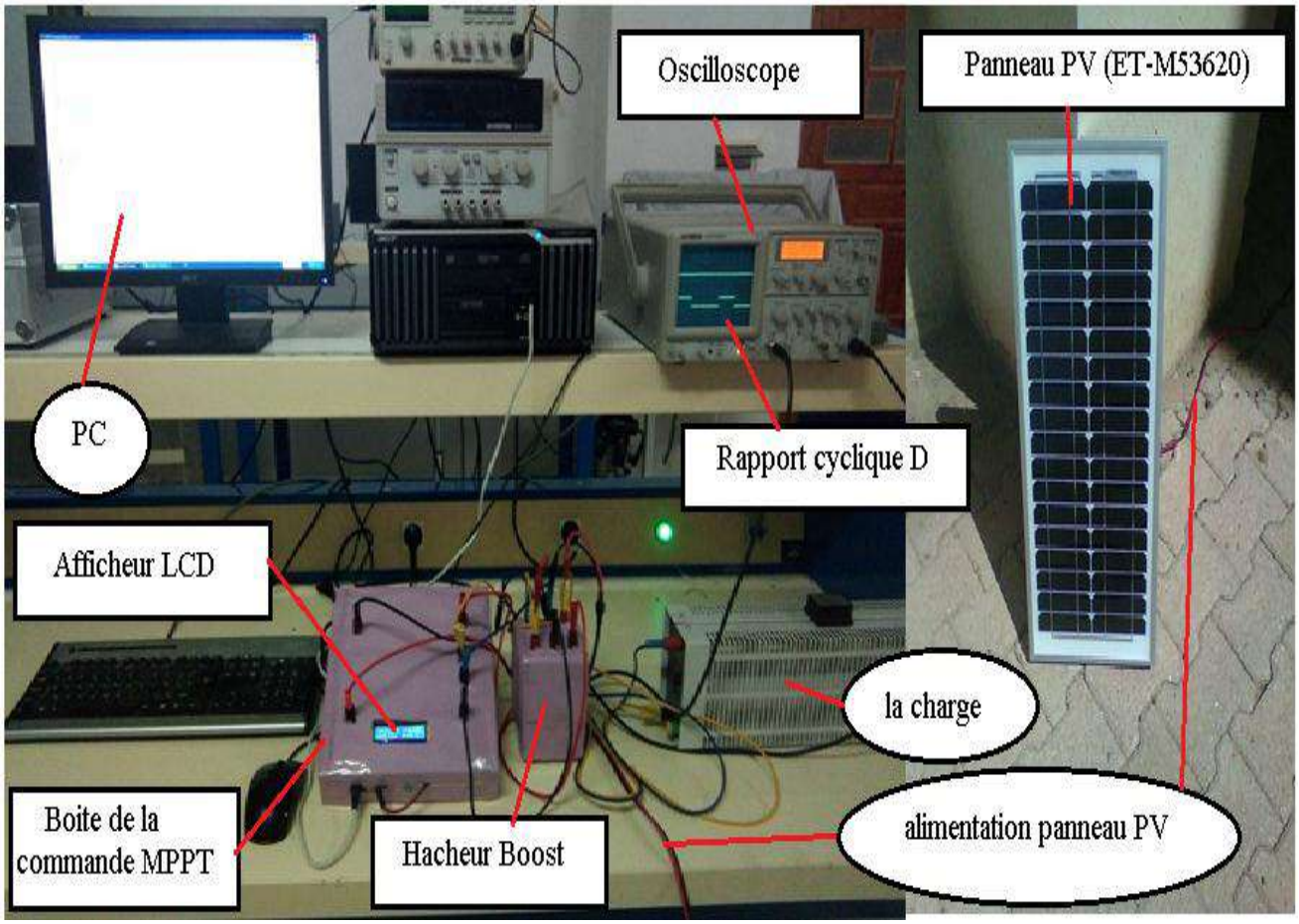


Figure (IV.3): la carte du convertisseur survolteur réalisé (hacheur Boost)



Figure(IV.4) : Protopype expérimental

IV.5. Le programme implemanté dans la carte Arduino Uno

Un langage de programmation est un langage permettant à un être humain d'écrire un ensemble d'instructions (code source) .Voyons plus en détail la structure d'un programme écrit en Arduino Uno

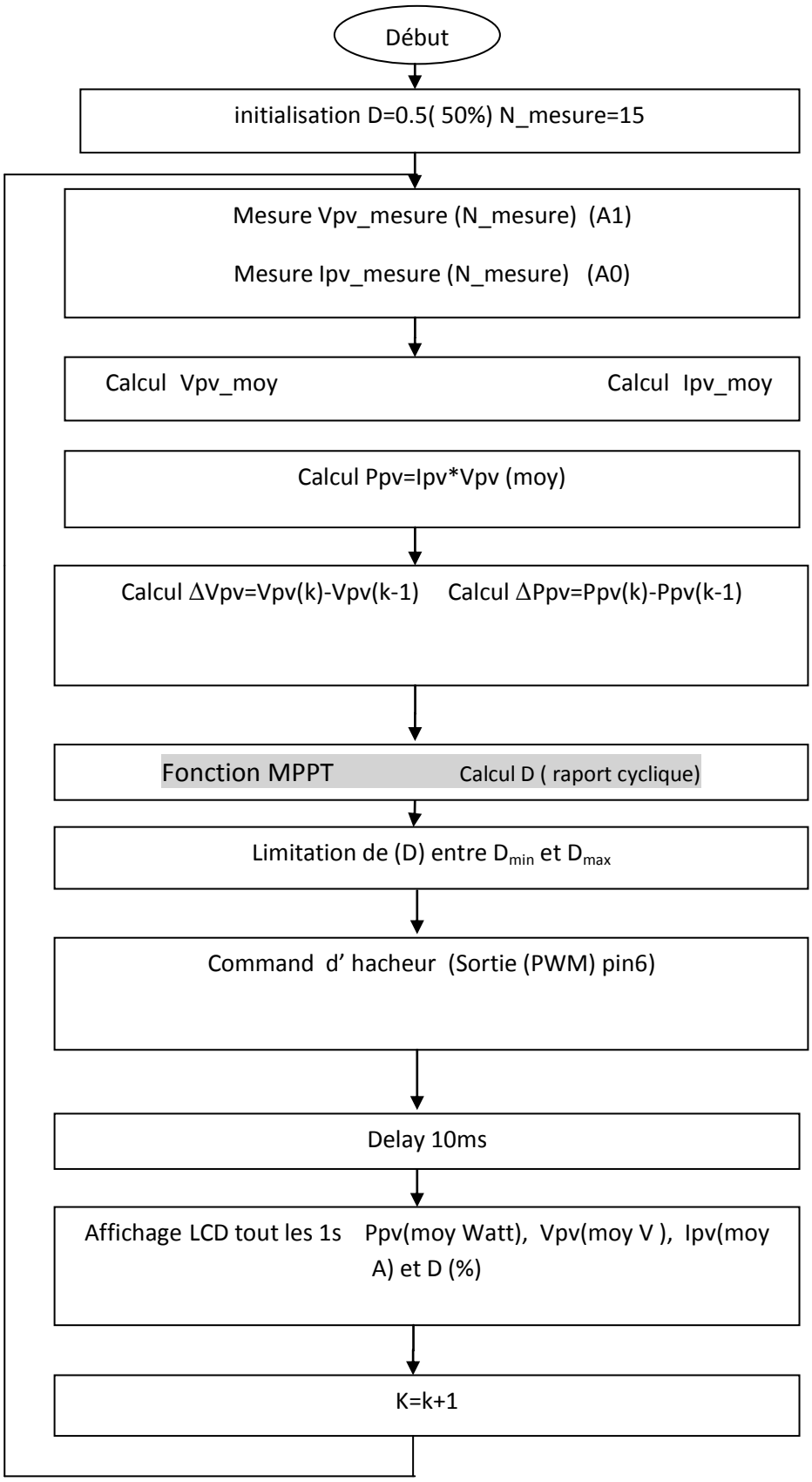


Figure (IV.5) : l'organigramme de P**&**O implémenté dans l'Arduino

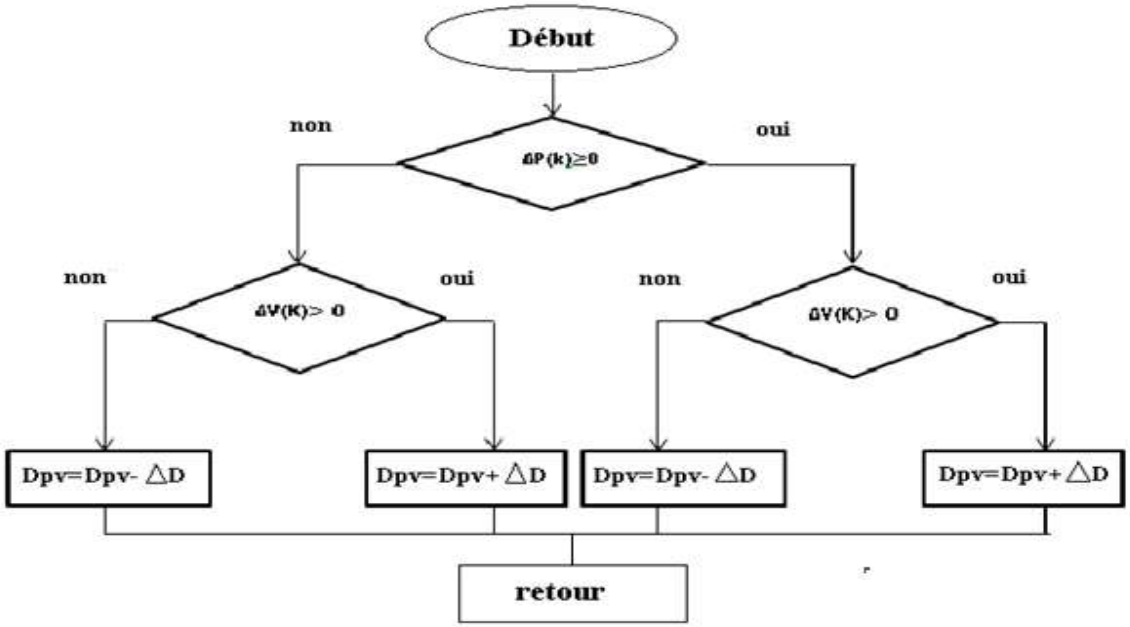


Figure (IV.6) : Organigramme Fonction : P&O classique

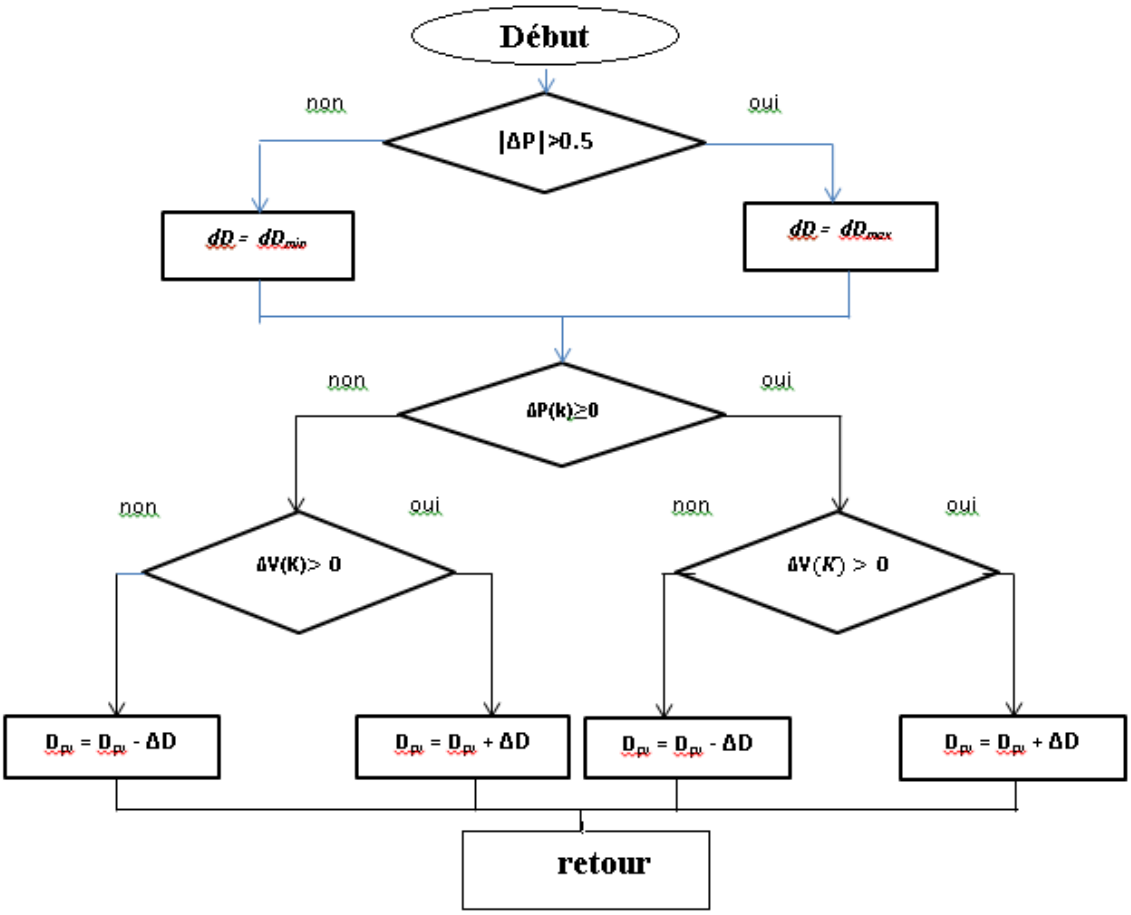
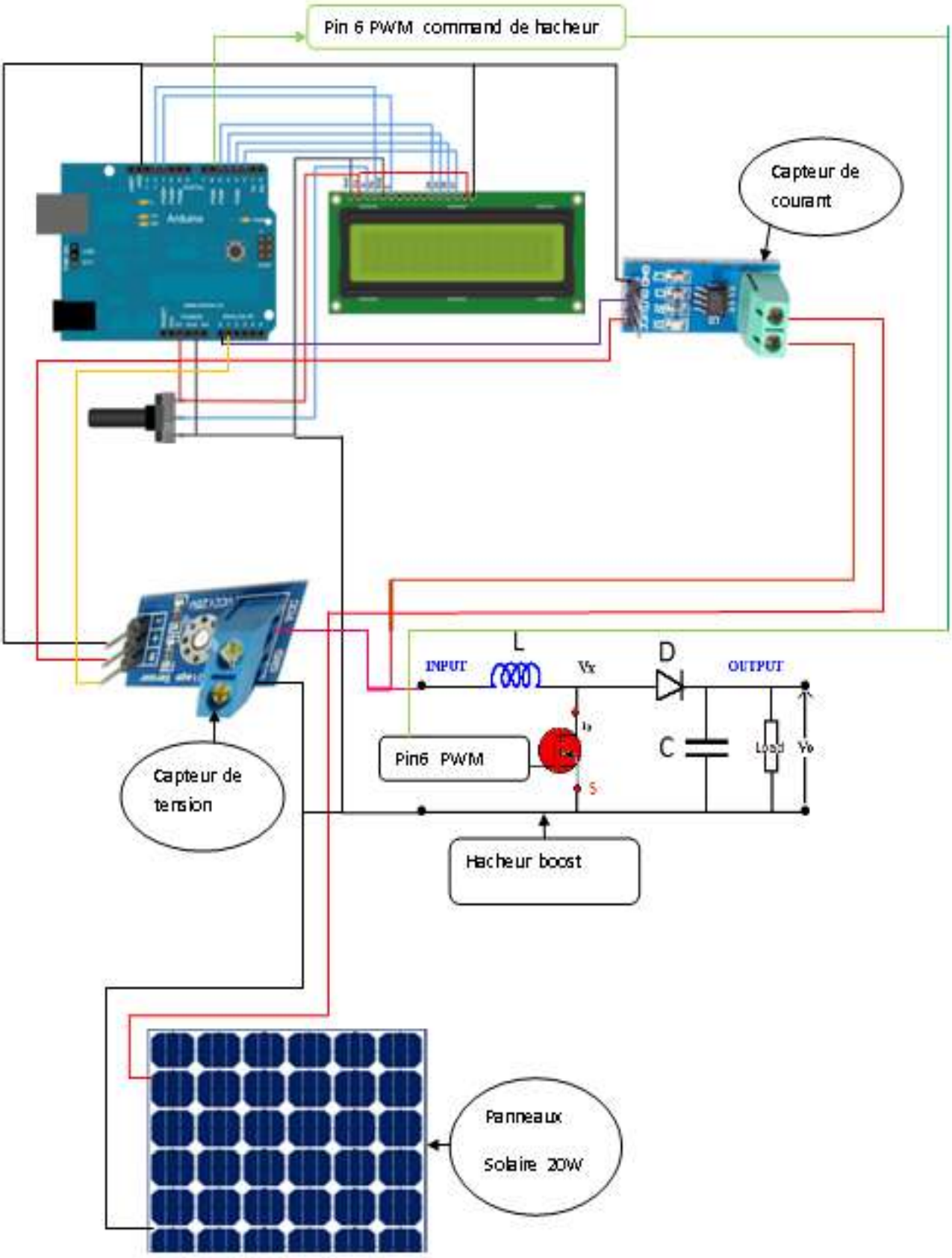


Figure (IV.7) : Organigramme Fonction : P&O à pas variable



Figue (IV.8) : schéma de montage électrique de la réalisation

IV.6.Résultats des tests pratiques et discussions

Dans cette réalisation, nous nous proposons trois tests différents pour deux méthodes (P**&**O classique et P**&**O à pas variable) :

- Test 1 : éclairement stable (rayonnement perpendiculaire sur le panneau pour avoir un maximum d'éclairement).
- Test 2 : variation de l'éclairement lentement par le basculement de panneau solaire.
- Test 3 : un changement brusque instantané de l'éclairement (couvrir du panneau par une plaque).

Remarque :

- la **t**empérature est stable au moment des tests
- les échelles utilisés pour le traçage des graphes des grandeurs sont comme suite : X5 pour le traçage de la tension Vpv et la puissance Ppv, X50 pour le courant Ipv , et X1 pour le rapport cyclique D et le temps choisi entre deux mesure est h=0.01s .

IV.6.1.Méthode P&O classique

a-Éclairement stable

Dans le cas d'un l'éclairement stable les résultats de test du système photovoltaïque commandé par MPPT P&O classique représentent par la figure suivante:

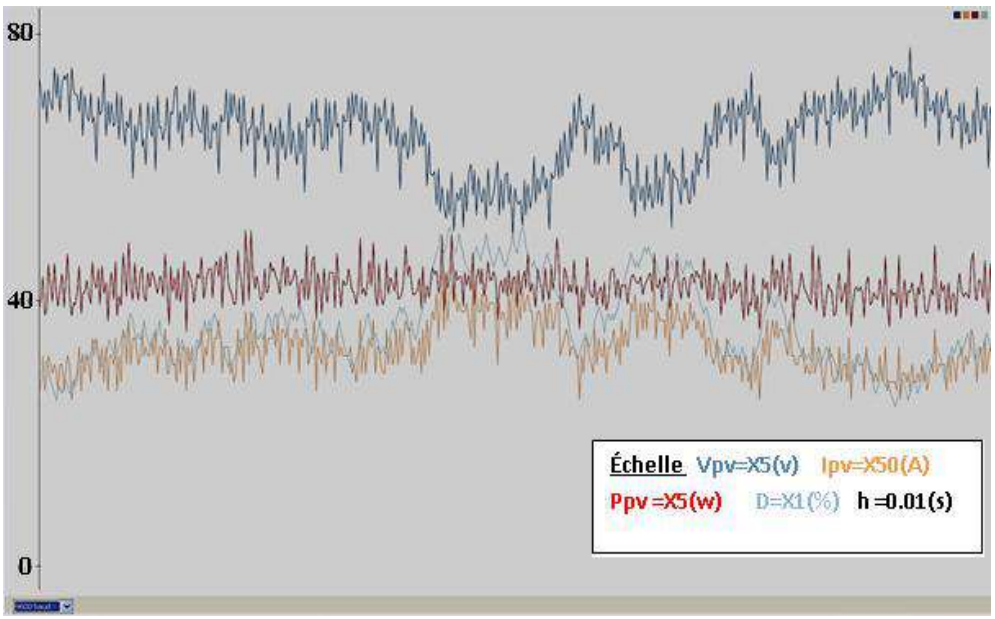
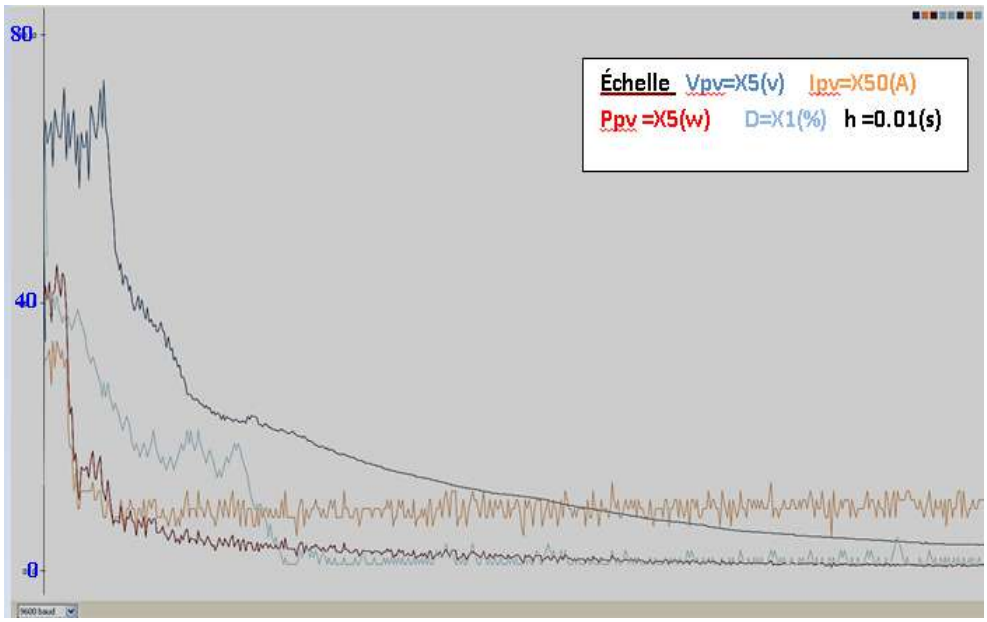


Figure (IV.9) : réponse de l'algorithme P&O classique dans le cas d'un l'éclairement stables

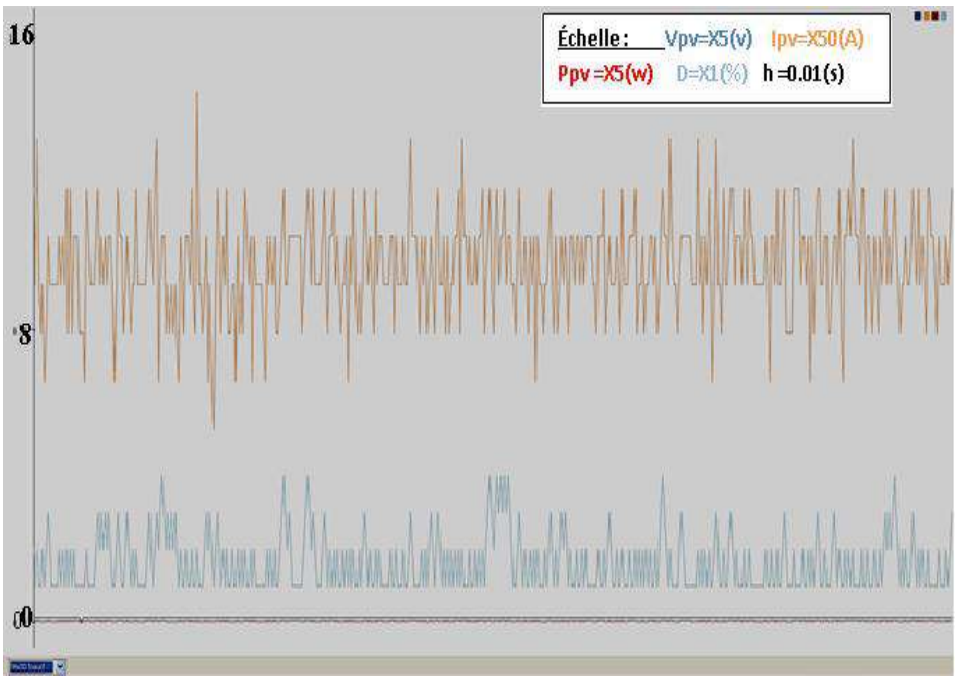
On remarque que la puissance P_{pv}, la tension V_{pv} et le rapport cyclique D sont stables

b-Variation de l'éclairement lentement du basculement le panneau solaire

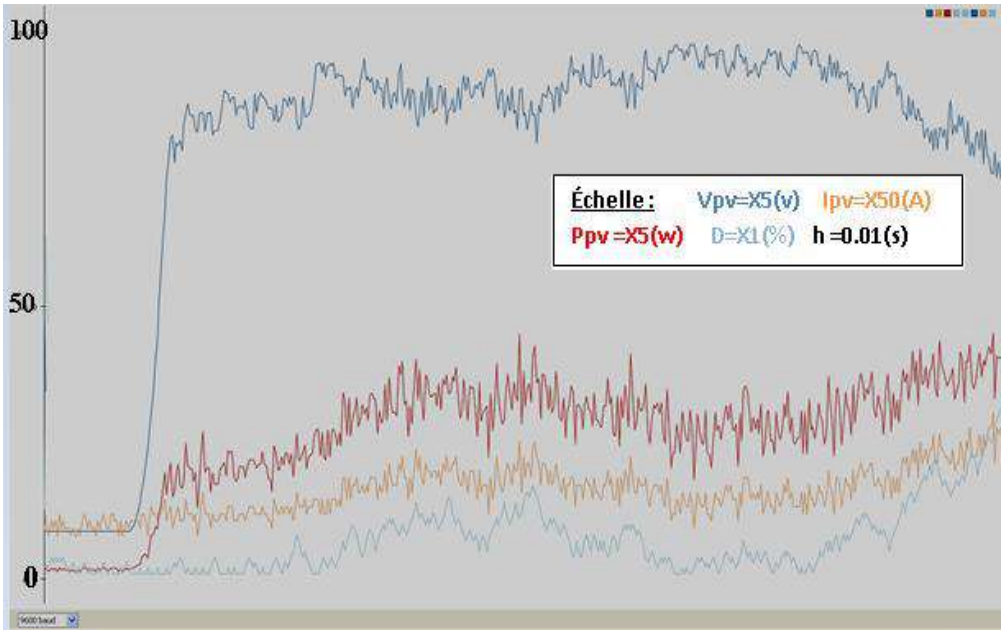
Dans le cas progressivement du panneau photovoltaïque le résultat de tests du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation » (classique) représentent par la figure suivant:



(a)



(b)

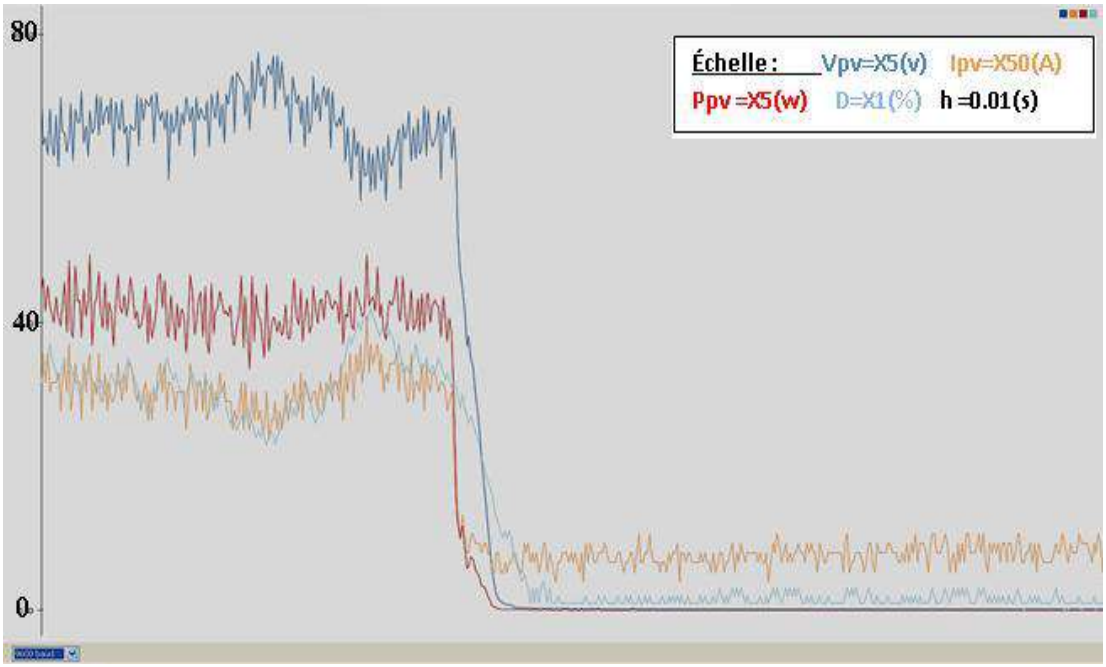


(c)

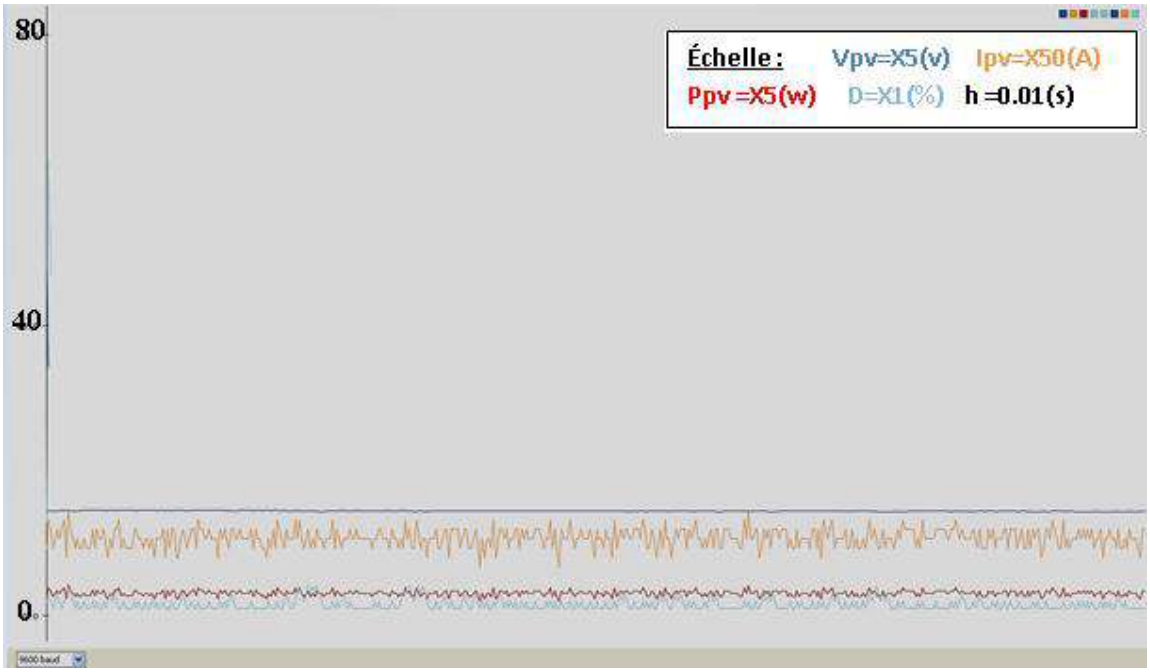
Figure (IV.10) : réponse de l'algorithme P&O classique dans le cas d'un l'éclairement (G) progressivement. (a) : G diminue ; (b) : G ver le ziro ;(c) : G augmente

On remarque que la puissance P_{pv} , tension V_{pv} et le rapport cyclique D diminue lentement.

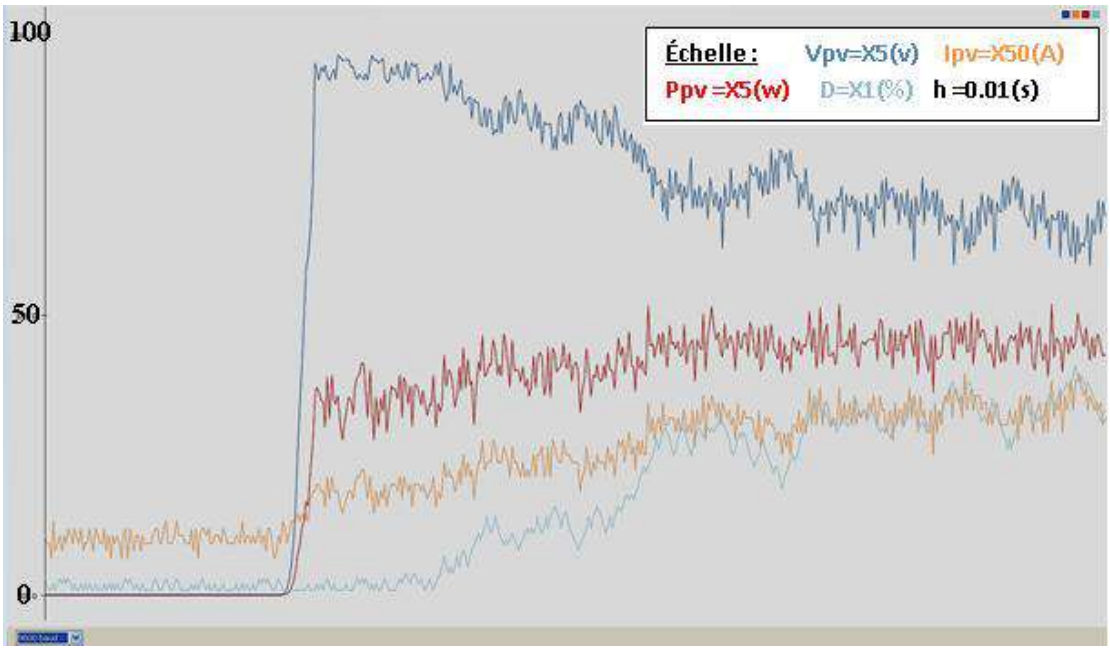
c- pour avoir un changement brusque instantané



(a)



(b)



(c)

Figure (IV.11) : réponse de l'algorithme P&O classique dans le cas un changement brusque instantané. (a) : G diminue ; (b) : G ver le zéro ;(c) : G augmente

On remarque que la tension V_{pv} et la puissance P_{pv} chute brusquement ver le zéro et le rapport cyclique D prend une valeur nulle figure (IV.11)

Le système prend un peu de temps pour que le rapport cyclique D se stabilise à la valeur optimale

IV.6.2.Méthode P&O à pas variable

Nous faisons les mêmes tests que nous avons fait dans la partie de la P&O classique précédente.

a-Éclairement stable

Dans le cas d'un éclairement stable le résultat de tests du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation » (à pas variable) représentent par la figure suivante:

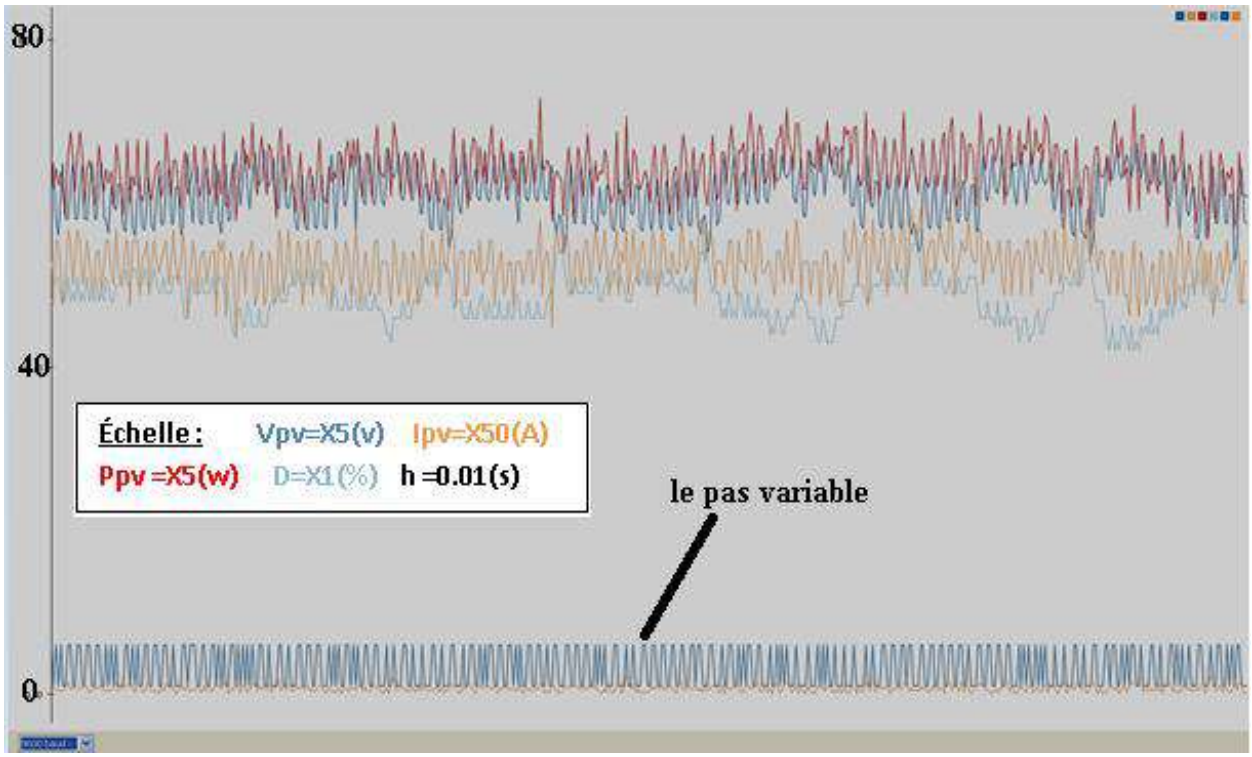
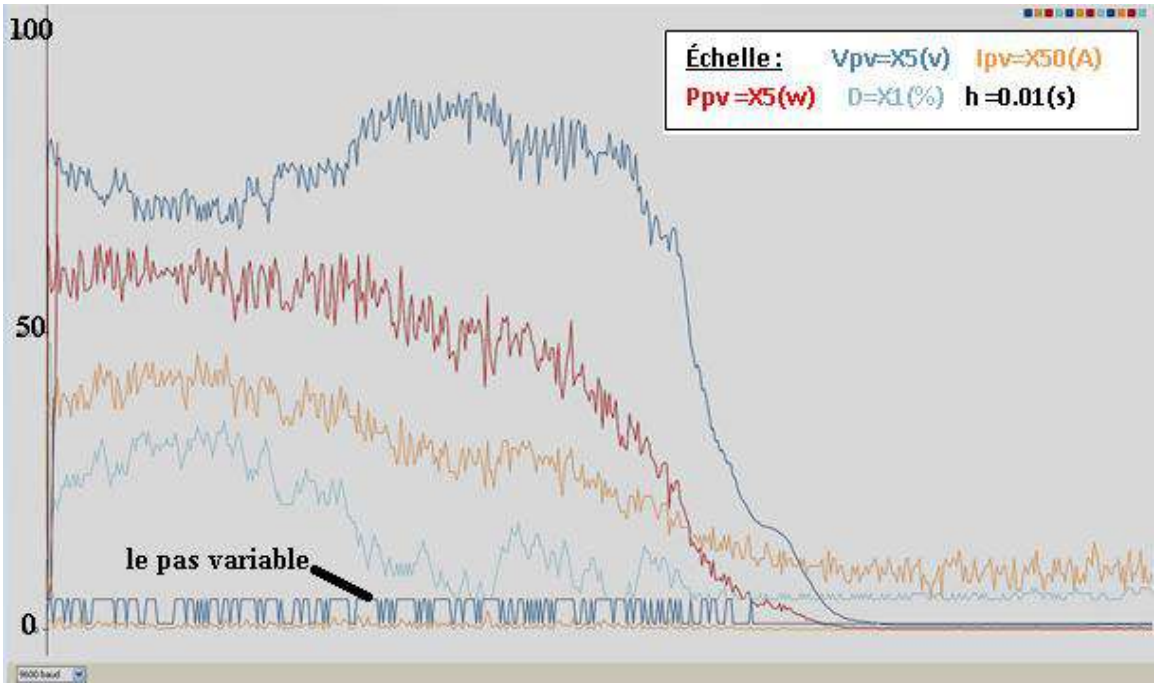
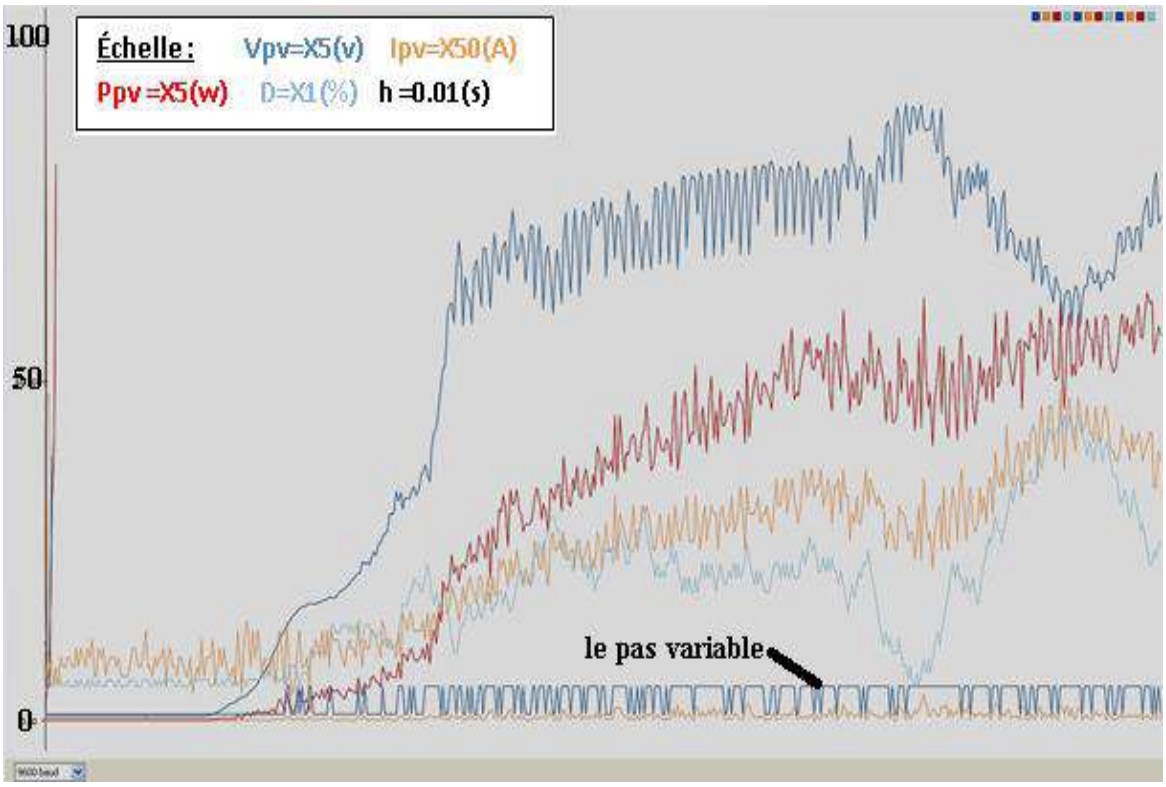


Figure (IV.12) : réponse de l'algorithme P&O a pas variable dans le cas d'un l'éclairement constant

b-Variation de l'éclairement lentement du basculement le panneau solaire



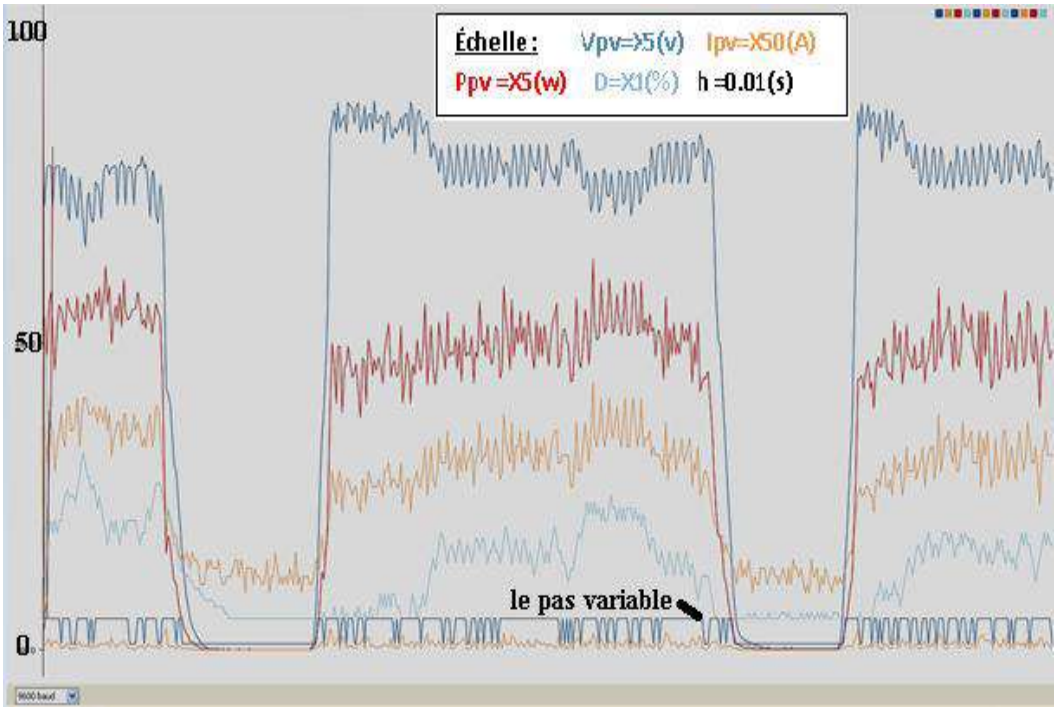
(a)



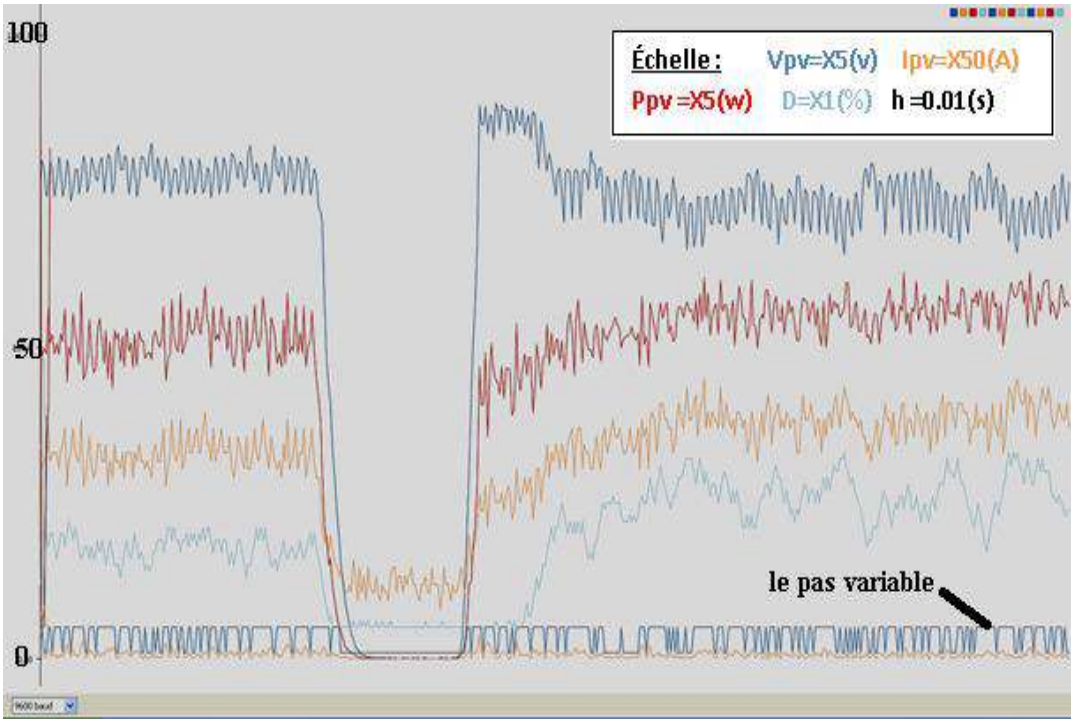
(b)

Figure (IV.13) : réponse de l'algorithme P&O a pas variable dans le cas d'un l'éclairement progressivement

c-pour avoir un changement brusque instantané



(a)



(b)

Figure (IV.14) : réponse de l'algorithme P&O dans le cas d'un l'éclairement stable

Les figures (IV.12), (IV.13) et (IV.14) représentons les résultats pratiques du (tension, courant puissance et rapport cyclique) de notre système.

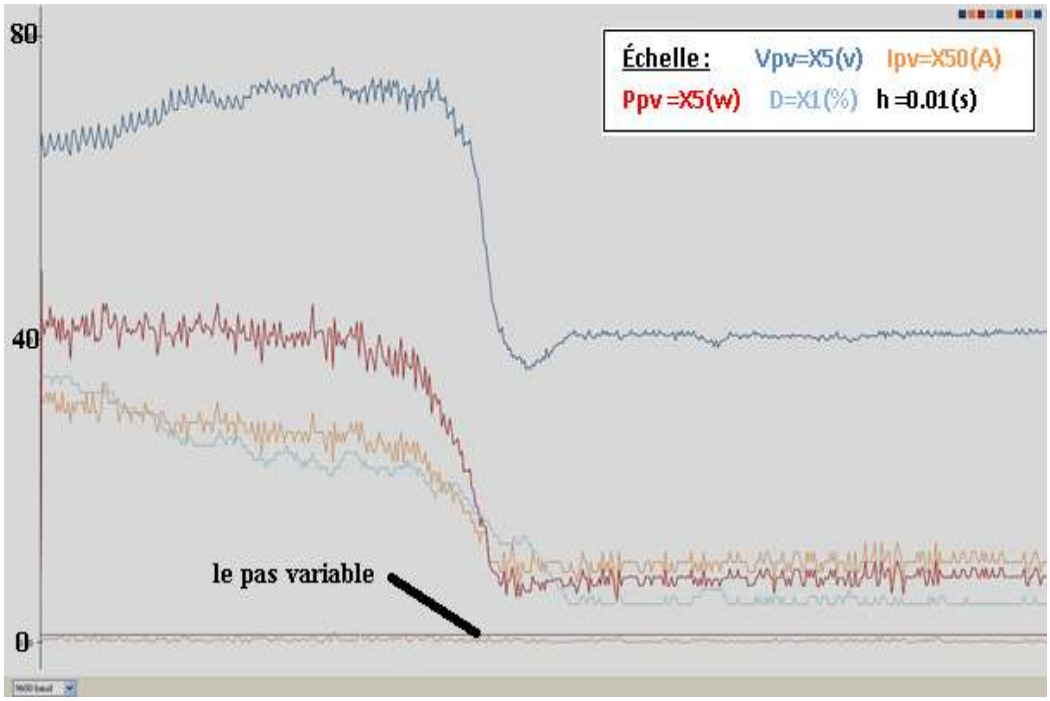


Figure (IV.15) Cas réel pour P&O classique (passage d'un nuage rapide)

IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des tests pratiques sur un panneau solaire à base d'une carte Arduino Uno et on a compare les deux méthodes de perturbation et observation (classique et à pas variable). Le convertisseur peut trainer la puissance maximale à partir du générateur PV pour un ensoleillement variable et une température ambiante, en ajustant le rapport cyclique du convertisseur (hacheur),le point puissance maximal (PPM) est poursuivi par les deux contrôleurs MPPT implémentés lorsque l'ensoleillement varie dont le fonctionnement du système PV est régulé par des commandes MPPT.

Les testes qui on a fait comme suite :

Teste 1 : éclairement stable.

Teste2 : éclairement progressivement.

Teste 3 : absence de l éclairement.

Il y a une différence entre les deux méthodes MPPT implémentés Nous avons conclu L'ajustement inverse entre le rapport cyclique et la tension est convenablement flexible entre le rapport cyclique et la puissance. Le convertisseur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV. Ces derniers montrent un fonctionnement Satisfaisant malgré les mauvais temps et les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et ceux au niveau de la charge.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'analyse d'une étude et réalisation d'un système PV adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV à base d'une carte Arduino Uno.

Nous avons étudié le générateur PV pour différentes puissances générées (cellules, modules et champs) et la modélisation des modules PV ainsi ses paramètres électriques.

Nous avons fait une étude de convertisseurs DC-DC type Boost qu'est utilisé dans notre réalisation. Ainsi, nous avons présenté la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur PV est maximale. Nous avons aussi étudié deux commandes MPPT Perturbation et Observation classique et un autre P&O améliorée à pas variable. Ensuite, nous avons donné une généralité sur la carte Arduino Uno utilisée pour commander les systèmes PV.

Puis on a effectué une simulation sous MATLAB du système PV d'après la commande MPPT avec deux technique (classique et à pas variable).

Finalement, nous avons fait une réalisation du système PV à base d'une carte Arduino Uno. D'après les résultats obtenus des tests pratiques, nous remarquons que la technique P&O à pas variable donne un bon résultat par apport la technique P&O classique.

Comme perspective à ce travail nous proposons de développer la réalisation pour des Différents modules PV.

- Utilisation du capteur de tension, le capteur de courant, le convertisseur survolteur, la carte Arduino Uno avec la méthode qui nous avant utiliser et autre méthode de MPPT
- Utilisation du capteur de tension, le capteur de courant, le convertisseur BUK, BOOST et BOOST -BUK, la carte Arduino Uno avec la méthode de MPPT P&O(classique et a pas variable).

Bibliographie

Bibliographie

[1] Ahmed azi Alaeddine ,« Contribution au développement d'un outil d'aide au diagnostic de performances des 'mppt' dans la chaine de conversion photovoltaïque» , Mémoire magister, Université de M'sila , 2014

[2] Sedrati youcef , Nouar hatem , «Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque » , Mémoire Master , Université Kasdi Merbah-Ouargla 2016.

[3] Ahmad Zbeeb ,«A new microcontrôleur-based Mppt Algorithm for photovoltaïque applications », Mémoire de magister , Université de Concordia , Montréal, Québec, Canada , Jun 2009.

[4] Morsli Abdelkader ,«Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des super condensateurs », Mémoire de magister , Ecole nationale polytechnique 10 , Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger , 2010.

[5] Dariga Meekhun ,«Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique» , Mémoire de doctorat , Université de Toulouse .

[6] Mohamed Lakhdar Louazene ,«Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes –application zone de Ouargla », Mémoire de doctorat , Université el hadj Lakhdar –Batna , 2015.

[7] Stéphane Vighetti ,«Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion», Mémoire de doctorat, Université de Grenoble, le 24 Septembre 2010

[8] Bouzid Kheir Eddine ,Latreche Soufiane ,«Etude et réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte arduino uno» , Mémoire master professionnelle , Université Kasdi Merbah Ouargla , 2016 .

[9] Bendjamâa Ibrahim,« Modélisation et commande d'un systèmede stockage photovoltaïque», mémoire de magister, Universite Abou-BakrBelkaid –Tlemcen, 2012.

[10] Hadj Allouache ,«Caractérisation d'ombrage d'un système photovoltaïque à bus continu hvdc», , Mémoire de doctorat , Université Mohamed Boudiaf , 2017.

[11] M. Slama Fateh ,«Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique» , Mémoire de magister , Université Ferhat Abbas, Setif-Ufas(Algerie) ,

[12] Melle Debili Narimene ,«Etude et optimisation en environnement matlab/simulink d'un système de pompage photovoltaïque» , Mémoire de magister , Université Constantine , 2015 .

[13] Bedida Tarek ,Ben Amar Radhia , «Etude d'un système d'énergie renouvelable avec système de stockage» , Mémoire master , Université d'El-Oued , 23-24Juin 2014.

[14] Issam HOUSSAMO , «Contribution à l'étude théorique, à la modélisation et à la mise en œuvre d'un système multi source appartenant à un micro-réseau électrique Considérations sur la qualité de l'énergie » , Mémoire de Doctorat , Université de Technologie de Compiègne , 21 Septembre 2012.

[15] F. Rakotoma nanandro. «*Study of Photovoltaic System*», Memoir de Master. Graduat école of The Ohio State Université, 2011.

[16] *OUDJOUADJ Sofiane, BENNINI Mohamed Amine,* «étude de la poursuite du point de puissance maximale (mppt) d'un générateur photovoltaïque base sur l'intelligence artificielle » , mémoire de master ,UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA , 2015.

Annex

Annexe A

ET Module

ET-M53605 ET-M53610 ET-M53620 ET-M53640

SPECIFICATIONS

Model type	ET-M53605	ET-M53610	ET-M53620	ET-M53640
Peak power(Pmax)	5W	10W	20W	40W
Weight	1.2kg	1.7kg	2.7kg	4.6kg
Dimensions	401×176×34mm	383×299×34mm	662×299×34mm	645×542×25mm
Maximum power voltage (Vmp)	17.82V			
Maximum power current (Imp)	0.285A	0.57A	1.14A	2.27A
Open circuit voltage (Voc)	21.96V			
Short circuit current (Isc)	0.315A	0.63A	1.27A	2.54A
Maximum system voltage	750V			
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	0.058 %/℃			
Temp. Coeff. of Voc (TK Voc)	-0.367 %/℃			
Temp. Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.485 %/℃			
Normal Operating Cell Temperature	44.4 ℃			

Note: the specifications are obtained under the Standard Test Conditions (STCs): 1000 W/m2 solar irradiance, 1.5 Air Mass, and cell temperature of 25℃.

Dimensionnement convertisseur boost

$$\begin{cases} I_l = I_{pv} - C_1 \dfrac{dV_{pv}}{dt} \\ I_s = (1-D) I_l - C_2 \dfrac{dV_s(t)}{dt} \\ V_{pv}(t) = L \dfrac{dI_l}{dt} + (1-D) v_s \end{cases}$$

$P_{pv} = 20w \quad V_{pv} = 17.82v \quad I_{pv} = I_l = 1.14A \quad V_s = 34v \quad P_s = 20w$

$\Delta V_s = 10\% V_s = 3.4v$

$\Delta I_l = 10\% I_l = 0.14A$

F=1000H_z

a)Résistance de charge :

$R_s = \frac{V_s{}^2}{P_s} = \frac{34^2}{20} = 57.8\Omega$

b) courant de sortie :

$I_s = \frac{P_s}{V_s} = 0.58A$

c) rapport cyclique :

$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} = 0.475$

d) valeur de l'inductance :

$L \geq \frac{D * V_{pv}}{V_s} = 0.074$ H

e) valeur de condensateur :

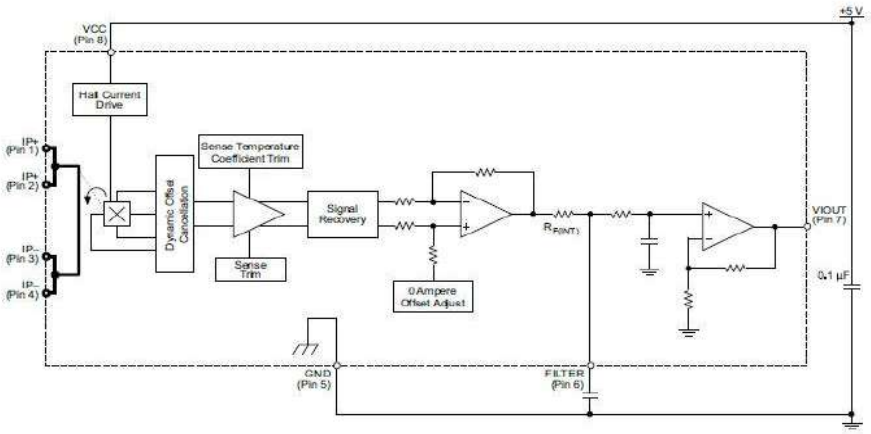
$C_{in} \geq \frac{I_{ch} * D^2}{0.02(1-D) F_s V_{np}} \geq 699.05\ \mu f$

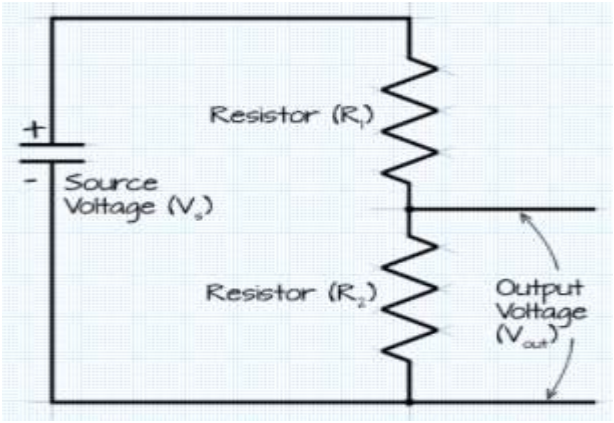
$C_{out} \geq \frac{V_{ch} * D}{F_S * \Delta V_{ch} * R_{ch}} \geq 821{,}79 \mu f$

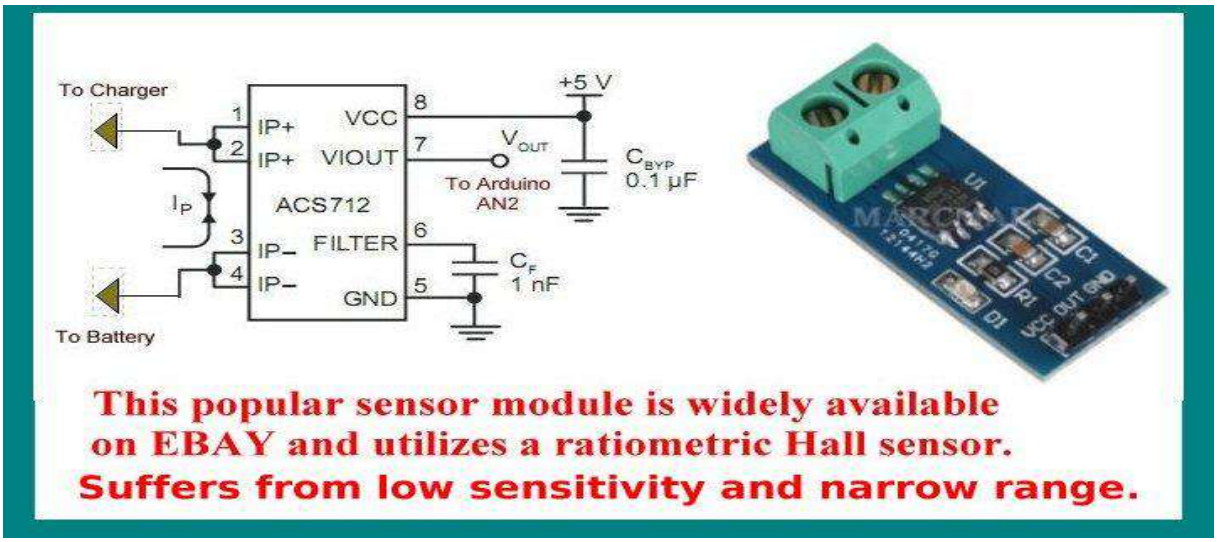
Annex B

ACS712 — *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

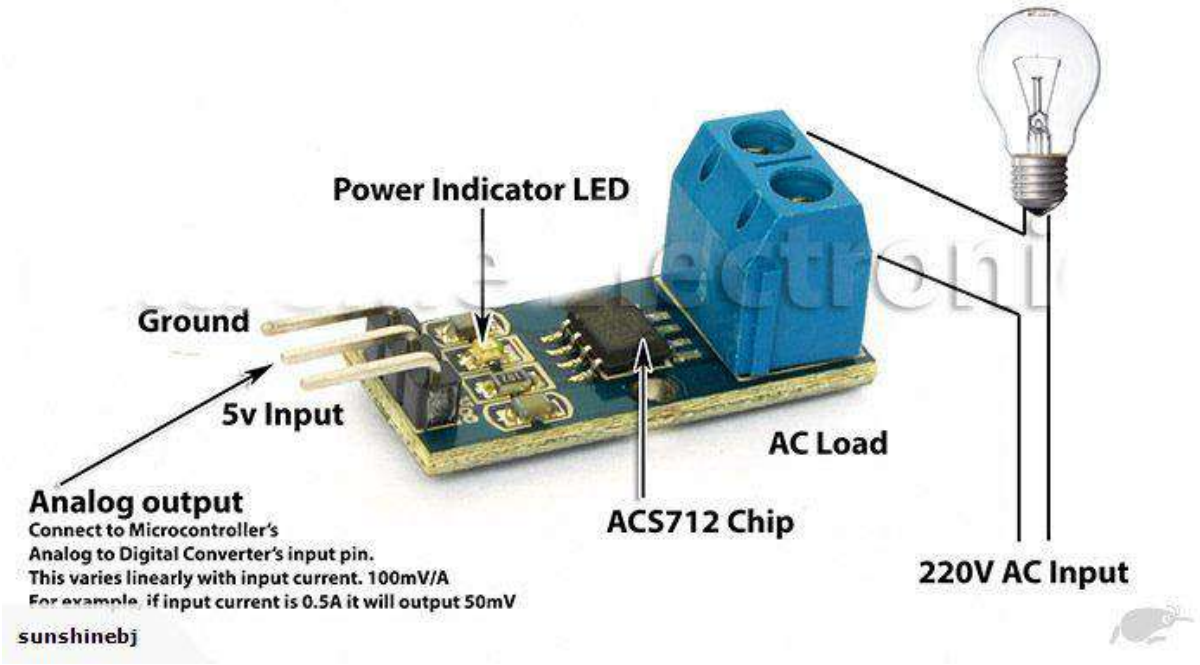
Functional Block Diagram





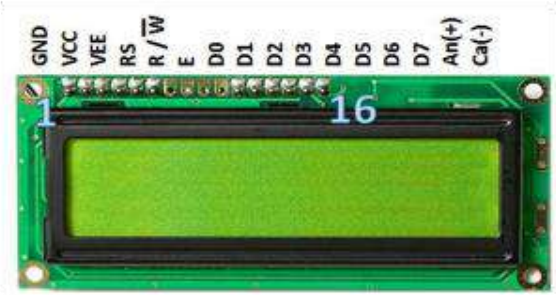


ACS712 Current Sensor Module 20Amps



Annex c

HD44780 – 16x2 LCD
Pin Description



PIN	Description	
GND	GND connection	
VCC	V_{cc} = 3.3 – 5 V	
VEE	LCD Character Dimmer	
RS	Control Signals	Selects between writing a command or data
R / W		Read or Write operation. This pin is usually wired to GND
E		Falling edge will trigger an operation
D0	Data Lines	Least significant bites, usually not connected since LCD is used in 4-bit operation.
D1		
D2		
D3		
D4		Most significant bites. Data and commands are written to these pins 1 nibble at a time, starting with the most significant nibble (MSN).
D5		
D6		
D7		
An(+)	Power supply for the back light, V_{cc}	
Ca(-)	GND connection for the backlight, GND	

1N5400 THRU 1N5408

3.0 AMP SILICON RECTIFIERS



FEATURES

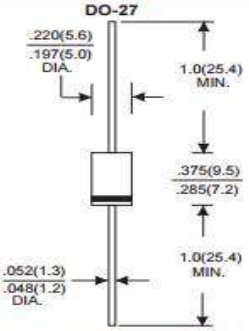
* Low forward voltage drop
* High current capability
* High reliability
* High surge current capability

MECHANICAL DATA

* Case: Molded plastic
* Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant
* Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, method 208 guranteed
* Polarity: Color band denotes cathode end
* Mounting position: Any
* Weight: 1.10 grams

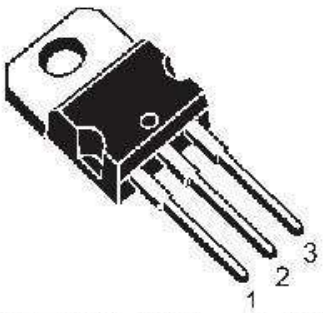
VOLTAGE RANGE
50 to 1000 Volts
CURRENT
3.0 Amperes

DO-27



Dimensions in inches and (millimeters)

N - CHANNEL

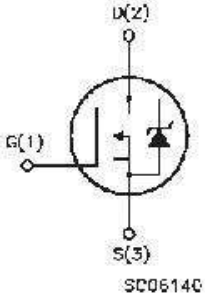


PowerMESH™ MOSFET

TO-220

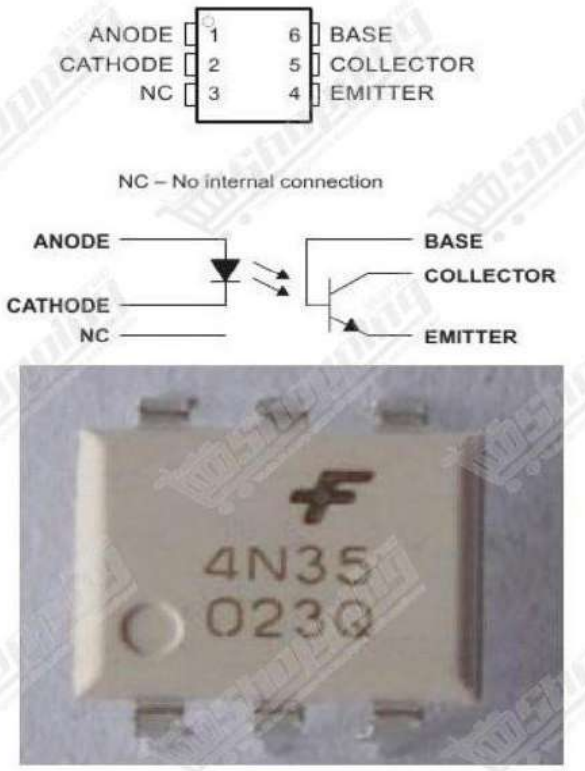
TYPE	V_{DSS}	$R_{DS(on)}$	I_D
IRF840	500 V	< 0.85 Ω	8 A

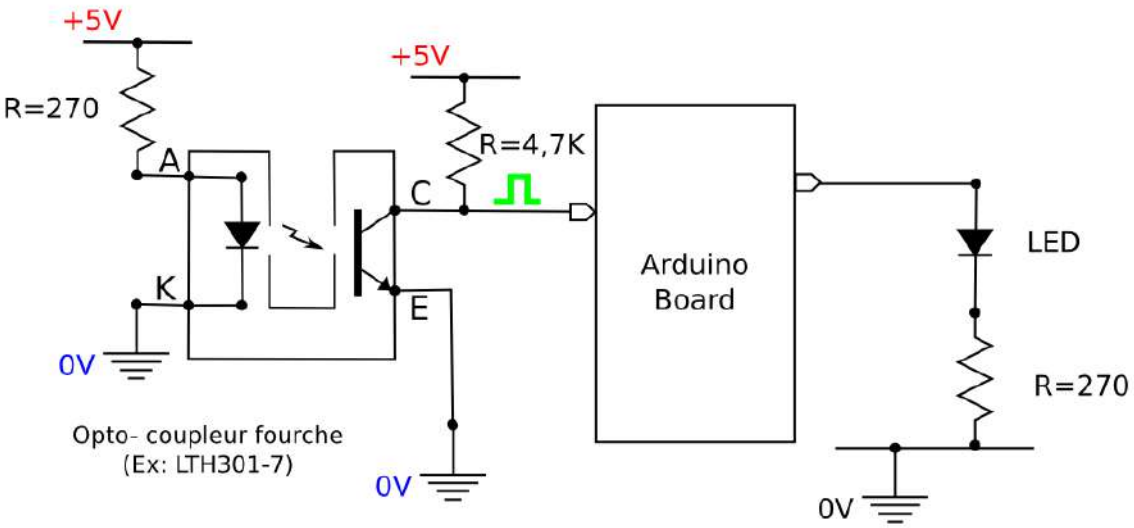
INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



SC06140

Annex D


ANODE 1
CATHODE 2
NC 3
6 BASE
5 COLLECTOR
4 EMITTER
NC – No internal connection
ANODE
CATHODE
NC
BASE
COLLECTOR
EMITTER
4N35
023Q


+5V
R=270
A
K
0V
+5V
R=4,7K
C
E
0V
Opto- coupleur fourche
(Ex: LTH301-7)
Arduino
Board
LED
R=270
0V