

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electronique

Mémoire du Magister en électronique

Option : Electricité Solaire

Présenté par

AOUCHICHE NEDJMA

Ingénieur en électronique, Université des sciences et technologies HOUARI BOUMEDIENNE

Thème

MISE AU POINT D'UN BANC D'ESSAI PHOTOVOLTAÏQUE

Jury

Pr. M. HADDADI	Professeur (ENP)	Président
Dr. M.S.AIT CHEIKH	Maître de conférences (ENP)	Rapporteur
Pr. C.LARBES	Professeur (ENP)	Examineur
Dr. A.MALEK	Maître de recherche (CDER)	Examineur

Septembre 2010

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى إنجاز جهاز لتجارب الكهروضوئية . هذا الأخير يسمح لنا بدراسة مكونات السلسلة الكهروضوئية. نوع المحول المستعمل في النظام الكهروضوئي هو محول رافع للتوتر الكهربائي و الطريقة المستخدمة في البحث عن نقطة الإستطاعة القصوى هي طريقة التوتر الكهربائي العكسي مع استعمال الخلية الكهروضوئية القائدة . جزء من هذا العمل مخصص للدراسة النظرية لمكونات النظام الكهروضوئي وهو يشمل على نقطتين : الألواح الكهروضوئية ، المحول المستمر بطارية معالج .

الجزء الثاني مخصص للتجربة الافتراضية لنظام الكهروضوئي تحت مختلف التأثيرات المناخية ، وإنجاز جهاز للتجارب الكهروضوئية الذي تتضمن محول مستمر رافع للتوتر الكهربائي ، بطاقة تحكم ، وبطاقة قياس . في الأخير نقوم بمقارنة نتائج التجارب مع النتائج النظرية .

المفاتيح: الألواح الكهروضوئية، نظام متابعة نقطة الإستطاعة القصوى، المحول مستمر- مستمر، المعالج المدمج البطاريات.

Résumé:

Ce travail a pour but de réaliser un banc d'essai photovoltaïque. Ce dernier nous permet d'étudier le comportement des composants de la chaîne photovoltaïque. Le type de convertisseur, utilisé dans le système, est un hacheur élévateur et la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est la méthode de contre réaction de tension utilisant une cellule pilote.

Une partie de ce travail consiste à faire une étude théorique des composants constituant le système photovoltaïque global à savoir: le panneau solaire, le hacheur, la batterie et le régulateur MPPT. La seconde étape est consacrée à la simulation du système photovoltaïque, sous différentes conditions atmosphériques, et à la réalisation du banc d'essai photovoltaïque qui comprend: le convertisseur Boost, la carte de commande MPPT et la carte de mesure (shunt). finalement, une comparaison est faite entre les résultats de la simulation et ceux obtenus lors des tests pratiques.

Mots clés: Panneaux Photovoltaïques, commande MPPT, convertisseur élévateur, cellule pilote.

Abstract:

The target of this work is to realize a photovoltaic test bed. This last allows us to study the behaviour of photovoltaic chain components. The type of converter used in the system is a boost. To track the maximum power point, the method chosen is based on the voltage counter reaction which uses a pilot cell.

The first part of this work consists of studying the photovoltaic system components which are: the photovoltaic panel, the converter, the battery and the MPPT controller.

This study enables us to simulate the photovoltaic system under different atmospheric conditions and to realize a test bed consisting of: the Boost converter, the MPPT controller card and a measuring card (shunt). finally a comparison is done between the theoretical and practical

Key words: Photovoltaic panels, MPPT Controller, Boost converter, pilot cell.

INTRODUCTION GÉNÉRALE	01
CHAPITRE 1 : SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	
1.1. Le générateur Photovoltaïque	03
1.2. Champ photovoltaïque	03
1.2.1. L'effet photovoltaïque	04
1.2.2. Le rayonnement solaire	04
1.2.3. La cellule photovoltaïque	05
1.2.3.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	07
1.2.3.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	08
1.2.3.3. Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque	08
1.2.4. Le module photovoltaïque	11
1.2.4.1. Propriétés	12
1.2.4.2. Circuit équivalent et modèle mathématique d'un panneau PV	13
1.2.4.3. Comportement en température et sous divers éclairagements homogènes ..	13
1.2.4.4. La protection des cellules et du module	14
1.3. Les batteries d'accumulateurs	15
1.3.1. La nécessité du stockage	16
1.3.2. Le rôle d'une batterie	16
1.4. Les régulateurs	16
1.4.1. La nécessité d'un régulateur	16
1.4.2. Le principe de fonctionnement d'un régulateur	17
1.4.3. Le rôle d'un régulateur	17
1.4.2. Les types de régulateurs	18
1.5. Convertisseur DC/DC	20
1.5.1. Convertisseur abaisseur (Buck)	21
1.5.1.1. Modèle du circuit équivalent	21
1.5.1.2. Approximation des petites ondulations	22
1.5.1.3. Etude du régime continu	23
1.5.1.4. Le rapport de conversion	24
1.5.2 Le convertisseur élévateur (Boost)	25
1.5.2.1. Modèle équivalent du convertisseur Boost	25
1.5.2.2. Rapport de conversion	27
1.5.3. Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost)	28

1.5.3.1. Modèle équivalent du convertisseur	28
1.5.3.2. Rapport de conversion.....	29

CHAPITRE 2 : RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

2.1. Introduction.....	31
2.2. Méthodes avec contre réaction de tension.....	31
2.2.1. Méthode à tension de référence fixe.....	32
2.2.2. Contre réaction de la tension $V_{ref} = V_{oc}$	33
2.2.3. Méthode MPPT avec cellule pilote.....	35
2.3. Méthodes à contre réaction de courant.....	36
2.3.1. Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit I_{sc}	36
2.3.2. Méthode à maximisation du courant de sortie.....	37
2.4. Méthodes avec contre réaction de puissance.....	38
2.4.1. Méthode de perturbation et observation (P&O)	38
2.4.2. Méthode de perturbation et observation (P&O) améliorée.....	41
2.4.3. La méthode par accroissement de conductance (IncCond)	42
2.5. Conclusion.....	45

CHAPITRE 3 : SIMULATION ET EVALUATION DES MÉTHODES MPPT

3.1. Introduction :	46
3.2. Modélisation sous MATLAB-SIMULINK.....	47
3.2.1. Modélisation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB.	47
3.2.2. Modélisation d'un convertisseur Boost sous MATLAB.....	48
3.3. Simulation du système global et interprétation des résultats	48
3.3.1 Méthode de contre réaction de tension avec la cellule pilote.....	50
3.3.1.1 Simulation sous un environnement stable	50
3.3.1.2 Changement linéaire lent de l'ensoleillement E.....	51
3.3.1.3 Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E.....	52
3.3.1.4 Changement de la température	53
3.3.2. Méthode d'incrément de la conductance.....	54
3.3.2.1. Simulation sous un environnement stable.....	54
3.3.2.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E.....	55
3.3.2.3. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E.....	56
3.3.2.4. Changement de la température	57

Sommaire

3.3.3. Méthode de perturbation et observation P&O.....	58
3.3.3.1. Simulation sous un environnement stable.....	58
3.3.3.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E.....	59
3.3.3.3. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E.....	60
3.3.3.4. Changement de la température	61
3.3.4. Méthode de perturbation et observation P&O améliorée.....	62
3.3.4.1. Simulation sous un environnement stable.....	62
3.3.4.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E.....	63
3.3.4.3. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E.....	64
3.3.4.4. Changement de la température	65
3.4. Comparaison des méthodes testées.....	66
3.4.1. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E.....	66
3.4.2. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E.....	67
3.4.3. Changement de la température	68
3.5. Conclusion.....	69

CHAPITRE 4 : REALISATION DU BANC D'ESSAI ET ÉVALUATIONS DES RESULTATS

4.1. Introduction.....	70
4.2. Principe de fonctionnement.....	70
4.3. Réalisation.....	71
4.3.1. La réalisation du convertisseur Boost.....	72
4.3.1.1. Alimentation à découpage.....	72
4.3.1.2. La sélection des composants	73
4.3.2. Commande MPPT.....	76
4.3.3. Carte shunt.....	77
4.3.3.1. Mesures de tension	78
4.3.3.2. Mesures du courant.....	78
4.4. Tests et interprétation des résultats	79
4.5. Conclusion	85
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	86

Nomenclature

- I : Courant de générateur photovoltaïque (A).
- I_{ph} : Courant de photo-génération(A).
- I_{d1} : Courant de génération-recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espaces(A).
- I_{d2} : Courant de diffusion dans les zones neutres(A).
- I_S : Courant de saturation(A).
- I_{cc} : Courant de court circuit (A).
- V_{co} : Tension de circuit ouvert (V).
- i : Paramètre intrinsèque de l'idéalisme de la diode.
- FF : Facteur de forme.
- n_1 : Facteur d'idéalité de la diode 1 (A)
- n_2 : Facteur d'idéalité de la diode 2 (A)
- q : Charge de l'électron (C)
- k : Constante de Boltzmann (JK^{-1})
- T : Température de jonction (K)
- n_s : Nombre de cellule en série
- R_s : Résistance série (Ω)
- R_p : Résistance shunt (Ω)
- P : Puissance du générateur photovoltaïque (W)
- P_{mp} : Puissance maximale (W)
- I_{mp} : Courant optimal (A)
- V_{mp} : Tension optimale (V)
- C : Capacité (F)
- V_c : Tension de capacité (V)
- E_b : Energie de batterie (KW/h)
- V_b : Tension de batterie (V)
- I_b : Courant de batterie (A)
- i : Courant d'entrée (A)
- i_0 : Courant de sortie (A)

Nomenclature

i_s	: Courant de commutateur (A)
T_s	: Période de commutation
d	: Rapport cyclique
i_l, v_l	: Courant et tension aux bornes de la bobine (A), (V)
i_c	: Courant dans la capacité (A)
L	: La bobine (H)
V_e	: Tension d'entrée (V)
V_0	: Tension de sortie (V)
$M(d)$: Rapport de conversion.
P_{PV}	: Puissance photovoltaïque
V_{PV}	: Tension photovoltaïque
I_{PV}	: Courant photovoltaïque.
PWM	: Pulse width modulation.
MPPT	: Maximum power point tracking.
MPP	: Maximum power point.
P&O	: Méthode Perturbation et observation.
C_p	: Largeur du pas de la perturbation.
P GPV	: Puissance du générateur photovoltaïque
P_s	: Puissance de la sortie du convertisseur.
VGPV	: Tension du générateur photovoltaïque
VCP	: Tension de la cellule photovoltaïque.
Vpv1	: Tension de la sortie du panneau photovoltaïque.
M1	: La sortie du capteur du courant a la sortie du PV.
M2	: La sortie du capteur du courant a la sortie du boost.
Vb	: Sortie du capteur du courant (PV)
Vs1	: Entrée capteur du courant (boost).
Vs	: Sortie du capteur du courant (boost)
Vs1	: Entrée capteur du courant (boost).
K	: Rapport de division de V_{mp} et V_{oc} .

INTRODUCTION

Le soleil est une source d'énergie indispensable à la vie sur la terre. Il déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole). Cette valeur est à comparer aux 9,58 milliards de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (1998).

Avec le développement qu'a connu la vie de l'homme, ses besoins en énergie ne cessent de s'accroître et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites " renouvelables " et notamment à l'énergie solaire. Le souci actuel des scientifiques est de développer des systèmes capables de transformer cette énergie avec un rendement proche de 100%.

L'énergie photovoltaïque est une énergie dont la source est inépuisable, non polluante et dont l'exploitation causerait le moins de dégâts écologiques. Elle occupe une place importante dans le domaine de la recherche afin de satisfaire les besoins futurs en matière d'énergie.

L'énergie photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. Cette énergie, à l'origine développée pour l'alimentation des satellites, s'est imposée comme source alternative d'énergie après le choc pétrolier des années 70. De nos jours, l'industrie de la technologie photovoltaïque connaît un essor important en matière de qualité et de coût de fabrication des panneaux.

Afin d'optimiser l'exploitation des panneaux photovoltaïques, plusieurs méthodes ont été mises en pratique pour déterminer le point de puissance maximale MPP dont la position varie en fonction des conditions climatiques (ensoleillement et température).

Le but de ce thème est de concevoir et réaliser un banc de mesure photovoltaïque qui nous permettra d'étudier le fonctionnement du générateur photovoltaïque.

Le premier chapitre est consacré à la conversion photovoltaïque, et au fonctionnement des cellules ainsi qu'aux panneaux photovoltaïques. On donnera une brève description de la batterie. Ce chapitre traite aussi les convertisseurs DC-DC, leurs types et leurs rôles. Des modèles mathématiques sont proposés, ainsi que le dimensionnement des principaux composants.

Le second chapitre présente quelques méthodes de conception adoptées pour la poursuite du MPP. Le troisième chapitre, concerne la simulation et la comparaison des techniques P&O, P&O améliorée, Incrémentation de conductance, et contre réaction de la tension utilisant une cellule pilote.

Le quatrième chapitre est dédié à la réalisation d'un banc de mesure photovoltaïque qui comprend la chaîne photovoltaïque et carte de mesure. Les résultats des tests du dispositif sont discutés dans la deuxième partie de ce chapitre.

Une conclusion générale commente les résultats du travail présenté.

CHAPITRE 1 SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1. Le générateur Photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements connectés pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge.

En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement mais à d'autres moments qui nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Un régulateur est alors indispensable pour protéger la batterie contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur.

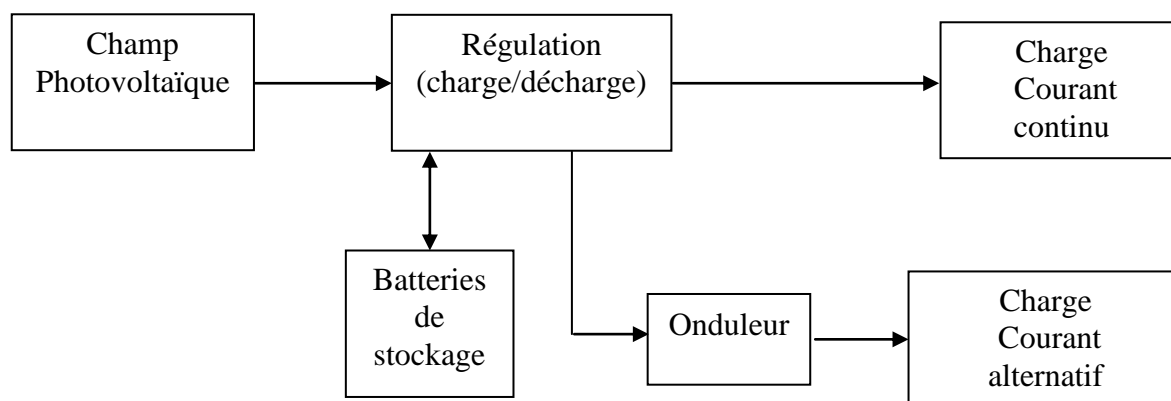


Figure1.1: Schéma générateur photovoltaïque autonome.

1.2. Champ photovoltaïque

C'est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en électricité. Il est constitué d'un certain nombre de panneaux selon la puissance crête souhaitée, ces derniers sont formés à partir des modules reliés entre eux en série ou en parallèle. Le module est un ensemble de cellules photovoltaïques.

1.2.1. L'effet photovoltaïque

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " :

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module ou panneau solaire.

1.2.2. Le rayonnement solaire

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (Système solaire auquel la Terre appartient). Sa lumière met 8mn et 18s à travers 150 millions de kilomètres d'espace pour terre. La puissance émise par le soleil est estimée à $1.7 \cdot 10^{23}$ kW dont une partie atteint le globe terrestre, elle est de l'ordre de $8.5 \cdot 10^{13}$ kW ; Uniquement 70% (environ $6 \cdot 10^{13}$ kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère.

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde variant de $0.22\mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$, la figure 1.2 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Ces rayonnements arrivent au sol, soit directement soit après certaines atténuations ou déperditions résultantes des phénomènes d'absorption et/ou de diffusion.

On décompose le rayonnement global (total) terrestre en rayonnement direct (rayonnement provenant directement du soleil) et en rayonnement diffus (rayonnement provenant de l'atmosphère); Un capteur incliné d'un angle donné sur l'horizontale subit une autre composante du rayonnement : la part renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par le sol.

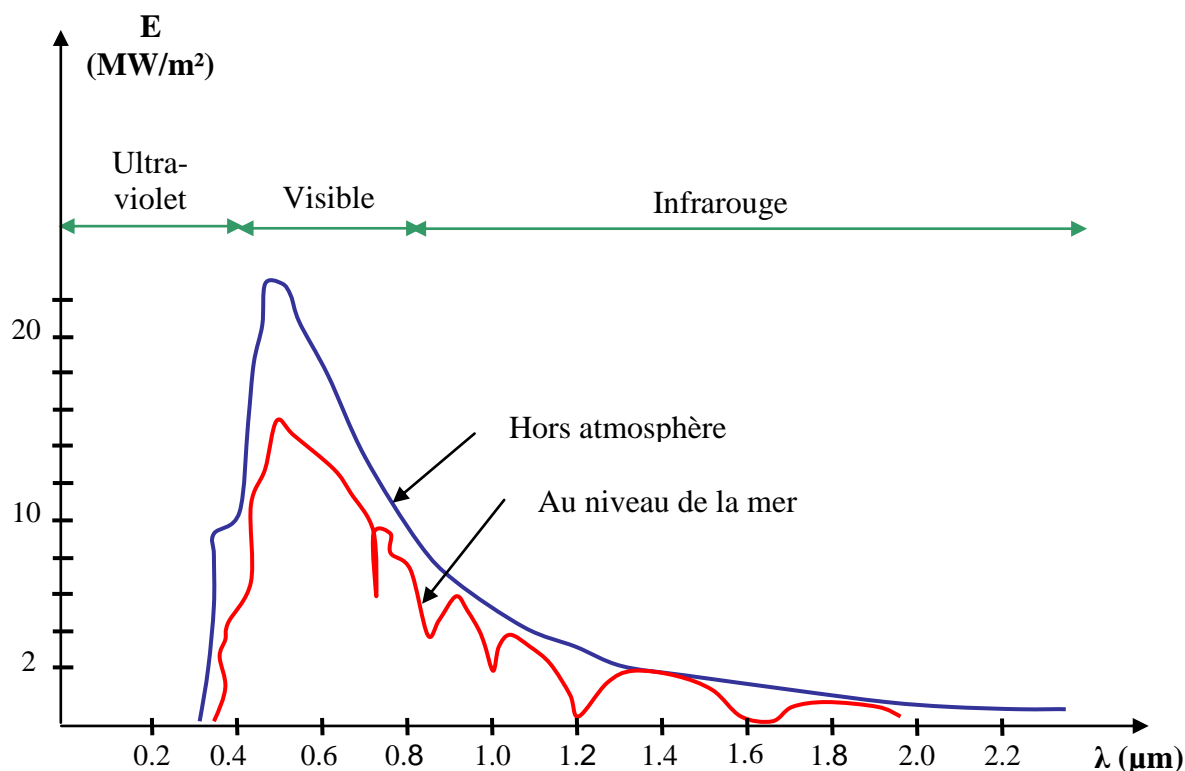


Figure 1.2 : La répartition spectrale du rayonnement Solaire.

1.2.3 La cellule photovoltaïque:

Il est possible d'utiliser directement l'énergie reçue du soleil grâce à des capteurs soit sous forme électrique, soit thermique.

Le champ photovoltaïque responsable de la conversion d'énergie solaire incidente en énergie électrique par l'effet photovoltaïque, est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée; chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques généralement monté en série.

Actuellement la majorité des cellules solaires commercialisées sont fabriquées en silicium, la différence entre les constructeurs se situe dans la taille et la forme des cellules et celle des modules ainsi que dans la manière d'encapsulation des cellules.

La cellule photovoltaïque est principalement constituée à partir de silicium dopé (semi-conducteur: jonction PN). Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Cette énergie permet aux atomes de libérer des électrons, générant ainsi des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ces charges sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Une fois les charges P et N isolées, il suffit de fermer le circuit entre ces deux zones P et N pour mettre en mouvement les électrons et créer ainsi un courant électrique. L'effet photovoltaïque ainsi réalisé permet de convertir l'énergie du rayonnement (photon) en énergie électrique (Volt).

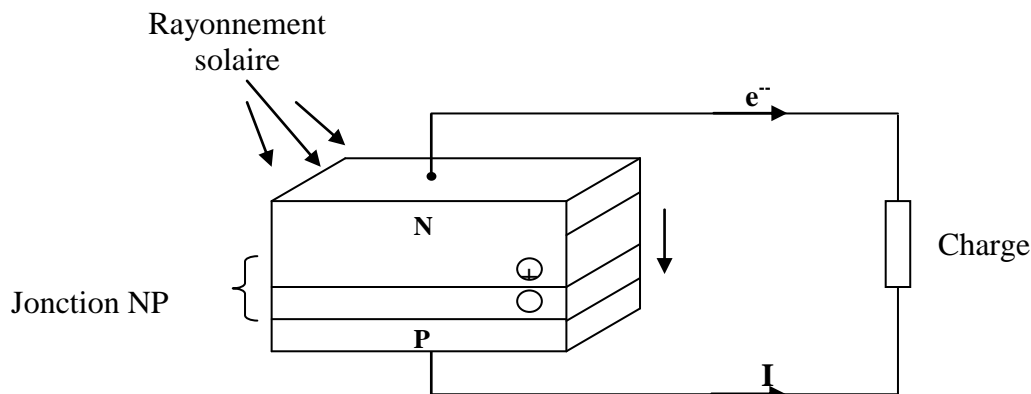


Figure 1.3: La Jonction NP connectée à une charge.

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque, les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont à base du silicium sous forme monocristallin, poly cristallin ou amorphe ; ces matériaux sont utilisés en tranches fines ou en dépôts sur un substrat.

➤ **La technologie monocristalline :** [2]

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Le silicium monocristallin est une matière première d'une très grande pureté. Elles ont un rendement de 12 à 16%, mais la méthode de production est laborieuse.

➤ **Les cellules poly-cristallines :**

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 16%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines.

➤ **Les cellules photovoltaïques amorphes :**

Ces cellules ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 10% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

1.2.3.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron / trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétéro jonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 1.4 :

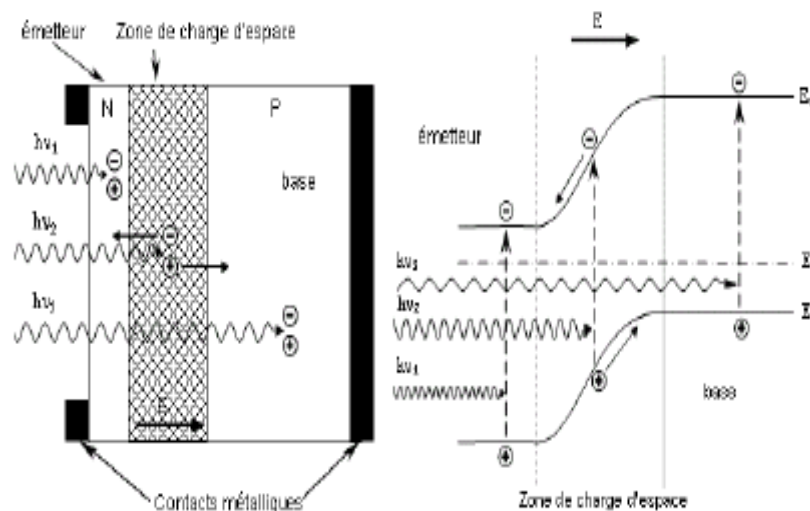


Figure1.4 : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion ;
- dans la zone de charge d'espace, le pair électron / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

1.2.3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{abs}(V) \quad (1.1)$$

Avec : I_{ph} : densité de courant photogénéré et I_{obs} : densité de courant d'obscurité.

Une cellule photovoltaïque idéale peut être représentée par le circuit suivant : [3], [4]

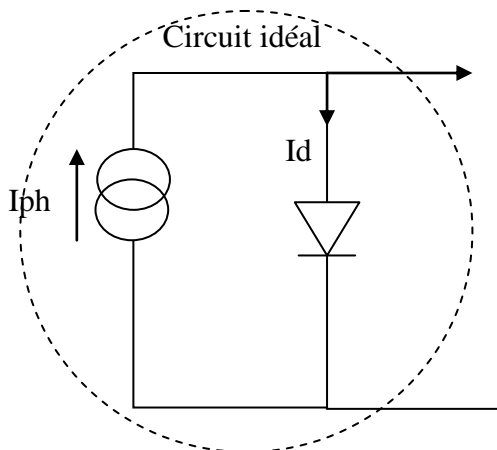


Figure 1.5: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

$$I_d(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{q \times V}{i \times k \times T}\right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

L'équation (1.1) peut être écrite sous la

Forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s (\exp^{(qV/kT)} - 1) \quad (1.3)$$

Avec : I_s : courant de saturation de la diode, q : charge élémentaire, k : constante de Boltzmann, T : température et i est le paramètre intrinsèque de l'idéalisme de la diode.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode.

1.2.3.3. Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque

La figure (1.6) propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photogénéré ainsi que des résistances complémentaires, R_s et R_p , et deux diodes d_1 et d_2 . R_c est la résistance de charge. [3], [4]

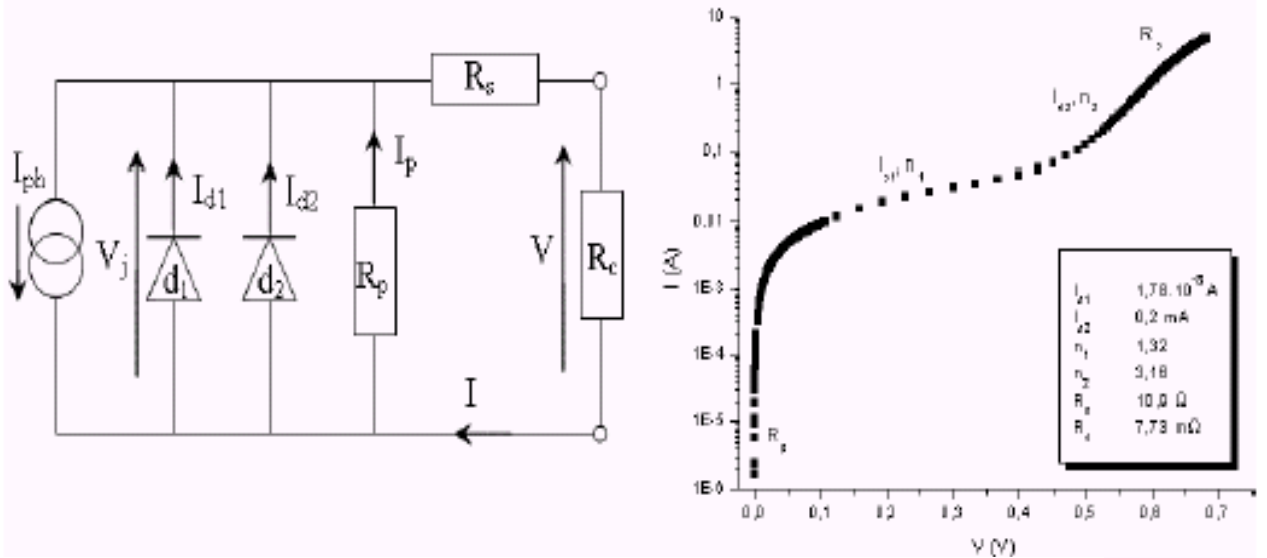


Figure1.6: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (image gauche) et Caractéristique I (V) d'une cellule mesurée sous obscurité (image droite).

La résistance série R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : Émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs. La résistance parallèle ou de court-circuit R_p traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible. Nous avons également tenu compte d'un modèle plus rigoureux au niveau des différents courants en faisant appel à deux diodes. Le terme en I_{s2} correspond au courant de diffusion

$$I(V) = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - V_j / R_p$$

$$I(V) = I_{ph} - I_{s1} [\exp.(\alpha_1 V_j) - 1] - I_{s2} [\exp.(\alpha_2 V_j) - 1] - V_j / R_p \quad (1.4), [4],[5]$$

Avec: $V_j = V + I \cdot R_s$

(Dans le cas où la courbe I-V est représentée dans le cadre correspondant au courant et la tension sont positifs) ;

$$I_{ph}(T) = I_{ph}|_{(T=298.K)} \left[1 + (T - 298.K) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (1.5) \quad [4]$$

I_{ph} : courant de photo-génération ;

I_{d1} : courant de génération-recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espaces

I_{d2} : courant de diffusion dans les zones neutres ;

R : résistance parallèle ;

R_s : résistance série ;

I_s : courant de saturation ;

$\alpha_i = q/(ikT)$ avec i : facteur d'idéalité de la diode ;

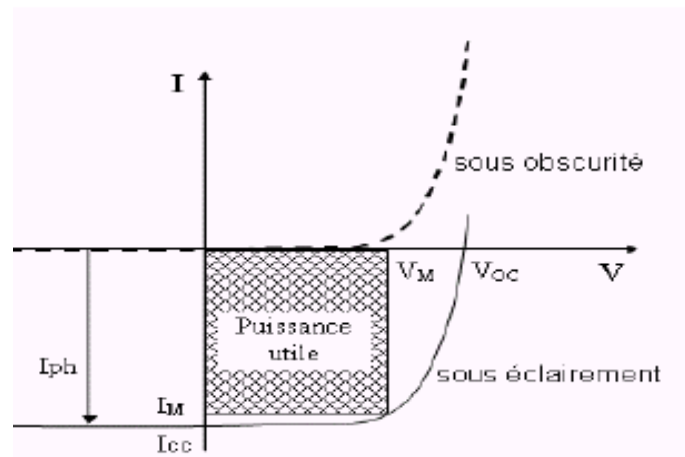


Figure 1.7: Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairciment d'une cellule photovoltaïque.

La partie intéressante de la caractéristique I-V (Figure 1.7) est celle qui génère de l'énergie et plus précisément au point P_m de la puissance est maximale. A ce point, on associe la tension maximale V_m et le courant maximal I_m . [6]

$$P_m = V_m \times I_m$$

On appelle facteur de forme FF (filling factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($I_m \times V_m$) de la cellule sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$) où:

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad [2] \quad (1.6)$$

Le rendement énergétique de conversion η est défini comme suit :

$$\eta = \frac{P_m}{E \times S} \quad [2] \quad (1.7)$$

E : L'éclairciment en W/m^2 .

S : surface de la cellule.

I_{CC} : courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$) ;

V_{CO} : tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$) ;

I_{mp} : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

V_{mp} : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

η : rendement de conversion ;

FF : facteur de forme.

1.2.4 Le module photovoltaïque :

Une cellule seule dite " nue " est souvent peu utilisable, sa faible épaisseur la rend très fragile d'une part, sa tension et son courant très faibles la rendent inutilisable directement dans des applications électriques courantes d'autre part.

Les tensions de fonctionnement des équipements électriques sont normalisées (12, 24, 48V, etc...) et une seule cellule PV ne permet pas de les alimenter directement. Ainsi, afin d'accroître la puissance disponible et l'énergie produite par des cellules PV, les fabricants assemblent en série et en parallèle les cellules PV.

La tension désirée est atteinte en connectant plusieurs cellules en série N_s . Pour obtenir la puissance désirée, plusieurs de ces séries de cellules peuvent être montées en parallèle N_p . Ces enchaînements sont ensuite protégés sous un conditionnement conférant à l'ensemble une bonne résistance mécanique et une protection efficace face aux agressions extérieures. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = N_S \cdot V_{PV} \cdot N_P \cdot I_{PV}$$

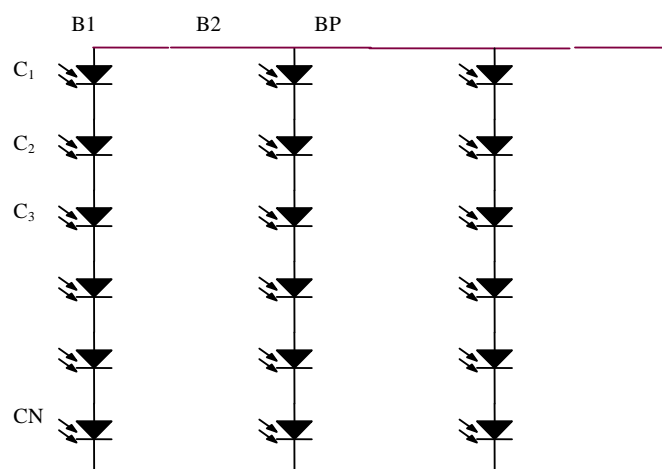


Figure 1.8. Panneau photovoltaïque de N_p branches parallèles ayant chacune N_s cellule séries

Si l'on désire avoir un panneau PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (N_s , N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{mp} et d'un courant optimal noté I_{mp} . Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication.

1.2.4.1. Propriétés.

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairage et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement. [5]

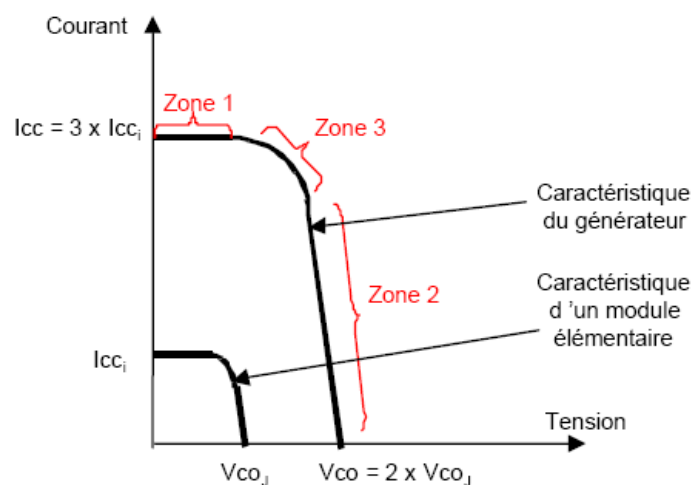


Figure 1.9. Caractéristiques $I(V)$ d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle avant chacune 2 cellules en série.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{CC} et de la tension à vide V_{CO} sont plus ou moins importantes (figure 1.9). La caractéristique, d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules, a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $\frac{1}{R_{SH}}$ (Zone 1).
 - Une zone assimilable à un générateur de tension V_{CO} d'impédance interne équivalente à RS (Zone 2),
 - Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de RS à R_{SH} (Zone 3).
- C'est dans la Zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (V_{OPT}, I_{OPT}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.

1.2.4.2 Circuit équivalent et modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque

Le modèle mathématique, qui caractérise le panneau photovoltaïque, est donné par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[e^{\frac{q(V+I.Nr.R_s)}{Nr.n_1kT}} - 1 \right] - I_{d2} \left[e^{\frac{q(V+I.Nr.R_s)}{Nr.n_2kT}} - 1 \right] - \frac{V + I.Nr.R_s}{Nr.R_p} \quad (1.8) \quad [4],[5]$$

Nr : Nombres de cellules photovoltaïques raccordées en série.

1.2.4.3. Comportement en température et sous divers éclairagements homogènes.

Les influences de l'éclaircement et de la température sur la puissance pouvant être délivrée par un panneau PV sont importantes. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairagements à température maintenue constante (figure 1.10) montrent clairement l'existence des points maximaux sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} (V_{OPT}, I_{OPT}). Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{sc} ou I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu

(figure 1.10). Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension V_{oc} décroît alors que le courant I_{sc} croît légèrement (figure 1.11). De ces données, on peut estimer qu'en fonction des conditions de fonctionnement auxquelles on va soumettre le panneau, on peut en déduire la puissance qu'il va pouvoir délivrer. Il faut cependant prendre quelques précautions quant à l'utilisation de ces données pour estimer la quantité d'énergie délivrée par un générateur. [5],[7],[8]

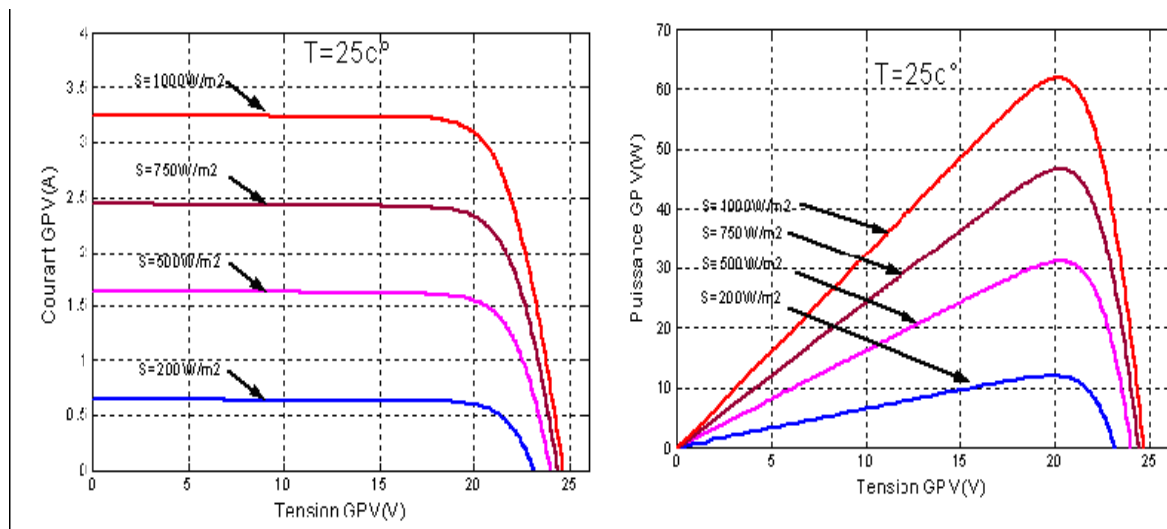


Figure1.10: Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I= f(V)$ et $P=f(V)$.

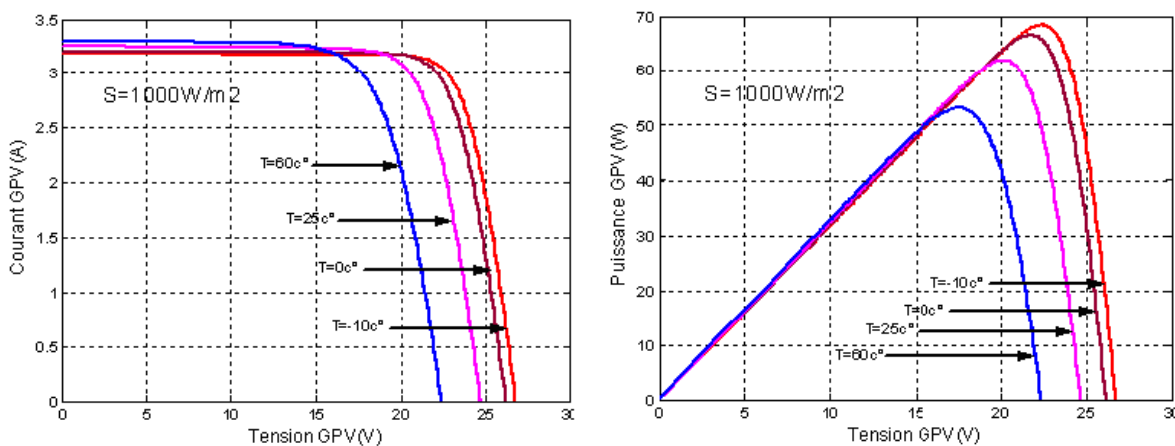


Figure1.11: Influence de la température sur la courbe $I= f(V)$ et $P=f(V)$.

1.2.4.4 La protection des cellules et des modules

La cellule photovoltaïque est un élément très fragile, en cas d'occultation ou un court-circuit accidentel, la cellule peut subir une tension inverse trop élevée ou être traversée par un courant trop important.

Afin de protéger les cellules et les modules photovoltaïques, on utilise des diodes de protection qui doivent être montées en série ou en parallèle.

- **Les diodes parallèles (shunt) :** Pour la protection des cellules contre les tensions inverses.
- **Les diodes série :** Pour la protection d'une branche de modules ou de cellules contre le courant inverse.

Les figures 1.12.a et 1.12.b illustrent le principe de protection des cellules et des modules par utilisation des diodes.

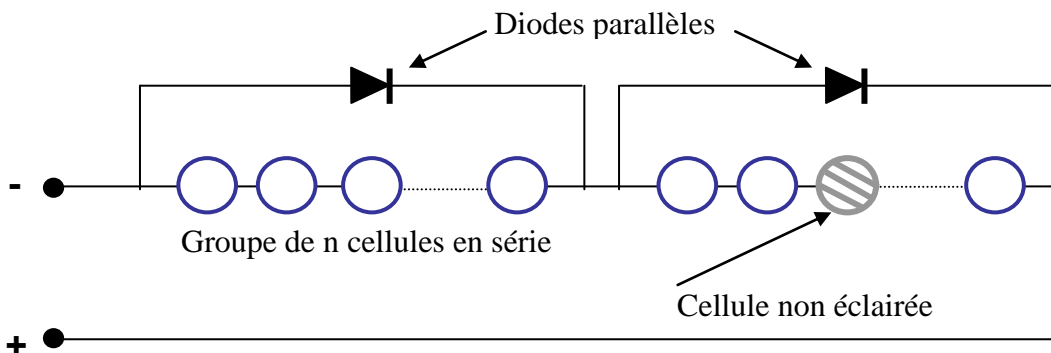


Figure 1.12.a : Protection des cellules contre la tension inverse.

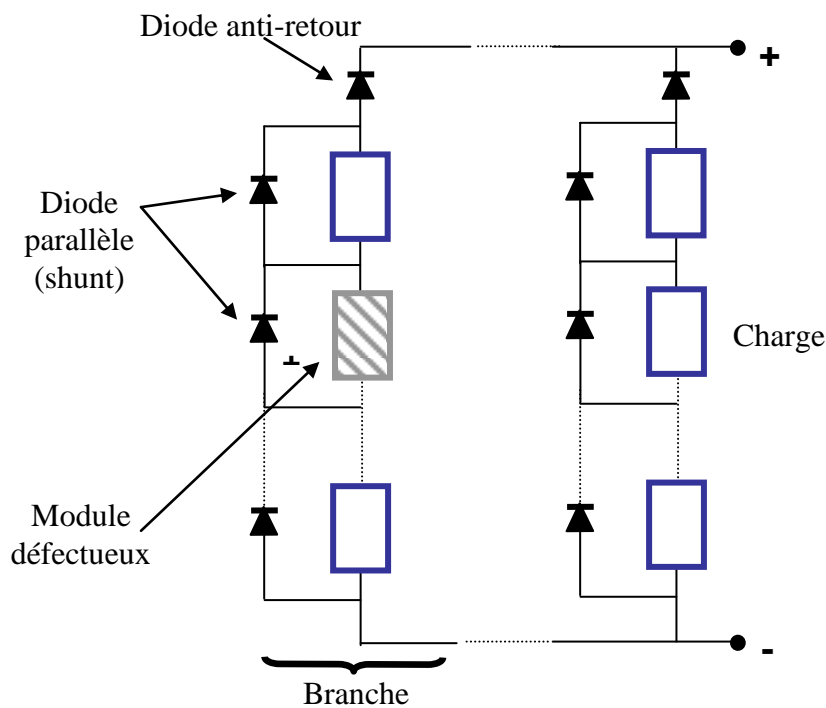


Figure 1.12.b : Protection des modules par des diodes.

1.3. Les batteries d'accumulateurs

1.3.1 La nécessité de stockage

Les caractéristiques de l'énergie solaire pose le problème du stockage au niveau des installations photovoltaïques. En effet, l'apport et les besoins en énergie ne coïncident pas, les besoins augmentent là où les apports solaires n'existent pas, comme c'est le cas pour les systèmes d'éclairage dont le besoin augmente la nuit.

Le moyen le plus adapté aux systèmes photovoltaïque est le stockage électrochimique. Le système le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateur électrochimique; ces accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer à tout moment et sur demande grâce à des réactions réversibles.

1.3.2 Le rôle d'une batterie

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

1.4. Les régulateurs

1.4.1. La nécessité d'un régulateur

La batterie d'accumulateurs est l'un des éléments le plus fragile d'un système photovoltaïque ; en effet, une charge excessive entraîne un dégagement gazeux, dû aux réactions internes, ce qui provoque l'oxydation des électrodes; de même une décharge profonde provoque la sulfations des électrodes ; c'est à dire une couche blanche de sulfate de plomb qui empêche toute recharge.

Afin de contrôler au mieux les conditions de charge et de décharge on intercale entre le générateur et la batterie d'accumulateur un dispositif de régulation appelé : régulateur de charge. Celui-ci constitue donc, un élément de base dans l'installation photovoltaïque dont dépendent la fiabilité et le rendement de la centrale.

Le régulateur de charge assure donc deux fonctions principales:

- ❖ La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes ;
- ❖ L'optimisation d'un transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à l'utilisation.

1.4.2. Le principe de fonctionnement d'un régulateur

L'indicateur utilisé est la tension aux bornes de la batterie ; en effet, cette grandeur est la seule facilement mesurable capable de donner une estimation de l'état de charge. Le régulateur doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils, un seuil haut et un seuil bas à ne pas dépasser.

Différents types de régulateurs existe sur le marché, les plus utilisés parmi sont : les régulateurs série et les régulateurs shunt. Lorsque les batteries ont atteint leur pleine charge, le régulateur shunt intercepte le courant en provenance du champ et l'envoie directement à la terre (ou à une borne négative), par l'intermédiaire d'une charge résistive. Le régulateur série ouvre le circuit électrique pour couper le courant qui provient du champ PV.

Un régulateur de charge qu'il soit de conception simple ou compliqué, constitue toujours le cœur d'une installation photovoltaïque et doit assurer la fiabilité et la performance.

1.4.3. Le rôle d'un régulateur

Le régulateur accomplit les fonctions suivantes :

- ◆ Le contrôle de la charge :

Le contrôle de la charge de la batterie est une tâche critique déterminant la durée de vie de la batterie. Le régulateur empêche la surcharge qui entraîne une gazéification. Cette gazéification est la décomposition de l'eau de l'électrolyte en hydrogène et oxygène ce qui endommagera les plaques du plomb et la perte de l'électrolyte. Cependant une légère gazéification est nécessaire et recommandée, le régulateur à tension constante maintient la batterie en tension de flottement. [9]

- ◆ **Le contrôle de la Décharge :**

Le régulateur est aussi utilisé afin d'éviter la décharge de la batterie qui très néfaste pour la durée de la vie de ce dernière. Le circuit de délestage incorporé dans le régulateur déconnecte les charges lorsque la tension de la batterie descend au dessous d'un seuil critique. Ce seuil est déterminé en fonction de la durée de vie de la batterie désirée, la température ambiante et le niveau du courant.

- ◆ **Égalisation :**

Un autre phénomène apparaît au fil du temps, c'est la différence de capacité entre les cellules de la batterie et les variations de température entre les éléments. Pour compenser ces variations, il est recommandé d'effectuer une charge d'égalisation qui permet la charge complète de toutes

les cellules de la batterie. L'égalisation consiste en une sorte de charge forcée plus longue à petit courant, elle permet de recommencer un cycle avec une batterie dont les cellules sont pleinement chargées.

◆ Compensation thermique :

L'activité électrochimique de la batterie est très dépendante de la température. A haute température, la batterie passe facilement à l'état de charge et commence sa gazéification à la plus basse tension. Si la tension de coupure est trop élevée, la corrosion est accélérée, ce qui entraîne la perte de l'électrolyte. Le régulateur adapte cette tension à la température ambiante.

1.4.4. Les types de régulateurs

Les régulateurs de charge peuvent être se caractériser en groupes suivants : [7]

1.4.4.1. Régulateur série

Pour ce type de régulateur, l'interrupteur est placé en série avec la batterie. Il s'ouvre lorsque la tension de fin de charge est atteinte afin de déconnecter la batterie du panneau.

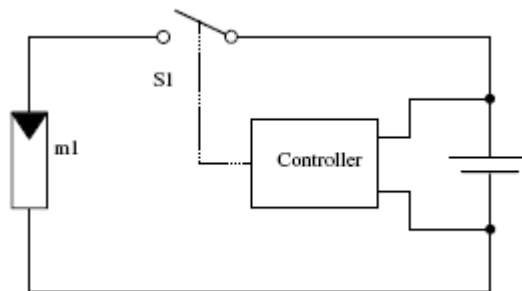


Figure1.13: Régulateur série

1.4.4.2. Régulateur shunt

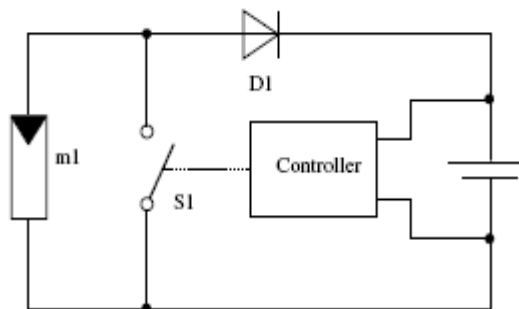


Figure 1.14 : Régulateur shunt

C'est un modèle très répandu, le principe du courant est un simple aiguillage, tout le courant du panneau passe à la batterie et lorsque le seuil de surcharge est atteint, tout le courant passe à l'interrupteur (relais ou MOSFET). Ce type de régulateur est doté d'une diode, de type Schottky, qui empêche d'interrupteur de court-circuiter la batterie et évite le retour du courant de la batterie vers le panneau.

1.4.4.3. Régulateur PWM

Le régime de régulation est basé sur la technique de modulation par impulsions à largeur variables PWM. Le régulateur fonctionne avec la fréquence de switch qui est déterminée par l'horloge de générateur. La fréquence typique est de l'ordre de 100Hz. Dans le courant de charge, le switch est fermé et le courant de charge circule dans la batterie. En s'approchant de la tension de fin de charge, le modulateur par impulsions largeurs variables (PWM) réduit le rapport cyclique jusqu'à zéro. Le courant de charge moyen chute et la tension de la batterie est maintenue constante.

L'avantage des régulateurs PWM est que la fréquence d'interruption est connue. Les problèmes de compatibilité électromagnétique sont plus aisément résolus et le contrôle de la moyenne du courant de charge devient plus simple.

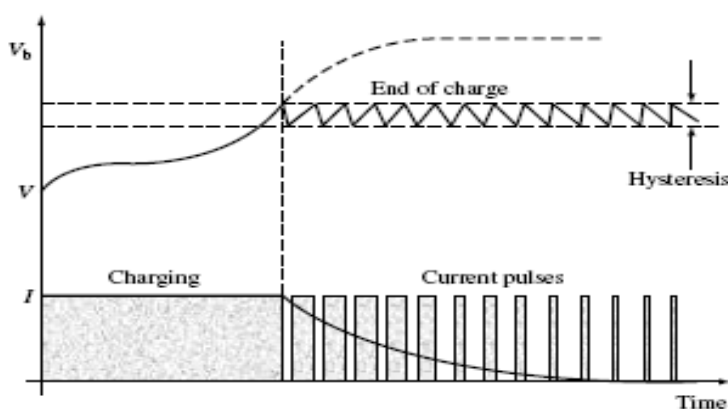


Figure 1.15 : Tension et courant de la batterie durant la

1.4.2.4. Régulateur MPPT

Dans ce régulateur, un circuit mesure continuellement la tension et le courant du panneau pour extraire l'énergie au point de puissance maximale, ce qui permet de récupérer le maximum d'énergie quelque soit le rayonnement et la température.

Un premier circuit traque le point MPP dans l'ensemble de panneaux et le second circuit transforme la tension et le courant pour l'adapter à la batterie. [7]

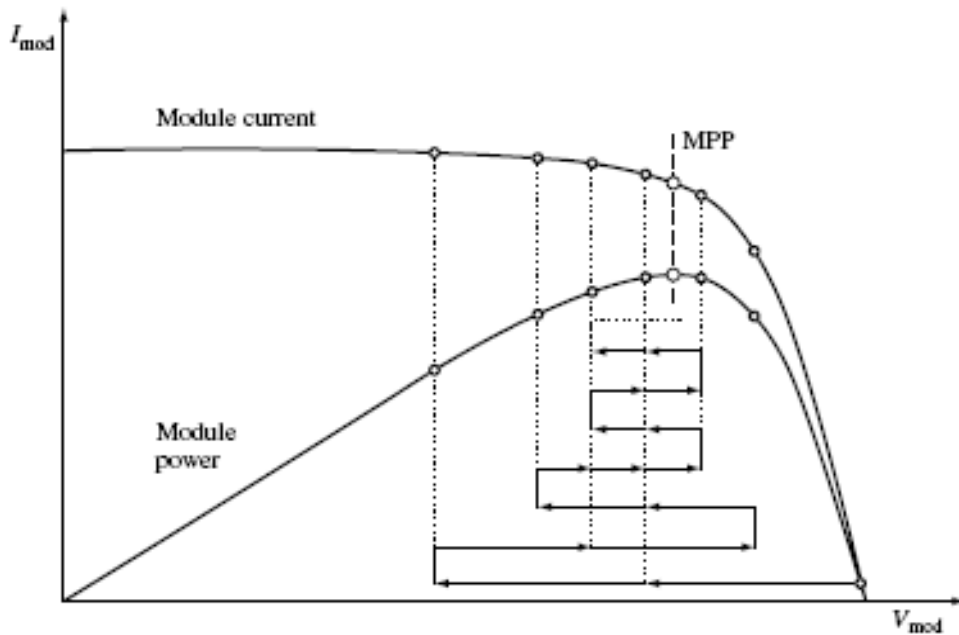


Figure 1.16 : Principe de fonctionnement de l’algorithme de poursuite MPPT « Mountain-climb »

1.5. Convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC transforme la tension de la batterie ou du panneau en une tension DC différente pour alimenter la charge. Il permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le convertisseur DC/DC est en fait un quadripôle (figure 1.17), jouant le rôle d’organe de liaison entre deux parties d’un réseau. Il est considéré comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

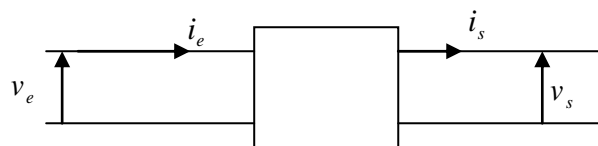


Figure 1.17 : Schéma d’un quadripôle électrique

Le convertisseur DC/DC se compose de condensateurs, d’inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c’est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué-saturé), habituellement un transistor MOSFET.

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $= d.T_s$ et un temps d'ouverture $= (1 - d)T_s$, où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$.
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$).

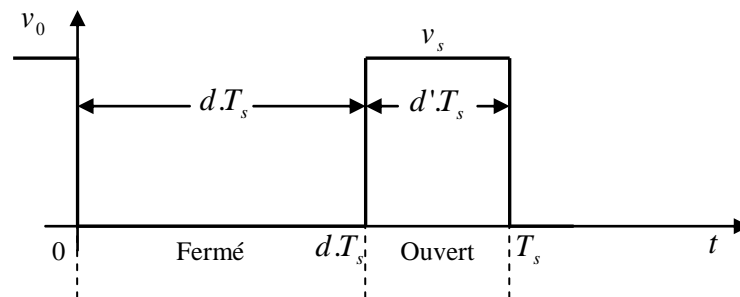


Figure 1.18: périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

1.5.1. Convertisseur abaisseur (Buck) :

Ce convertisseur sert à produire une tension plus basse que celle de la batterie. Lorsque l'interrupteur S est fermé, le courant $i(t)$ circule vers la charge à travers l'inductance L qui se charge à fur et à mesure que le courant $i(t)$ augmente durant $t \in [0, d.T_s]$, lorsque l'interrupteur S s'ouvre, l'inductance L libère l'énergie emmagasinée sous forme magnétique à la charge et la diode D est en état de conduction afin de protéger l'interrupteur, ce durant $t \in [d.T_s, T_s]$.

La tension et le courant désirés sont en fonction de la fréquence et du rapport cyclique. [4], [10], [11]

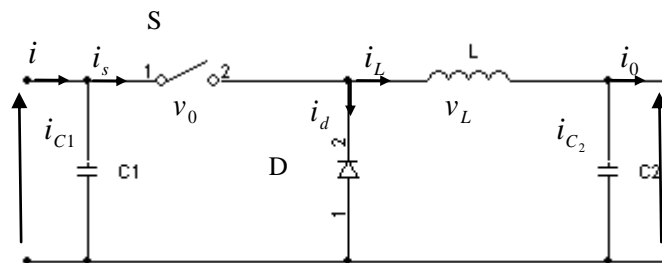


Figure 1.19: Circuit idéal de convertisseur Buck.

1.5.1.1. Modèle du circuit équivalent :

Pour étudier le convertisseur abaisseur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé. La figure 1.20.a correspond au schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec S fermé.

La figure I.20.b représente le convertisseur abaisseur avec S ouvert pendant l'intervalle $d'T_s$ du temps où d' indique le complément du rapport cyclique de commutation d défini comme :

$$d' = 1 - d \tag{1.9} \quad [4]$$

Pour $t \in [0, dT_s]$:

La loi de Kirchhoff appliquée à la figure 2.4 (commutateur fermé) donne les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), & (1.10) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t), & (1.11) \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t). & (1.12) \end{cases}$$

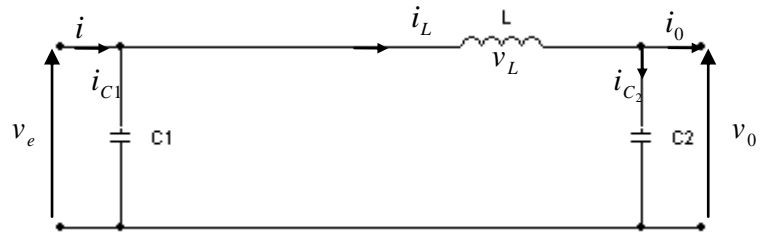


Figure 1.20.a : Convertisseur Buck avec S fermé

Pour $t \in [dT_s, T_s]$:

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t), & (1.13) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t), & (1.14) \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = -v_o(t). & (1.15) \end{cases}$$

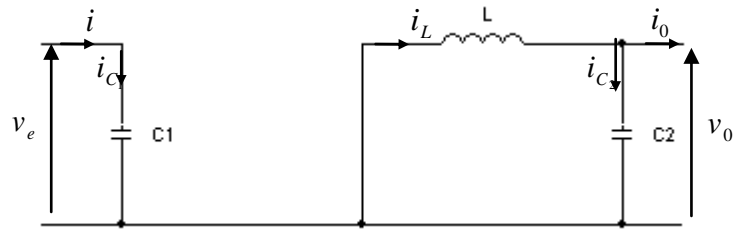


Figure 1.20.b : Convertisseur abaisseur avec S ouvert

Ce sont les équations de base employées dans le chapitre 4 pour obtenir le modèle mathématique décrivant les diverses propriétés du hacheur dévolteur.

1.5.1.2. Approximation des Petites ondulations

Les variables dans les équations (1.10) à (1.15) ont une composante constante et des harmoniques. La valeur de la composante constante est pratiquement égale à la valeur moyenne de la variable. Par conséquent l'ondulation peut être négligée et le signal peut être rapproché à sa composante constante.

Cette approximation s'appelle l'approximation des petites ondulations ou l'approximation ondulation linéaire, elle facilite beaucoup l'analyse mathématique des hacheurs.

Les équations (2.2) à (2.7) pour dT_s deviennent comme suit :

$$\begin{cases} i_{c1} = I - I_l & (1.16) \\ i_{c2} = I_l - I_0 & (1.17) \\ v_l = V_i - V_0 & (1.18) \end{cases}$$

Et similairement pour $d'T$

$$\begin{cases} i_{c1} = I & (1.19) \\ i_{c2} = I_l - I_0 & (1.20) \\ v_l = -V_0 & (1.21) \end{cases}$$

1.5.1.3. Etude de régime continu:

Les valeurs de la composante constante de la tension d'inductance et du courant de condensateur sont définies comme la moyenne de leur signal original

$$V_l = \langle v_l \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_l(t) dt, \quad (1.22)$$

$$I_c = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \quad (1.23)$$

Utilisant la relation $v_l = L \frac{di_l}{dt}$ et $i_c = C \frac{dv_c}{dt}$ obtient :

$$i_l(T_s) - i_l(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_l(t) dt, \quad (1.24)$$

$$v_c(T_s) - v_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \quad (1.25)$$

Quand l'état d'équilibre est atteint, les valeurs initiales et finales pendant une période de changement doivent être égales:

$$i_l(t + T_s) = i_l(t), \quad (1.26)$$

$$v_c(t + T_s) = v_c(t) \quad (1.27)$$

Il est maintenant possible de récrire les équations (1.24) et (1.25) comme suit:

$$0 = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_l(t) dt, \quad (1.28)$$

$$0 = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c(t) dt. \quad (1.29)$$

En comparant les équations (1.28) et (1.29), pour les valeurs moyennes de v_l et i_c dans (1.22) et (1.13) il est évident que les valeurs de la composante constante pour la tension de l'inductance et le courant du condensateur doivent être nulle.

$$V_l = \langle v_l \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_l(t) dt \quad (1.30)$$

$$I_c = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \quad (1.31)$$

Cette conclusion sera employée dans le chapitre 4 pour dériver le modèle du hacheur.

1.5.1.4. Rapport de conversion

Les équations (1.17) et (1.21) qui explicitent la tension aux bornes de l'inductance dans les deux périodes, fermeture et ouverture de l'interrupteur S, donnent la figure 1.21.

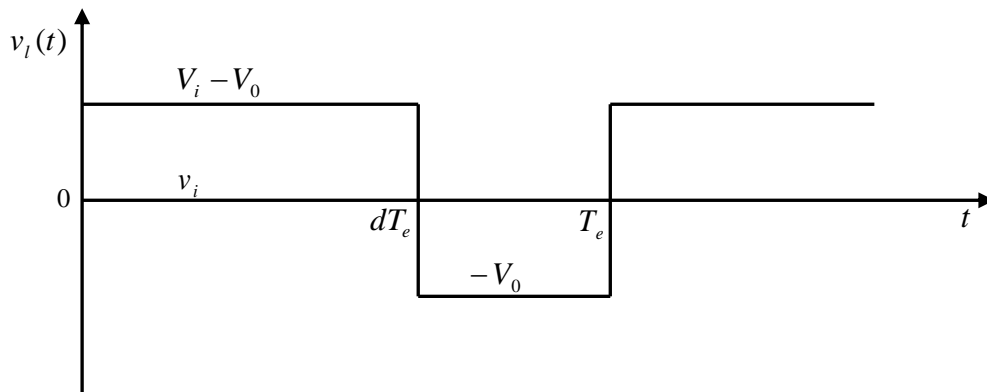


Figure 1.21: Forme d'onde de tension d'inductance $v_l(t)$ pour un buck.

L'expression de la tension moyenne d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde sur la figure 1.21, la tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$v_l(t) = d(V_i - V_0) + d'(-V_0) = 0 \quad (1.32)$$

En utilisant les équations (1.16) (1.17) et (1.18) (1.19) et en appliquant le principe de l'équilibre des charges capacitives on obtient les expressions pour les courants moyens de condensateur.

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'I = 0, \quad (1.33)$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'(I_l - I_0) = 0. \quad (1.34)$$

L'avantage de la combinaison de (1.24) et (1.26) avec (1.1) mène à trois équations simples qui décrivent les caractéristiques du courant continu à l'état d'équilibre d'un hacheur dévolteur.

$$dV_i = V_0 \quad (1.35)$$

$$I = dI_l \quad (1.36)$$

$$I_l = I_0 \quad (1.37)$$

À partir de l'équation (1.27), le rapport de conversion de hacheur dévolteur est donné sous la forme suivante :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = d. \quad (1.38)$$

La figure (1.22) illustre cette relation linéaire.

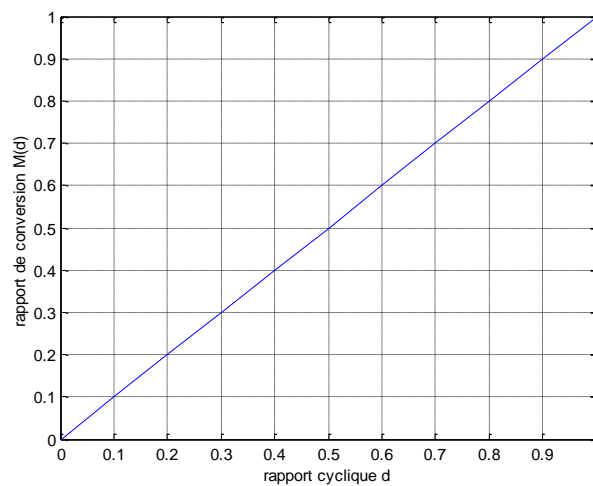


Figure 1.22: Rapport de conversion M en fonction du rapport cyclique d pour un convertisseur Buck.

1.5.2. Le convertisseur élévateur (Boost)

Ce convertisseur Boost fonctionne comme suit : lorsque l'interrupteur S est fermé, l'inductance se charge et le courant $i(t)$, provenant du panneau solaire, augmente progressivement et ce durant $t \in [0, d.T_s]$. Quand S s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège S en empêchant le retour du courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D durant $t \in [d.T_s, T_s]$.

1.5.2.1. Modèle équivalent de convertisseur Boost :

Pendant la période de commutation $d \cdot T_s$, S à l'état fermé connecte l'entrée à la masse à travers l'inductance et un très grand courant commence à circuler. La diode est polarisée en inverse, ainsi aucun courant d'inductance ne traverse la charge (figure 1.24.a).

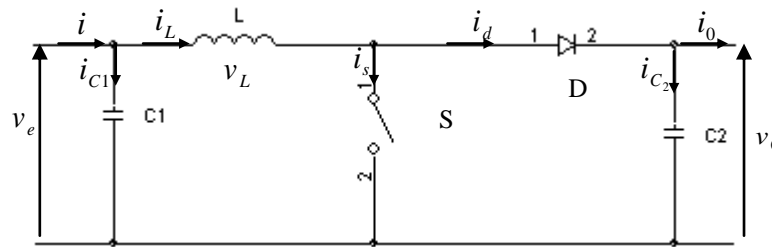


Figure 1.23 Convertisseur élévateur

Pendant la deuxième période $d \cdot T_s$, où S est ouvert (figure 1.24.b), la nature de l'inductance s'oppose à la discontinuité de l'écoulement de courant, et le courant élevé par la diode qui maintenant polarisée en direct mène à une haute élévation tension qui est appliquée à la charge.

Pour dériver les fonctions de transfert de l'état d'équilibre du convertisseur et l'expression de son rapport de conversion $M(d)$, les deux intervalles différents $d \cdot T_s$ de temps et $d \cdot T_s$ de période de commutation doivent être considérables. [4], [12]

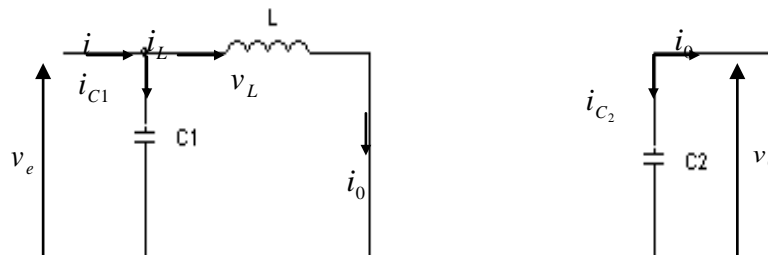


Figure 1.24.a: Convertisseur boost avec S fermé

Pour $t \in [0, d \cdot T_s]$, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t), \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_L(t). \end{array} \right. \quad (1.39)$$

Pour $t \in [d \cdot T_s, T_s]$, on a :

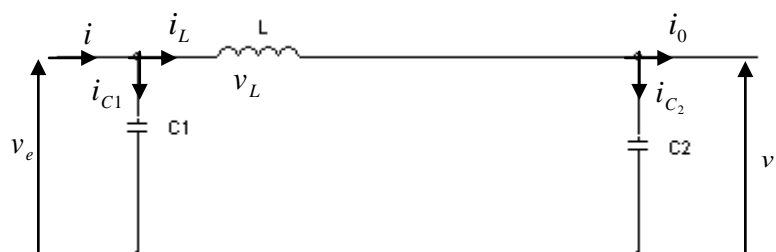


Figure 1.24.b: convertisseur boost avec S ouvert

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t), \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t). \end{cases} \quad (1.40)$$

1.5.2.2. Rapport de conversion :

L'approximation d'ondulation permet de négliger l'ondulation de commutation dans les signaux du convertisseur et de remplacer la valeur de ces signaux par leurs valeurs moyennes. Ceci simplifie les équations (1.39) et (1.40) à :

$$\begin{cases} i_{C1} = I - I_l \\ i_{C1} = -I_0, \\ v_l = V_i. \end{cases} \quad (1.41)$$

$$\begin{cases} i_{C1} = I - I_l \\ i_{C1} = I_l - I_0, \\ v_l = V_i - V_0. \end{cases} \quad (1.42)$$

Pour trouver les valeurs moyennes de i_{C1} , i_{C2} et V_i pendant toute la durée T_s les équations (1.41) et (1.42) sont substituées en (1.43):

$$x(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(\tau) d\tau = \frac{1}{T_s} \left[\int_t^{t+\alpha T_s} x|_{[0, \alpha T_s]}(\tau) d\tau + \int_{t+\alpha T_s}^{t+T_s} x|_{[\alpha T_s, T_s]}(\tau) d\tau \right]. \quad (1.43)$$

En régime permanent :

$$\begin{cases} \langle i_{C1}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'(I - I_l) = 0, \\ \langle i_{C2}(t) \rangle = d(-I_0) + d'(I_l - I_0) = 0. \\ \langle v_l(t) \rangle = dV_i + d'(V_i - V_0) = 0. \end{cases} \quad (1.44)$$

Avec $d = 1 - d'$ on peut simplifier les équations à :

$$I = I_l \quad (1.45)$$

$$I_0 = d' I_l, \quad (1.46)$$

$$V_i = d' V_0. \quad (1.47)$$

Le rapport de conversion $M(d)$ est donc écrit sous la forme suivante :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{d'} = \frac{1}{1-d}. \quad (1.48)$$

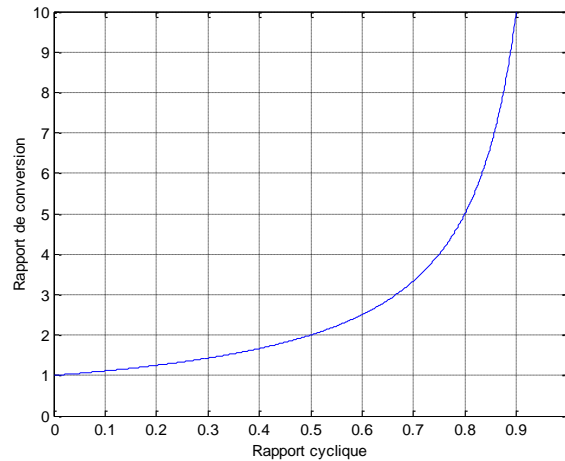


Figure 1.25 Rapport de conversion M en fonction de d

1.5.3. Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost)

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

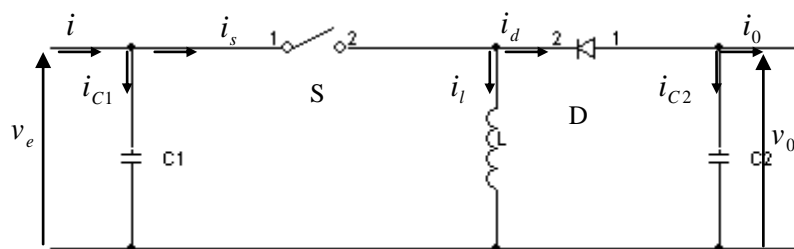


Figure 1.26 Circuit équivalent de convertisseur

1.5.3.1. Modèle équivalent de convertisseur :

Quand le S est fermé pendant l'intervalle dT_s de la période T_s de commutation. Le courant commence à circuler de la source d'entrée jusqu'à la masse à travers l'inductance (figure 1.27). Après que l'interrupteur S s'ouvre au début de l'intervalle dT , le courant est maintenu grâce à la nature de l'inductance, mais cette fois il circule à travers la diode et la charge. Puisque le courant est forcé à traverser la charge, la tension de sortie V_0 de convertisseur dévolteur-survolteur est négative. La variation du rapport cyclique d changera le rapport de conversion entre l'entrée et la sortie de tension V_0/V_i .

Pour $t \in [0, dT_s]$, on a :

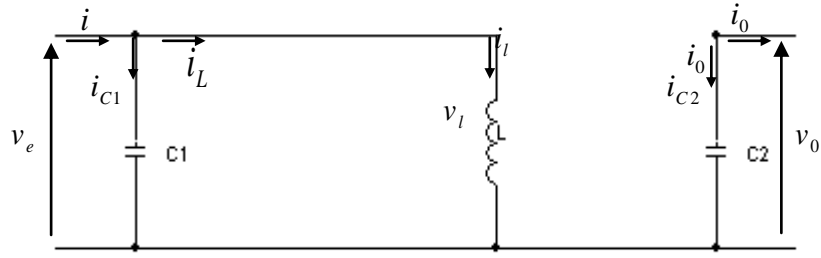


Figure 1.27.a. Convertisseur buck- boost avec S fermé

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t), \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t). \end{array} \right. \quad (1.49)$$

Pour $t \in [.dT_s, T_s]$, on a :

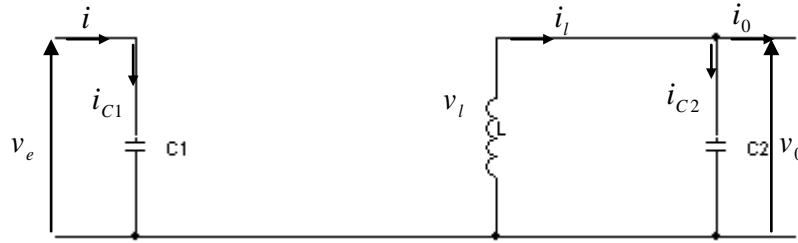


Figure 1.27.b Convertisseur buck- boost avec S ouvert

Dans la deuxième période $d'T$ on déduit les équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t), \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_0(t). \end{array} \right. \quad (1.50)$$

1.5.3.2. Rapport de conversion :

L'approximation de l'existence de petites d'ondulations permet de remplacer les variables dépendantes du temps dans (1.49) et (1.50) par leurs valeurs moyennes. Ceci donne pour dT :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1} = I - I_l \\ i_{C2} = -I_0 \\ v_l = V_i \end{array} \right. \quad (1.51)$$

Et pour $d'T$:

$$\begin{cases} i_{C_1} = I, \\ i_{C_2} = -I_l - I_0 \\ v_l = V_0 \end{cases} \quad (1.52)$$

En régime permanent :

$$\begin{cases} \langle i_{c1}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'I = 0, \\ \langle i_{c2}(t) \rangle = d(-I_0) + d'(-I_l - I_0) = 0. \\ \langle v_l(t) \rangle = dV_i + d'V_0 = 0. \end{cases} \quad (1.53)$$

Le modèle ramené à une moyenne équilibrée pour un convertisseur élévateur abaisseur idéal, maintenant peut être dérivé en multipliant hors des équations (1.53). Ceci avec $d = 1 - d'$.

Donc on peut exprimer le rapport de conversion à partir de l'équation (1.53) :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{d}{d'} = \frac{d}{1-d}. \quad (1.54)$$

Chapitre 2

Méthodes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

2.1. Introduction

On n'a vu dans le chapitre 1 que l'énergie fournie par le panneau photovoltaïque est fortement limitée par les contraintes physiques des cellules photovoltaïques. La densité de puissance de l'insolation pour un jour ensoleillé est autour 1000 W/m^2 . En tenant compte des rendements des cellules photovoltaïques qui sont entre 15% et 17% on aura un maximum de rendement possible de puissance entre 150 W/m^2 et 170 W/m^2 .

Il y a deux manières pour augmenter la puissance venant d'un panneau photovoltaïque:

- Soit on ajoute plus de panneaux à la rangée, ce qui signifie une augmentation de secteur, donc une grande augmentation en coût pour le matériel.
- On peut également essayer d'améliorer le rendement du système en procédant à la recherche du point de puissance maximale (MPP). Ce point de fonctionnement (P_{mp}, V_{mp}) valeurs correspond au un rendement maximal.

Le but de ce projet est de réaliser un banc d'essai qui permet d'extraire le maximum de puissance possible pour un ensemble donné de panneaux solaires.

Il y a beaucoup d'approches à ce problème. Une variété énorme de concepts mène à une variété encore plus grande de circuits et de mécanismes pour le fonctionnement des panneaux photovoltaïques au près de leurs points où le rendement de puissance soit le maximum.

Cette méthode est appelée méthode de recherche du point de la puissance maximale (MPPT), elle est basée sur la recherche du point de puissance maximale MPP et elle assure ainsi une bonne adaptation entre le générateur PV et sa charge en ce point à tout moment. [13]

Dans ce chapitre, on évoquera quelques techniques utilisées à cette fin.

2.2. Méthodes avec contre réaction de tension

Cette méthode consiste à contrôler la tension du fonctionnement du générateur PV, en la comparant à une tension de référence. On remarque l'apparition des erreurs qui sont corrigés à fur et à mesure par la commande PWM. Selon la nature de la tension de référence, si elle est fixe ou variable, on décèle trois techniques : [4], [14]

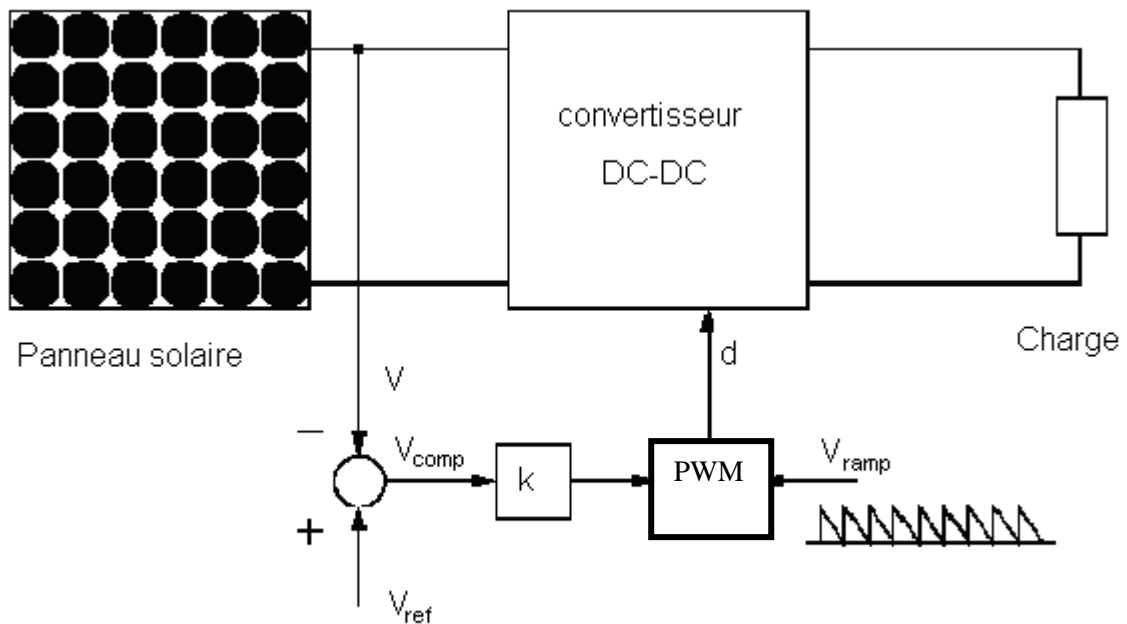


Figure 2.1: Méthode avec Contre-réaction de tension avec modulation.

2.2.1. Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode est basée sur la comparaison de la tension de sortie du panneau et d'une tension de référence prédéfinie pour ajuster continuellement le rapport cyclique D de convertisseur DC-DC. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (Figure 2.2) relevée par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance.

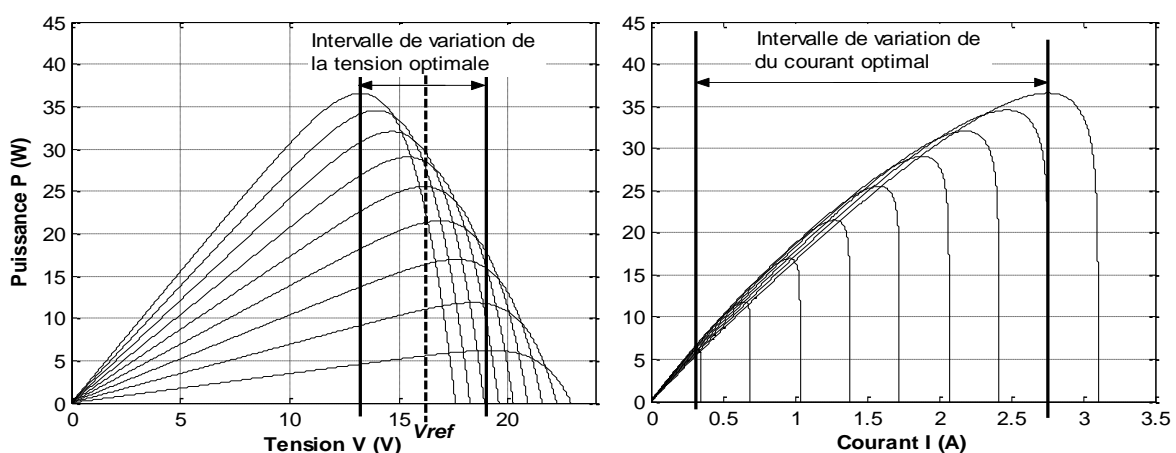


Figure 2.2. Intervalles de variation de la tension et du courant de fonctionnement optimal pour des ensoleillements et des températures variables.

A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'insolation et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année. La figure 2.3 présente le schéma synoptique de cette méthode. [4]

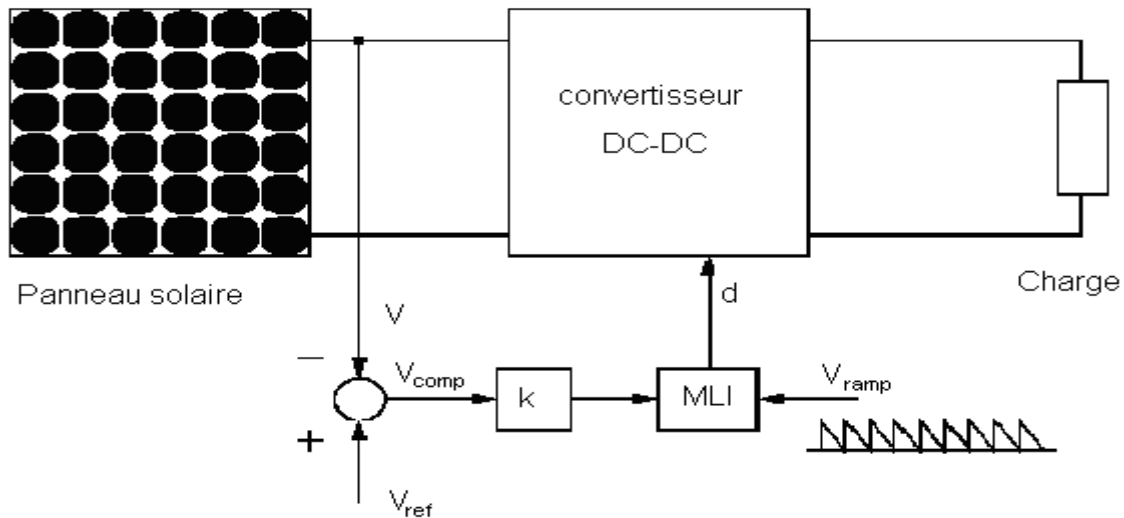


Figure 2.3. Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence fixe.

2.2.2. Contre réaction de la tension $V_{ref} = V_{oc}$

C'est une version améliorée de la méthode de la contre-réaction de tension, qui repose sur le principe suivant : [14]

- En négligeant la résistance série de la cellule, l'expression de la puissance de sortie des panneaux P est :

$$P = IV = (I_{sc} - I_o(\exp(\frac{eV}{akT}) - 1))V . \quad (2.2.1)$$

La dérivée de la puissance par rapport à V donne :

$$\frac{dP}{dV} = I_{sc} + I_o - I_o[1 + \frac{eV}{kT}] \exp(\frac{eV}{kT}) . \quad (2.2.2)$$

La puissance est maximale lorsque la dérivée de P est nulle pour une tension optimale V_{mp} , on remplace le courant de court circuit en fonction de la tension de circuit ouvert :

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln(1 + \frac{I_{sc}}{I_o}) . \quad (2.2.3)$$

On obtient :

$$\frac{e}{kT} V_{mp} + \ln\left(1 + \frac{e}{kT} V_{mp}\right) = \frac{e}{kT} V_{oc}. \quad (2.2.4)$$

On remarque que la fonction $V_{mp}=f(V_{oc})$, est pratiquement linéaire et elle est de forme

$$V_{mp} = KV_{oc} + a. \quad (2.2.5)$$

En exploitant cette propriété, on peut traquer en permanence le point de puissance maximale.

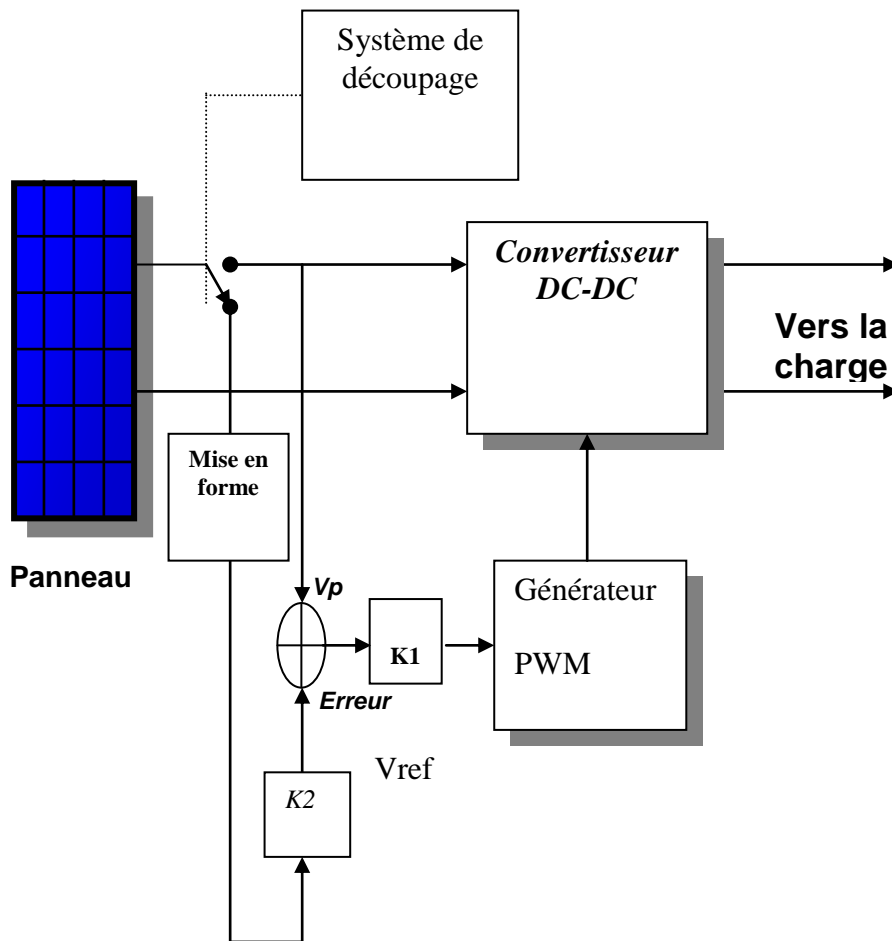


Figure 2.4. Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du panneau.

La tension à vide du panneau V_{oc} est mesurée, en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence. la valeur mesurée est stockée puis la tension de référence V_{ref} est ajustée sur une certaine fraction de la tension du circuit ouvert qui a été expérimentalement déterminée pour être 76% de V_{oc} . Cette tension de référence est comparée à

la tension de fonctionnement du panneau V et le signal d'erreur résultant V_{comp} est employé comme entrée dans la commande PWM du convertisseur DC-DC.

Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération de facteurs importants comme l'insolation et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en compte.

Puisque l'ajustement, de la tension de référence à 76% de la tension à vide du panneau, est toujours une fraction fixe, cette méthode ne peut pas être considérée comme un vrai moyen de poursuite de MPP. L'exactitude de l'ajustement de la tension de fonctionnement à la tension maximum V_{mp} de puissance dépend du choix de cette fraction comparée au vrai rapport V_{mp}/V_{oc} .

L'interruption du fonctionnement du système avec une certaine fréquence engendre des pertes qui sont estimées par Sullivan et Powers à 0,05% de la puissance maximale disponible. On estime que des pertes provoquées par l'inexactitude de localisation du MPP réel sont autour 0,5% (bien que ces figures puissent être optimistes). L'interruption fréquente du système en outre mènera à une augmentation de bruit électrique.

Les composants du système dans le convertisseur et le circuit de commande doivent être conçus pour pouvoir faire face aux interruptions du courant résultantes.

2.2.3. Méthode MPPT avec cellule pilote

Afin de parer aux inconvénients liés à l'interruption fréquente du générateur PV, Salameh, Dagher, développent cette méthode en insérant une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste du générateur PV. Sa tension V_{oc} est constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions du fonctionnement du panneau. Comme avec la méthode discutée dans la section 2.2.1, V_{oc} de la cellule pilote est multiplié par un certain facteur constant pour être comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction. [4],[14][15],

Cette méthode évite les problèmes provoqués par l'opération d'interruption de la rangée photovoltaïque, mais elle permet toujours l'ajustement de la tension de référence de l'asservissement lors des changements de facteurs importants tels que l'insolation et la température.

Si les différents panneaux solaires sont montés à différents angles, il serait nécessaire de placer une cellule pilote individuelle pour chacun d'eux. Puisque cette méthode emploie toujours un

facteur fixe pour estimer la tension optimale V_{mp} d'une valeur mesurée de V_{oc} , le MPP n'est toujours pas vraiment poursuivi.

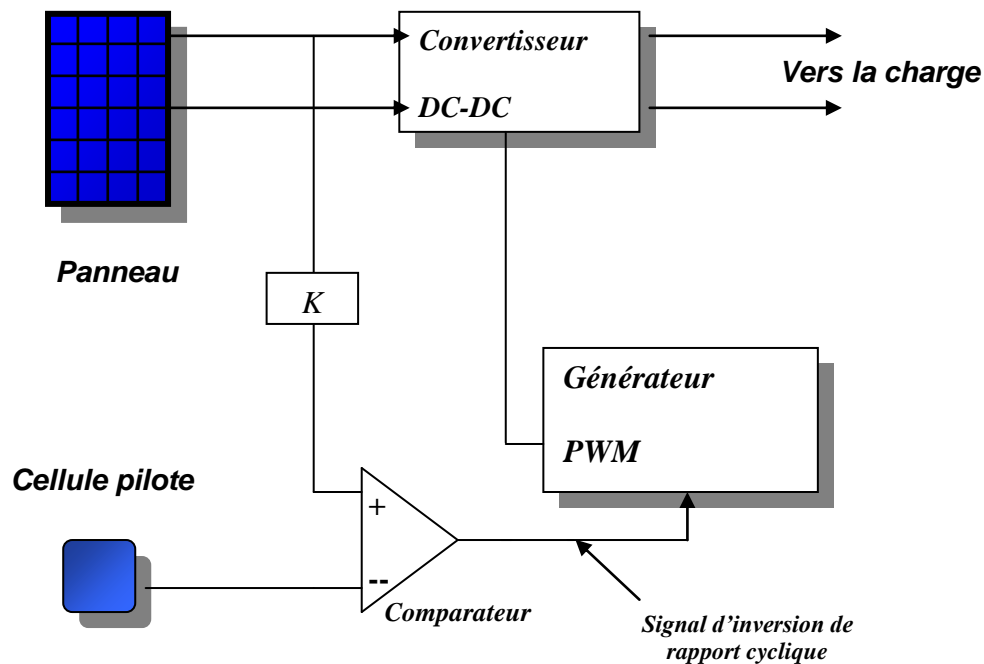


Figure 2.5. Schéma de principe de la méthode à contre réaction de tension avec cellule pilote proposée.

2.3. Méthodes à contre réaction de courant

On parlera de deux techniques qui sont la méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit I_{sc} et la méthode à maximisation du courant de sortie.

2.3.1. Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit I_{sc}

Par analogie avec la méthode de contre réaction de tension. Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de savoir la valeur de courant optimal pour laquelle le panneau doit fonctionner pour extraire le maximum de puissance. Le courant optimal est proportionnel au courant de court circuit, cette proportionnalité n'est pas constante mais elle est variable en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.

Dans ce cas, on a deux cas de fonctionnement : soit on choisit une pondération constante, choisie à priori pour récolter un maximum de puissance selon les conditions de fonctionnement fréquentes, soit on corrige ce rapport en fonction des conditions atmosphériques de fonctionnement. La méthode à tension de référence fixe n'est pas applicable dans le cas de la

contre réaction de courant à cause de la grande déviation de courant optimal pour différents ensoleillements et températures, voir Figure 2.2.

Dans cette méthode l'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information de courant de court circuit de l'ensemble des panneaux est impossible car le fait de court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire ce qui va fausser l'information générée par cette cellule et sa destruction rapide.

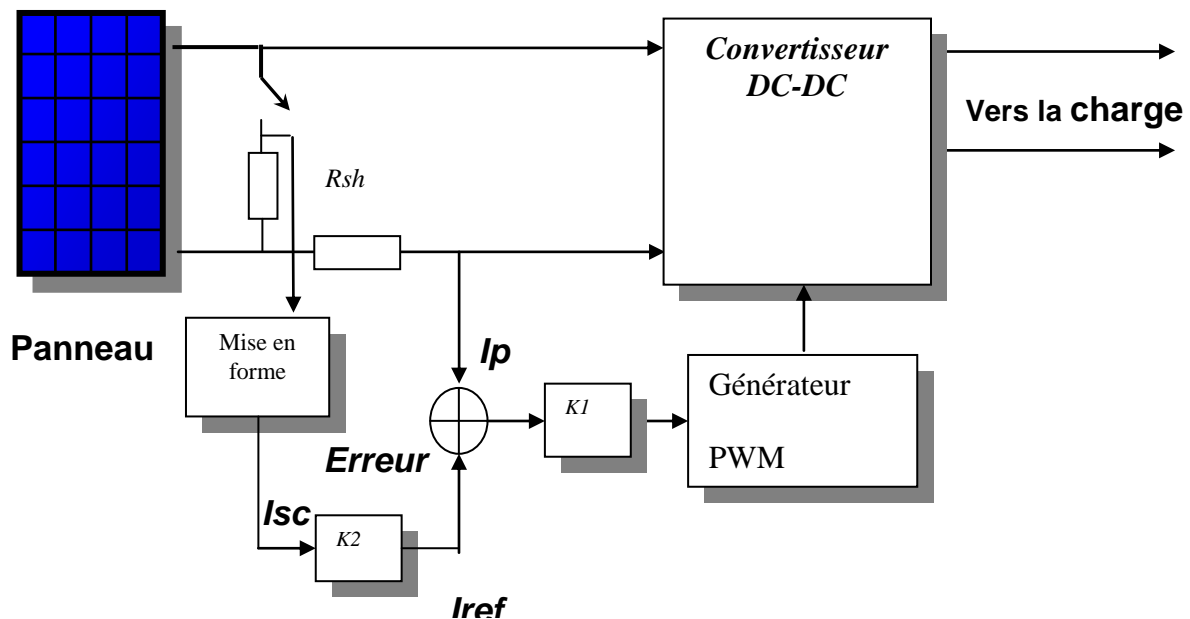


Figure 2.6. Principe de la méthode de tracking à courant de référence en fonction de I_{sc} .

2.3.2. Méthode à maximisation du courant de sortie

Cette méthode a été présentée par Sullivan et Powers, en utilisant une mesure du courant pour avoir l'information sur le point de fonctionnement qui lui correspond.

Cette méthode est fondée sur le fait que la charge étant constituée par des batteries, la tension de la charge est approximativement constante, c'est à dire que la maximisation de la puissance de sortie revient à maximiser le courant de charge de la batterie.

En terme mathématique, cela est vrai si $\frac{dP}{dI}$ est borné et strictement supérieur à zéro, cela peut être exprimé comme suit : [4], [16]

$$0 < \frac{V}{I} + \frac{dV}{dI} < \infty \quad (2.3.1)$$

Cette relation est vraie dans le cas d'une charge de très faible résistance ou une batterie mais si la charge est constituée d'un autre convertisseur ou un moteur à courant continu, la dérivée $\frac{dP}{dI}$ est nulle au point *MPP* alors c'est impossible de trouver le MPP à partir du courant seulement. La maximisation est réalisée par la minimisation du dI seulement par des procédés analogiques ou par l'utilisation d'un microcontrôleur.

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité par rapport aux méthodes de tracking par maximisation de puissance, où on a moins de calculs ainsi on évite les multiplications et les divisions qui engendrent des exceptions qu'ils doivent être traités.

Cette méthode a l'inconvénient qu'elle ne traque pas exactement le point de puissance maximale mais il existe un certain décalage par rapport à ce point, c'est la cause de l'approximation précédente, cette déviation est de plus en plus minimisée par le branchement des batteries en parallèle.

2.4. Méthodes à contre réaction de puissance

Cette méthode est fondée essentiellement sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption du fonctionnement de système.

Le principe des commandes MPPT est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant V_{PV} lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV} lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est négatif. Au final, le système oscille autour de la puissance maximale. Tout fois le point MPP n'est jamais atteint, ce qui engendre des formes de bruit au circuit.

Lors de la phase de démarrage ou en régime permanent, ces commandes doivent comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point optimal est trouvé, à la manière d'osciller autour de ce même point, et à la robustesse pour éviter les divergences lors des changements brutaux d'ensoleillement ou de charges.

Dans la suite, on parlera des différents algorithmes numériques adoptés pour la MPPT. [16], [17]

2.4.1. Méthode Perturbation et observation (P&O):

La méthode de P&O est la plus répandue dans le milieu industriel car son algorithme est facile à implémenter.

Elle utilise un microprocesseur avec les valeurs de la tension V et du courant I du panneau comme ses valeurs d'entrée et la tension désirée du fonctionnement V_{ref} en tant que sa valeur de sortie.

Une autre configuration possible est de laisser le microprocesseur générer directement le rapport cyclique d par PWM pour commander le convertisseur DC-DC. Ceci rend la boucle de contre réaction supplémentaire de commande de tension facultative.

Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension du fonctionnement du panneau et en observant son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure 2.7 montre l'organigramme de l'algorithme de la P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

Comme il est montré sur la figure 2.7, V et I sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur obtenue à partir de la dernière mesure $P(k-1)$. Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que dans le dernier cycle. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

Avec cet algorithme, la tension du fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} du fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

[4], [18]

➤ Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions du fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

➤ Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur pour la largeur idéale du pas C_p dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

Dans le cas d'une augmentation soudaine de l'insolation S l'algorithme de P&O réagit comme si l'augmentation s'est produite en raison de la perturbation précédente de la tension du fonctionnement de rangée. La prochaine perturbation, sera dans la même direction que la précédente.

Supposant que le système avait oscillé autour du MPP, on peut remarquer sur la figure 2.8 qu'une perturbation continue dans une direction mènera à un point de fonctionnement loin par rapport au MPP réel. Ce processus continue jusqu'à ce que l'augmentation de l'insolation ralentisse ou finisse.

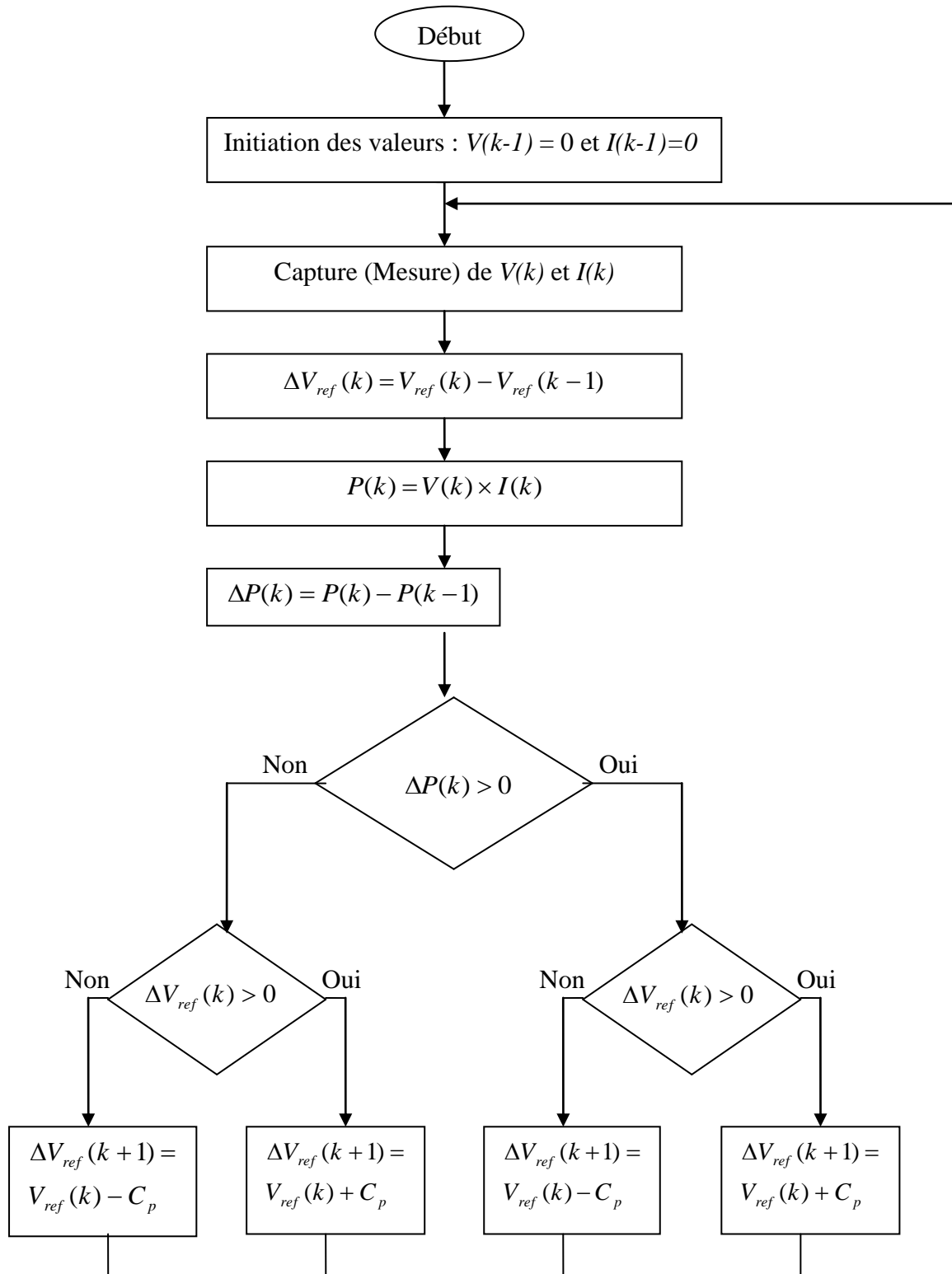


Figure 2.7: Organigramme de l'algorithme MPPT P&O (C_p est la largeur du pas de perturbation).

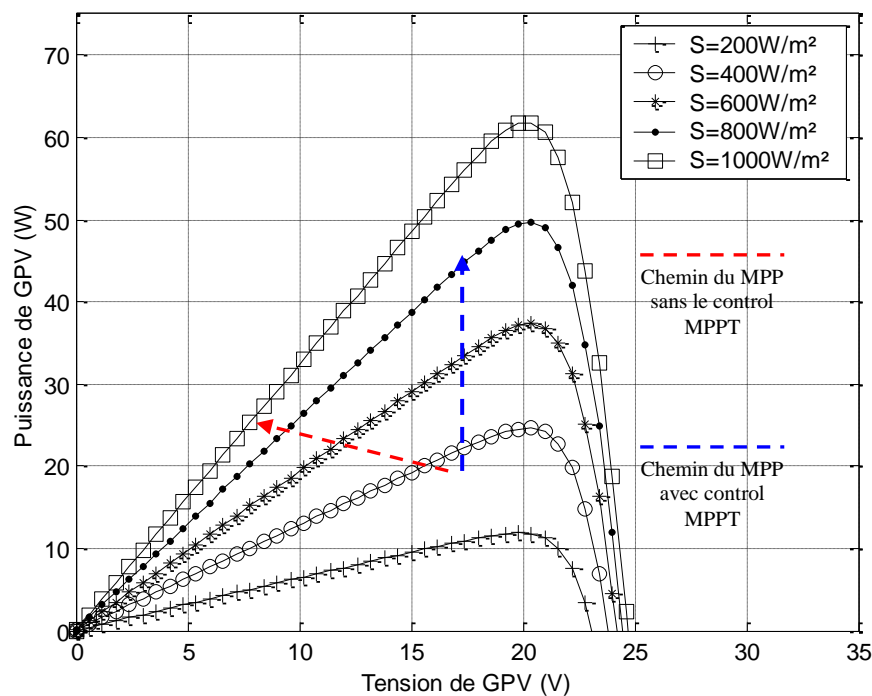


Figure 2.8. Déviation du MPP avec l'algorithme de P&O lors de changement rapide des niveaux d'insolation S .

Quand l'environnement où les conditions atmosphériques et le niveau d'insolation changent rapidement, ils peuvent provoquer une déviation du MPP qui peut causer une perte de puissance significative. Un véhicule mobile représente un tel environnement. Les changements rapides des niveaux S d'insolation sur une rangée photovoltaïque montée sur un véhicule sont non seulement provoqués par des nuages et des ombres du dépassement des bâtiments ou de la végétation, mais également par le changement d'angle d'insolation sur la rangée comme la voiture qui se déplace autour des courbes et des coins.

2.4.2. L'algorithme amélioré de P&O

Pour parer aux inconvénients de la méthode P & O, HANNES propose une solution au problème de la déviation du MPP pendant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation. Il présente une nouvelle condition dans la branche 'OUI' de la condition $\Delta P(k) > 0$ dans l'organigramme de l'algorithme de P&O (la figure 2.7).

Si la puissance de sortie a augmenté deux fois pendant les deux derniers cycles ou si la direction de la perturbation a été la même pour les deux dernières étapes, la direction de la perturbation de la tension de sortie est renversée. Le tableau 2.9 montre la table de vérité pour cet algorithme amélioré avec les 16 états possibles du MPPT et le choix résultant du prochain $\Delta V_{ref}(k+1)$. Le tableau 2.9 montre deux cas de conditions. Celles-ci se produisent quand la puissance de sortie

augmente deux fois durant deux étapes consécutives dans la même direction de la perturbation. Dans ce cas-ci, il se pourrait que le système dévie du MPP comme indiqué sur la figure 2.8.

Par conséquent la nouvelle condition du contrôle comme proposée par HANNES a été incluse dans l'algorithme de P&O. Si l'augmentation de puissance de sortie est provoquée par la perturbation de la tension de sortie et pas par une augmentation de l'insolation, la valeur pour $P(k)$ diminuera avec cet état du contrôle proposé dans la direction opposée.

Si l'augmentation de puissance de sortie est provoquée par une augmentation de l'insolation, la puissance augmentera toujours même avec cette inversion de la perturbation. Par conséquent le système oscillera autour de son point précédent de fonctionnement jusqu'à ce que l'augmentation de l'insolation finisse. [4], [11]

$\Delta V_{ref}(k-1)$	$\Delta P(k-1)$	$\Delta V_{ref}(k)$	$\Delta P(k)$	Etat de système	$V_{ref}(k+1)$
-	-	-	-	invalide	+
-	-	-	+	invalide	+
-	-	+	-	Diminution de S	-
-	-	+	+	$V_p < V_{mp}$	+
-	+	-	-	$V_p \approx V_{mp}$	+
-	+	-	+	Nouvelle condition	+
-	+	+	-	$V_p > V_{mp}$	-
-	+	+	+	Augmentation de S	-
+	-	-	-	Diminution de S	+
+	-	-	+	$V_p > V_{mp}$	-
+	-	+	-	invalide	-
+	-	+	+	invalide	-
+	+	-	-	$V_p < V_{mp}$	+
+	+	-	+	Augmentation de S	+
+	+	+	-	$V_p \approx V_{mp}$	-
+	+	+	+	Nouvelle condition	-

Tableau 2.9. Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation améliorée'.

Le comportement exact du système avec cet algorithme amélioré de la P&O sera discuté avec les simulations effectuées sur Simulink® en chapitre 3.

2.4.3. La méthode d'incrément de la conductance

Pour remédier aux inconvénients de la méthode MPPT P&O, un algorithme a été mis au point et appelé algorithme d'incrément de la conductance. Il est basé sur le fait que la dérivée de la puissance P de sortie par rapport à la tension V de panneau est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP). Les caractéristiques du panneau photovoltaïque sur la figure 2.4.8 prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant: [18], [19]

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad \text{pour } V = V_{mp}; \quad (2.4.1)$$

$$\frac{dP}{dt} > 0 \quad \text{pour } V < V_{mp}; \quad (2.4.2)$$

$$\frac{dP}{dt} < 0 \quad \text{pour } V > V_{mp} \quad (2.4.3)$$

Sachant que $P = I \cdot V$, la dérivée du produit par rapport à V donne :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}. \quad (2.4.4)$$

La combinaison des équations (2.4.1) et (2.4.4) mène à l'état du MPP ($V = V_{mp}$) en fonction de la tension V et le courant I du panneau:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}. \quad (2.4.5)$$

Donc pour déterminer La position du MPP, on a qu'à mesurer les accroissements de conductances dI/dV et les conductances I/V de rangée. Ce qui a permet de développer l'algorithme d'incrémentatation de la conductance comme représenté sur la figure 2.10.

L'algorithme est mis en application avec un microprocesseur commandant l'entrée d du convertisseur DC-DC directement ou en plaçant la tension de référence V_{ref} pour un circuit de contrôleur de contre-réaction de tension.

Comme vu sur la figure 2.10, la méthode d'incrémentatation de Conductance utilise juste deux sondes pour la mesure de la tension V de fonctionnement et du courant I du panneau. Les changements par accroissement nécessaires dV et dI sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour V et I à ceux mesurés durant le cycle précédent:

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1), \quad (2.4.6)$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1). \quad (2.4.7)$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, \quad (2.4.8)$$

Et

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}. \quad (2.4.9)$$

Si (2.4.8) est vrai, le système fonctionne au MPP et aucun changement de la tension de fonctionnement n'est nécessaire. Si (2.4.8) est faux, l'équation (2.4.9) avec (2.4.2) et (2.4.3) sont employés pour déterminer si le système fonctionne à une tension plus grande ou inférieure à V_{mp} .

La tension de fonctionnement est ajustée en conséquence. Si le système fonctionnait au MPP

pendant le cycle précédent, le changement par accroissement de la tension de fonctionnement sera zéro ($dV(k) = 0$). Ceci mènerait à une division par l'erreur zéro.

Pour éviter un arrêt du système, cette condition est vérifiée d'abord et mène, si vrai, à un autre branche dans l'algorithme avec d'autres essais sur les changements possibles des conditions de fonctionnement du panneau. Puisque la tension n'a pas changé, les seules informations utiles sur les changements possibles peuvent être obtenues de la mesure du courant et de son changement par accroissement dI . Si dI est égal à zéro, les conditions de fonctionnement n'ont pas changé et donc l'ajustement de la tension du système est évité. Si $dI \neq 0$, les équations (2.4.2) et (2.4.3) sont employés pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de V_{mp} et un ajustement correspondant à la tension de fonctionnement sera réalisé en conséquence.

Pour éviter que la différence dV de la tension du panneau devienne nulle, provoquée lorsque le MPP est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation de point de fonctionnement, ce qui conduit en une division par zéro. L'algorithme fait un test de dV , s'il est nulle il test si le $dI = 0$ si le cas alors le MPP est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme test le signe de dI pour déterminer la position de l'MPP et d'ajuster la tension de référence correspondante, la figure 2.10 donne l'organigramme de cet algorithme.

Cet algorithme se stabilise une fois le MPP est atteint. Le signe de dI donne la vraie direction à empruntée pour la recherche du MPP une fois le système est stable, ce qui donne une réponse rapide de système pour des changements brusques des conditions atmosphériques.

Toutefois à cause de l'approximation des dérivés dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action constante, la condition $\frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV}$ est rarement vraie ce qui conduit à des oscillations autour de l'MPP, pour remédier à ce problème une erreur marginale ε est ajoutée à la condition de l'MPP, c'est à dire que le MPP est atteint si $\left| \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \right| \leq \varepsilon$, la valeur de ε est limitée au problème de l'amplitude des oscillations. [3].

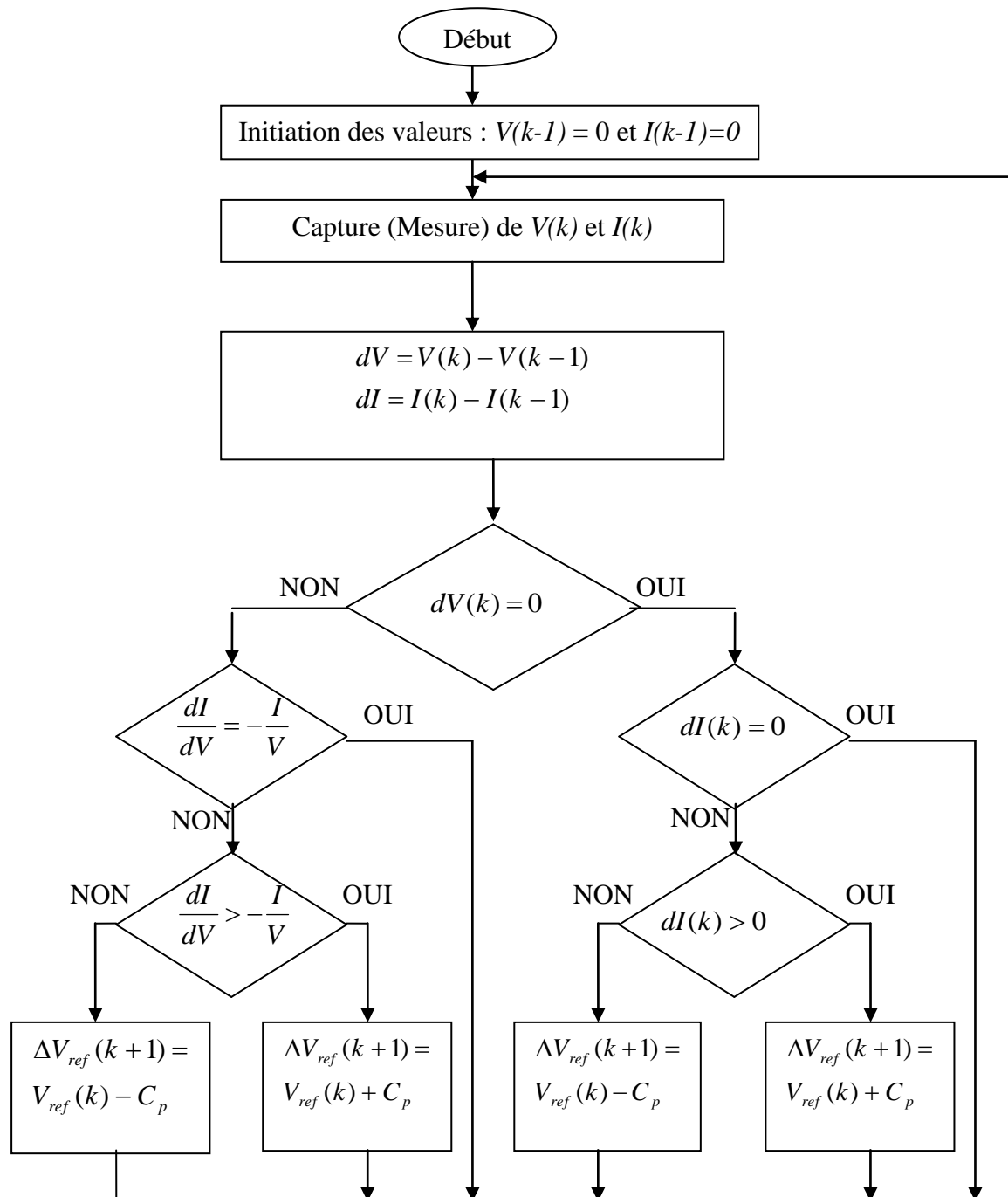


Figure 2.10. Organigramme de l’algorithme MPPT de l’incrémentatation de la conductance.

(C_p est le pas de la correction de la puissance de sortie vers le MPP)

2.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a cité quelques méthodes de la recherche du point de puissance maximale, qui nous permet d’améliorer le rendement de système. On remarque que chaque méthode présentait des avantages et des inconvénients.

L’étape suivante sera dédiée à la simulation des méthodes P&O, P&O améliorée, incrémentatation de la conductance et la méthode de contre-réaction de tension utilisant une cellule pilote.

CHAPITRE 3

SIMULATION ET EVALUATION DES MÉTHODES MPPT

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons les différents résultats de simulation des quatre méthodes de la recherche de point maximum de puissance MPPT, en utilisant un convertisseur DC-DC de type Boost.

La simulation est réalisée à l'aide de logiciel SIMULINK- MATLAB R2007b. ce dernier permet de simuler des systèmes comportant des parties continues (panneau solaire, batterie, MPPT analogique, convertisseur DC-DC) et discrètes (les méthodes de tracking algorithmiques).

Le SIMULINK nous permet aussi de changer volontairement les conditions atmosphériques (ensoleillement, température) afin d'évaluer la trajectoire de recherche du MPP, pour différentes techniques MPPT, vis-à-vis des changements brusques ou lentes de ces conditions. Il nous donne la possibilité de faire des changements des paramètres de système afin d'observer son comportement.

Dans le cadre de cette étude, la chaîne de conversion Photovoltaïque été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK. Elle est composée de blocs fonctionnels programmés et simulés qui sont :

- « GPV », simulant le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque,
- « Boost », simulant le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost,
- « Commande simulant la commande MPPT » appliquée a u convertisseur
- La charge égale á 100Ω .
- « Paramètres météo », définissant les conditions d'ensoleillement et de température extérieure.

On applique pour méthode les opérations suivantes :

1. le cas stable $1000\text{W}/\text{m}^2$ et 25°C .
2. changement linéaire de la température.
3. changement linéaire lent de l'ensoleillement.
4. changement linéaire brusque de l'ensoleillement.

3.2. Modélisation de la chaîne photovoltaïque sous MATLAB-SIMULINK

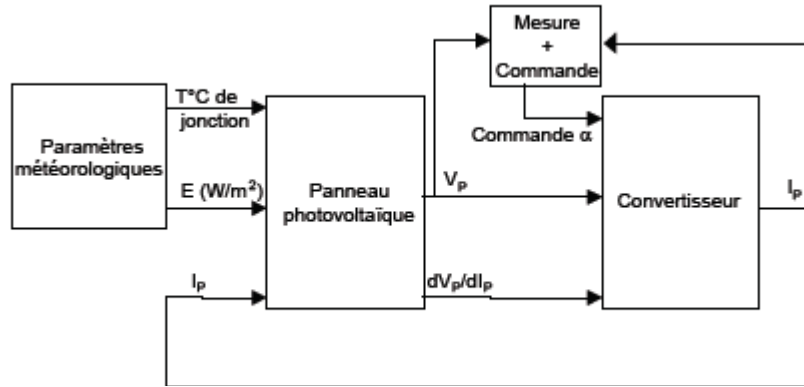


Figure 3.1. Modélisation Simulink de la chaîne photovoltaïque.

3.2.1. Modélisation d'un Panneau photovoltaïque sous MATLAB.

Nous mettons en équation dans ce bloc un panneau comportant 36 cellules en série, en faisant l'hypothèse que toutes ces cellules sont identiques.

Grâce à ce modèle, la tension V_p du panneau est calculée à partir du courant de panneau I_p , de l'ensoleillement I_{CC} et de la température du panneau T .

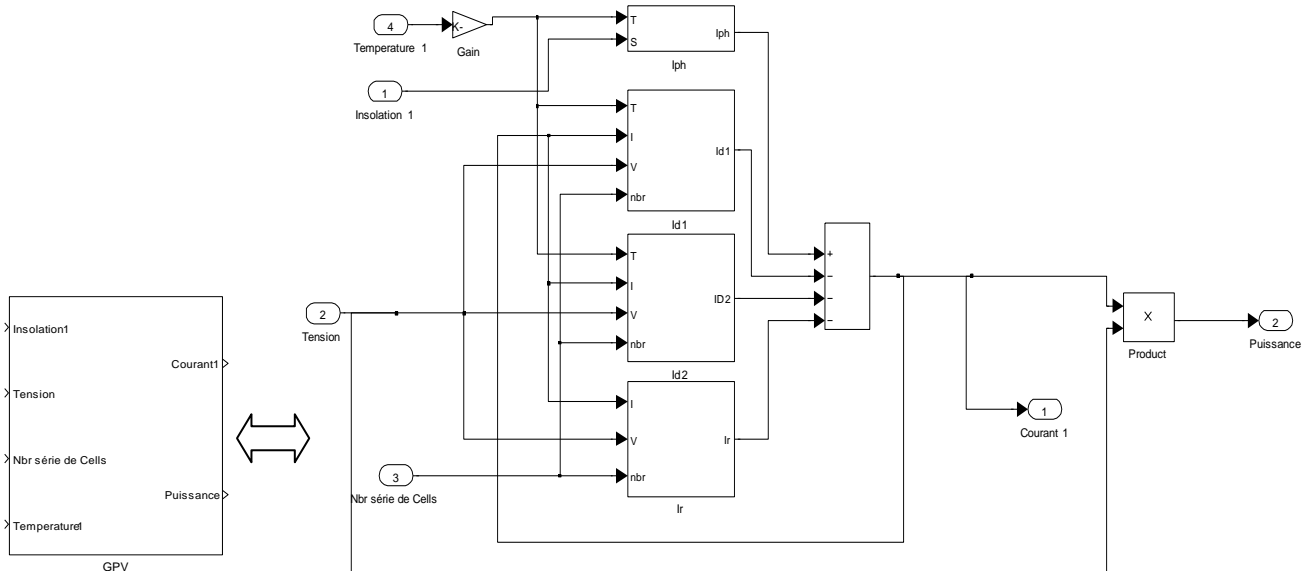


Figure 3.2. Modélisation Simulink de la chaîne photovoltaïque.

Les blocs Id1 et Id2 et Iph représentent les courants de diode, et le photo courant produit I_{ph} . L'intercommunication de ces différents sous-ensembles nous donne le modèle final de simulation du panneau photovoltaïque.

3.2.2. Modélisation d'un convertisseur Boost sous MATLAB.

La simulation sous MATLAB (SIMULINK) nous a permis de modéliser le convertisseur boost, comme le montre la figure 3.3, en se basant sur les équations qui régissent ce type de convertisseur et qui sont mentionnées dans le chapitre 1.

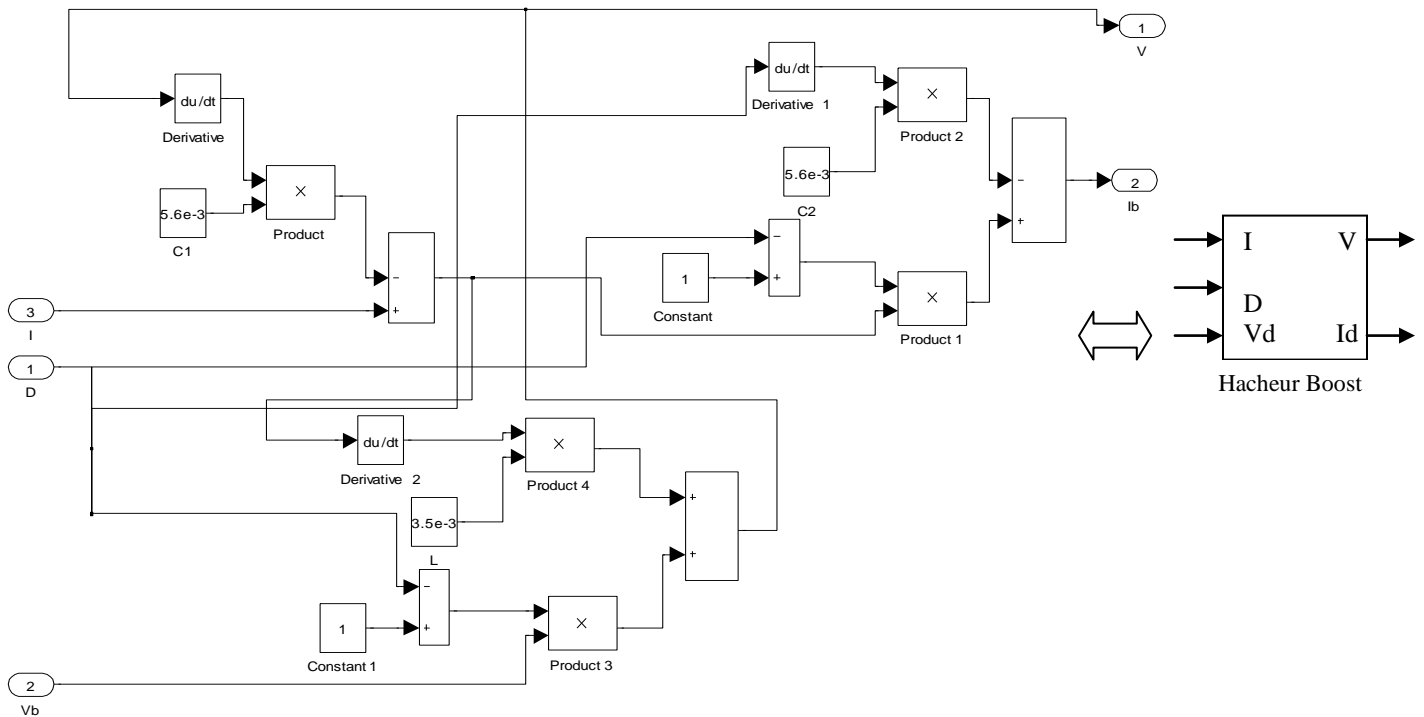


Figure 3.3: Schéma fonctionnel pour la simulation du convertisseur Boost sous Matlab.

3.3. Simulation du système global et interprétation de résultats :

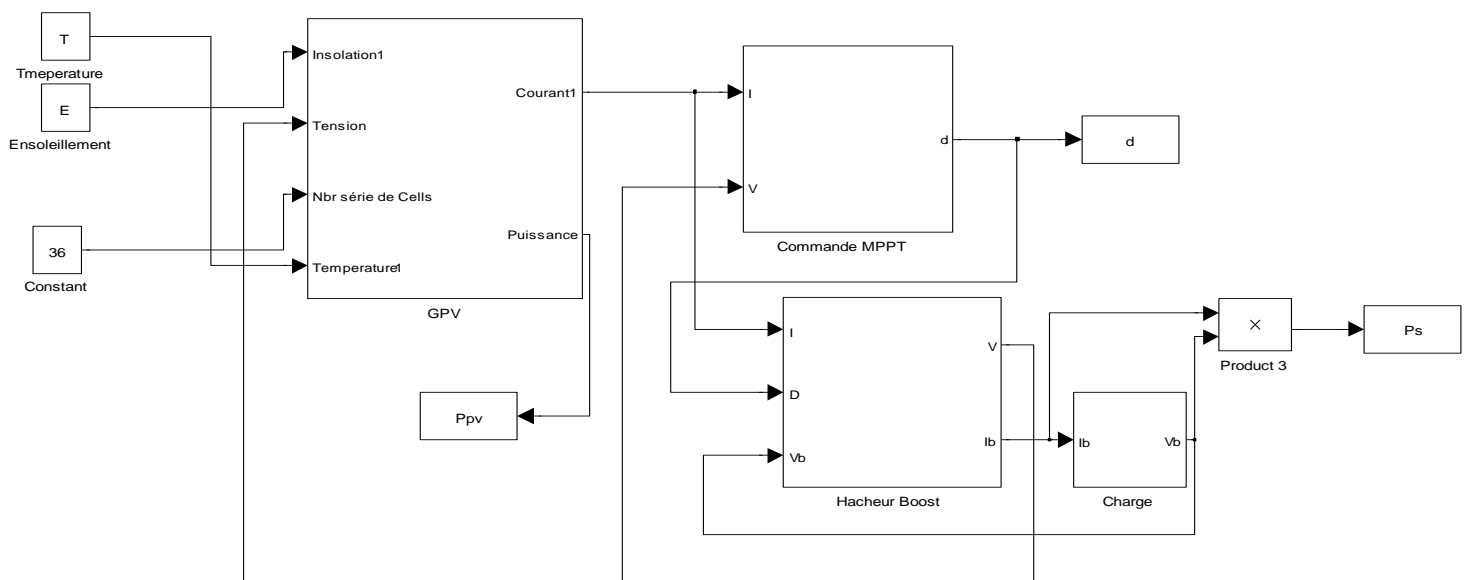


Figure 3.4. Block diagramme de modèle de simulation de système photovoltaïque.

La seule manière d'évaluer le fonctionnement d'un contrôleur digital dans un système analogique avant d'établir le prototype réel est la simulation.

Simulink® nous permet non seulement de simuler des systèmes (discret-continu) complexe, mais sous différentes conditions d'environnement tel que les changements de température et de l'ensoleillement afin d'analyser le comportement du système et d'évaluer les méthodes testées et choisir la méthode la plus appropriée.

Les méthodes proposées pour la simulation :

1. Utilisation de la cellule pilote.
2. La méthode d'incrémentatation de la conductance.
3. La méthode de perturbation et observation (P&O).
4. La méthode de perturbation et observation (P&O) améliorée.

Les opérations à effectuer dans le changement de l'environnement lors de la simulation sont :

1. Conditions d'environnement stable :

Il s'agit, dans ce cas, d'analyser le comportement du système sous cet environnement.

On fixe la température et l'insolation dans leurs valeurs standards c'est-à-dire respectivement à 25°C et 1000 W/m² et on observe la puissance de la charge et le rapport cyclique d engendré par le contrôleur MPPT.

2. Changement linéaire et lent de l'ensoleillement :

Dans ce cas on varie l'ensoleillement dans 3 périodes, la première période ([0, 1500]) : l'insolation est égale à 400 W/m², la deuxième période ([1500, 2500]) : l'ensoleillement varie linéairement de 400W/m² à 1000W/m², et la troisième période ([2500 3000]) : l'ensoleillement est fixé a 1000W/m².

3. Changement linéaire et rapide de l'insolation :

Dans ce cas l'ensoleillement E change comme suit :

La première période ([0, 350]) : E est égal à 400 W/m², la deuxième période ([350, 500]) : E varie linéairement de 300W/m² à 900W/m², et la troisième période ([500, 3000]) : E est fixé a 900W/m².

4. Changement linéaire de la température :

Dans ce cas on varie la température sur 3 intervalles de temps. pour la première période ([0, 1000]), la température est égale à 0°C. quant à la deuxième période ([1000, 1300]), la température varie linéairement de 0°C à 20°C. et pour la troisième période ([1300, 2000]), la température est fixée aux environs de 20°C.

3.3.1. La méthode de contre réaction de tension avec la cellule pilote

Cette méthode consiste à comparer la tension du panneau V_{GPV} à celle de la cellule pilote V_{CP} , qui est équivalente à la tension de circuit ouvert du panneau. Nous observons la déviation du point de fonctionnement par rapport au MPP pour en déduire l'efficacité du système.

3.3.1.1. Simulation sous un environnement stable :

Les conditions atmosphériques sont fixées à 25°C et $1000\text{ W}/\text{M}^2$. Selon la figure 3.5, on note que la courbe de la puissance du générateur photovoltaïque P_{PV} correspond exactement avec celle qui est transmise à la charge P_S , cela est dû au fait qu'on a implémenté un modèle idéal pour le hacheur BOOST.

Au régime permanent, la P_{PV} oscille autour de 67 W et P_S est égale à 66 W.

La figure 3.6 reflète la rapidité du système à converger au régime permanent. On note que le rapport cyclique oscille autour de 0.74 et l'efficacité est égale à 98.51%.

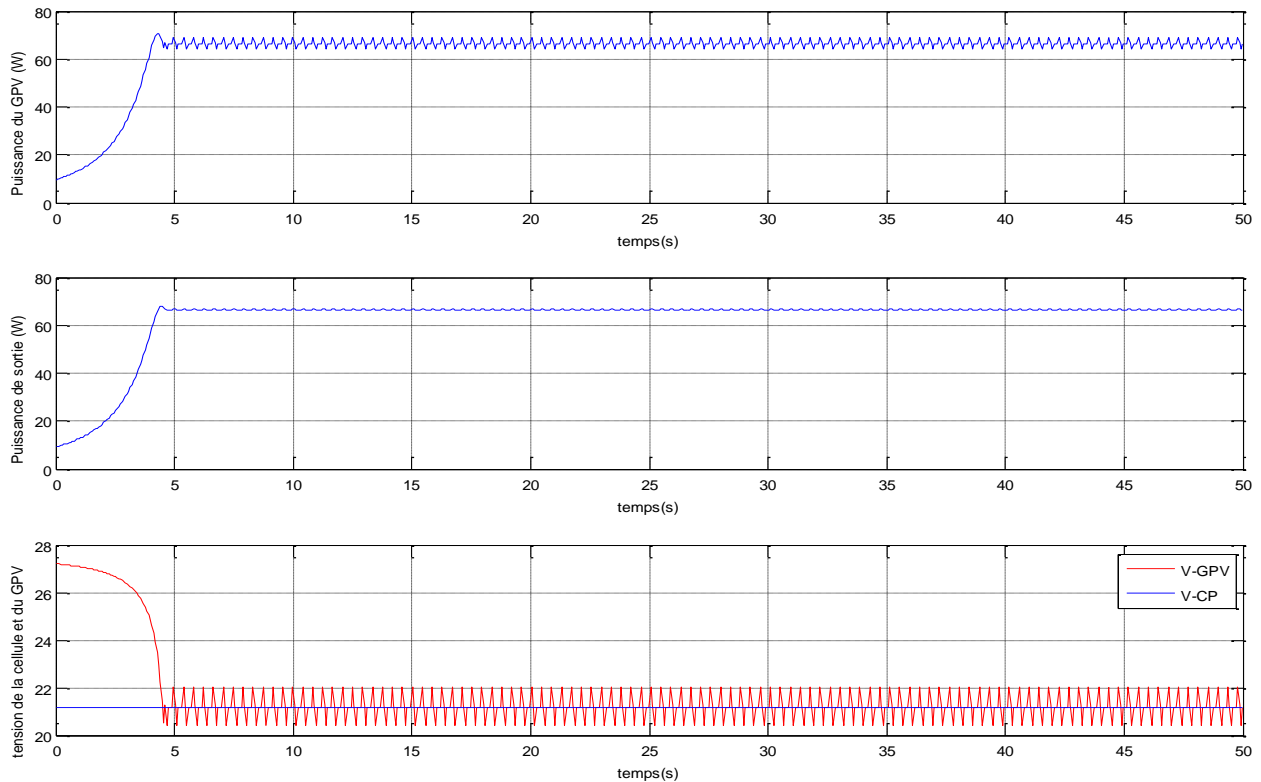


Figure 3.5. Courbes de P_{GPV} , P_S , V_{GPV} et V_{CP}

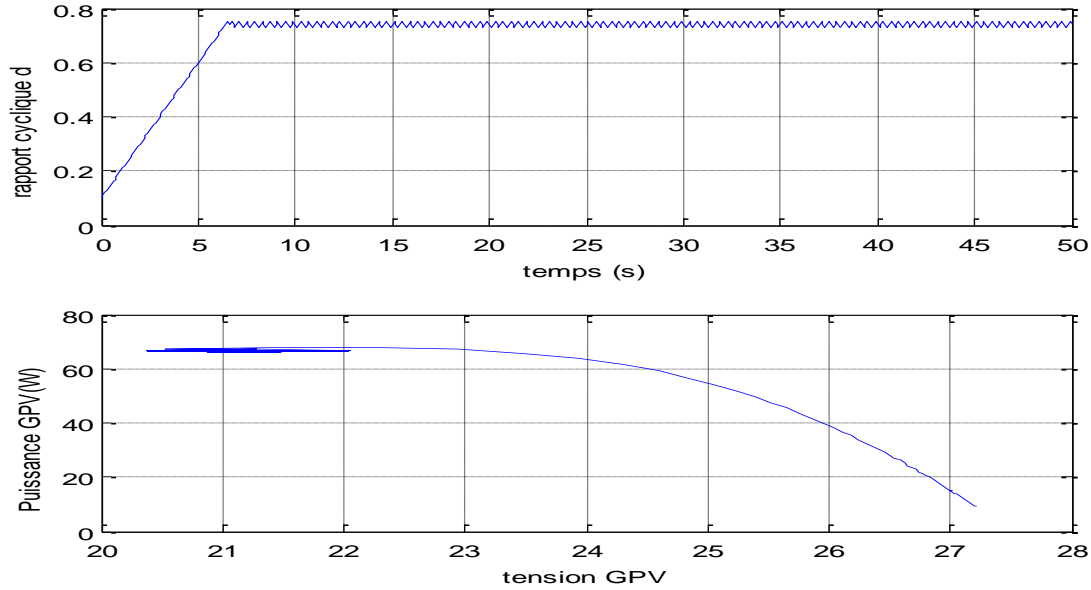


Figure 3.6. Courbes du rapport cyclique (d) , et de la puissance P_{GPV}

3.3.1.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E :

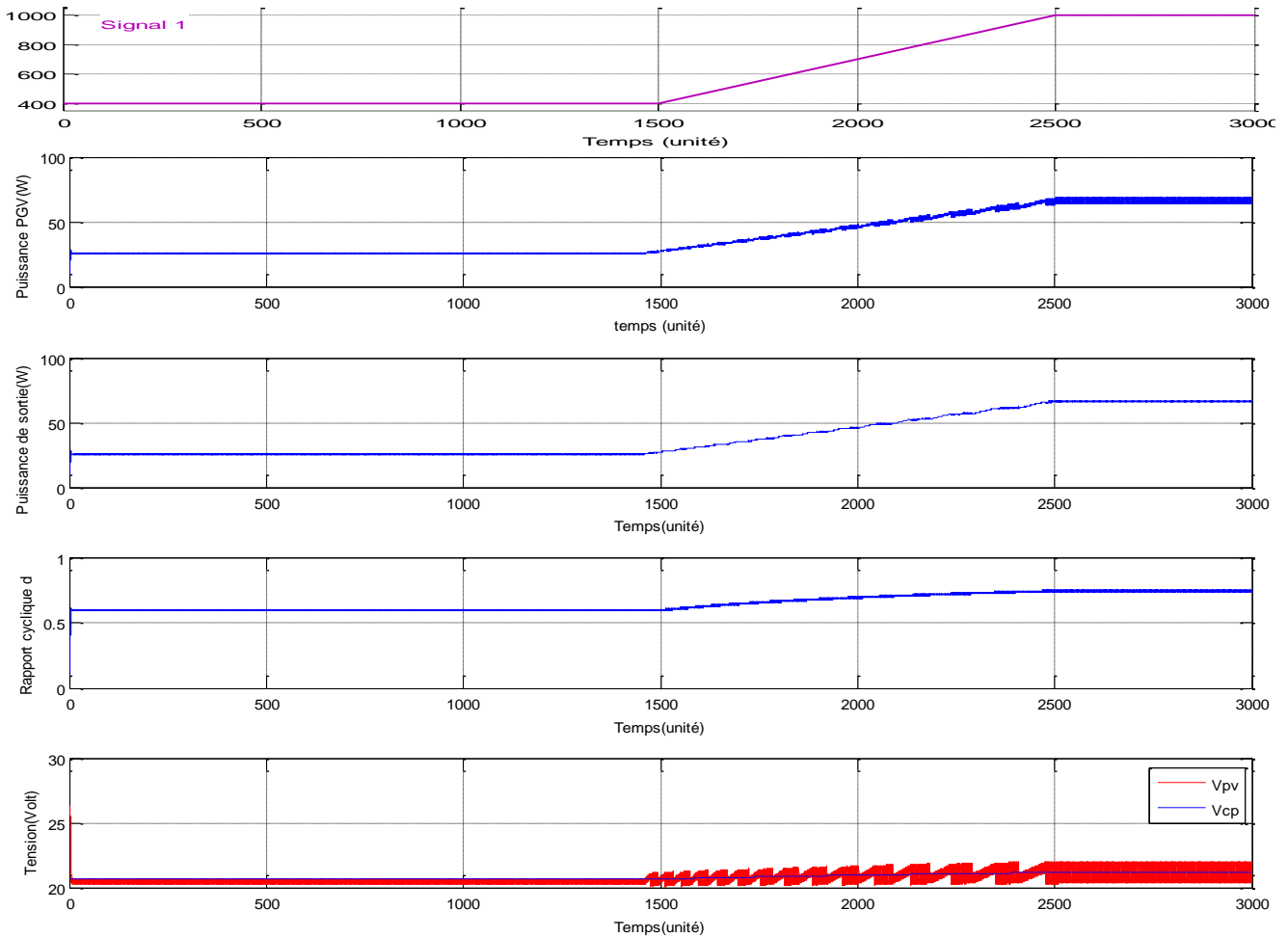


Figure 3.7. Courbes du rapport cyclique d , des puissances P_{PV} , P_s , et des tensions V_{cp} , V_{GPV} lors du changement lent de E.

Pour ce test, la température est maintenue à une température constante égale à 25°C. On remarque que lors du changement lent de l'insolation E, durant la période (1500-2500s), la réponse des signaux de puissance d'entrée et de sortie ainsi que du rapport cyclique suit la variation du E avec une fluctuation autour du point MPP. La figure 3.7 montre qu'une fois que E est fixé à 1000W/m², les signaux du **Ppv** et **Ps** se stabilisent respectivement 68W et 66.5W quant au rapport cyclique **d** il varie autour de 0.74.

3.3.1.3. Changement linéaire rapide de l'insolation E :

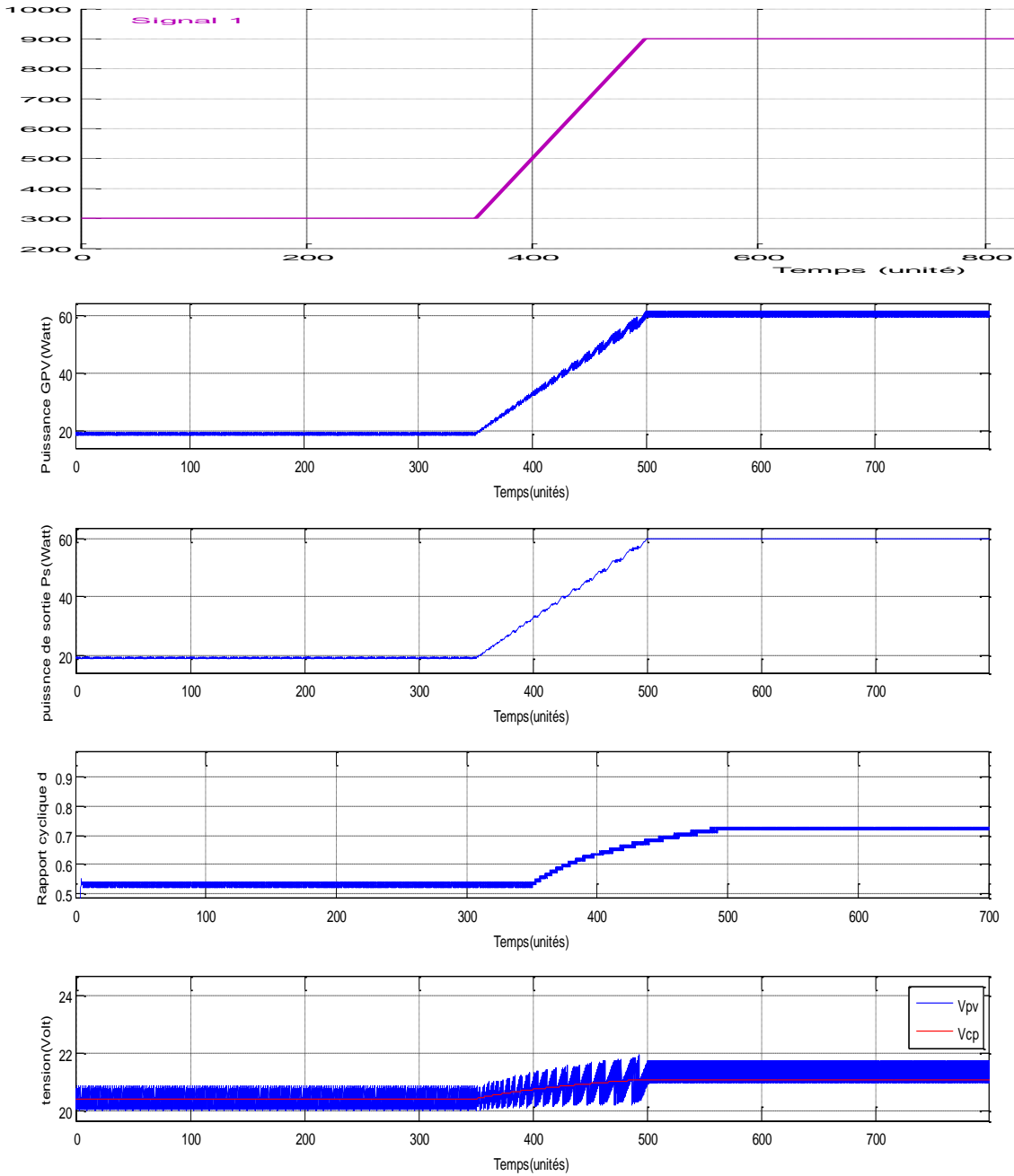


Figure 3.8. Courbes du rapport cyclique **d**, des puissances **P_{PV}**, **P_s**, et des tensions **V_{cp}** et **V_{GPV}** lors du changement de E brusque.

La figure 3.8 montre que le système répond immédiatement au changement rapide de l'ensoleillement, sans qu'il y est de chute de puissance ni du retard. Toute fois, on remarque les signaux de puissances et du rapport cyclique présentent des oscillations lors du ce changement.

3.3.1.4. Changement de la température :

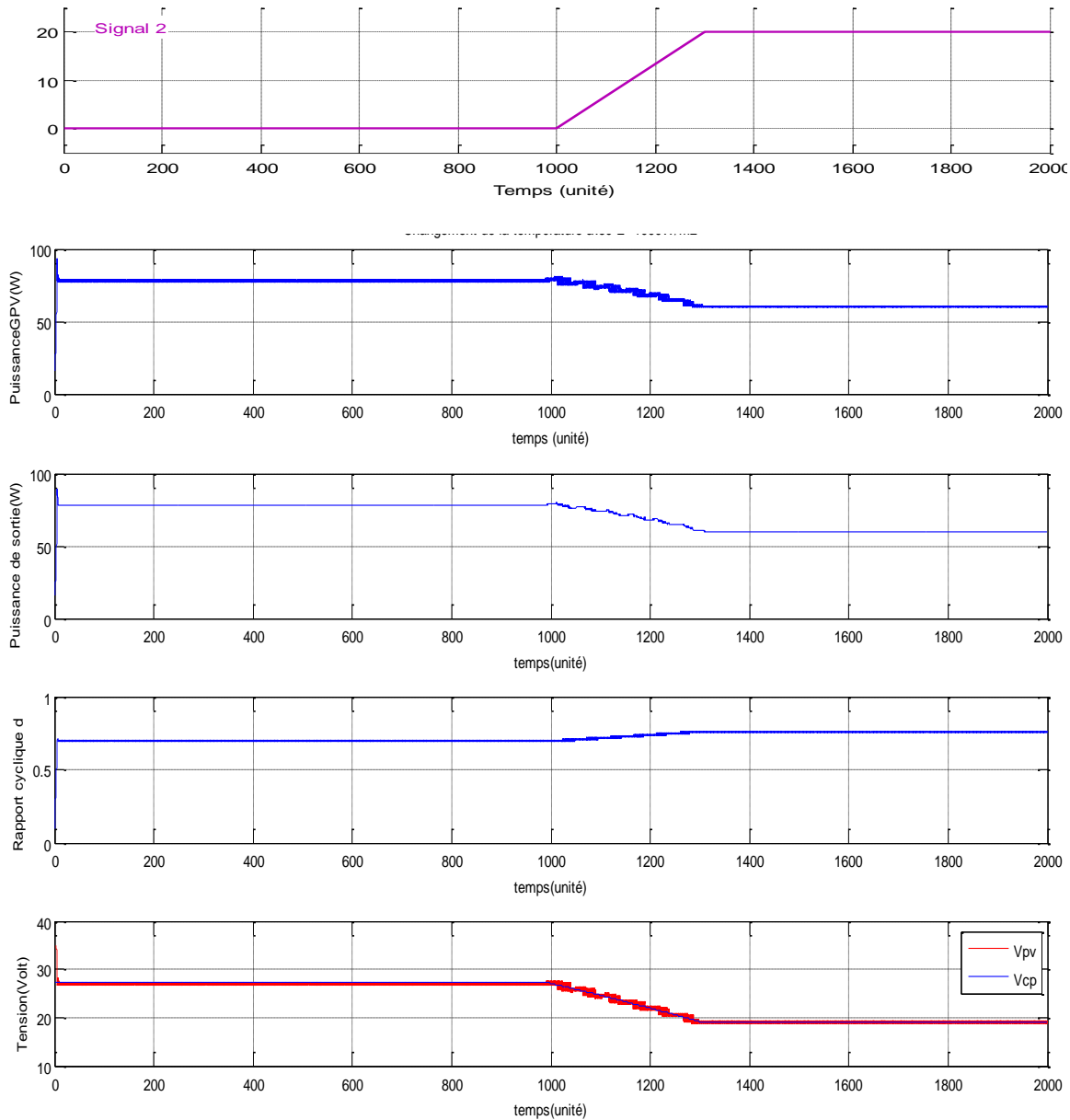


Figure 3.9. Courbes du rapport cyclique **d**, des puissances P_{PV} , P_s , et des tensions V_{cp} et V_{GPV} lors changement la température T .

Dans ce cas, l'ensoleillement est maintenu à $1000W/m^2$.

La figure 3.9 montre que le système répond convenablement au changement de la température T , sans qu'il y est de chute de puissance ni du retard.

3.3.2. Méthode d'incrémentation de la conductance

Cette méthode calcule la dP à partir de la tension du panneau V et sa dérivée dV , ainsi que le courant I et sa dérivée dI .

La conductance de la source : $G=I / V$.

L'incrémentation de la conductance : $\Delta G= dI/dV$.

Le point MPP est atteint lorsque $\Delta G= G$.

Cet algorithme permet d'atteindre le MPP en réduisant au maximum le taux d'ondulation.

3.3.2.1. Simulation sous un environnement stable :

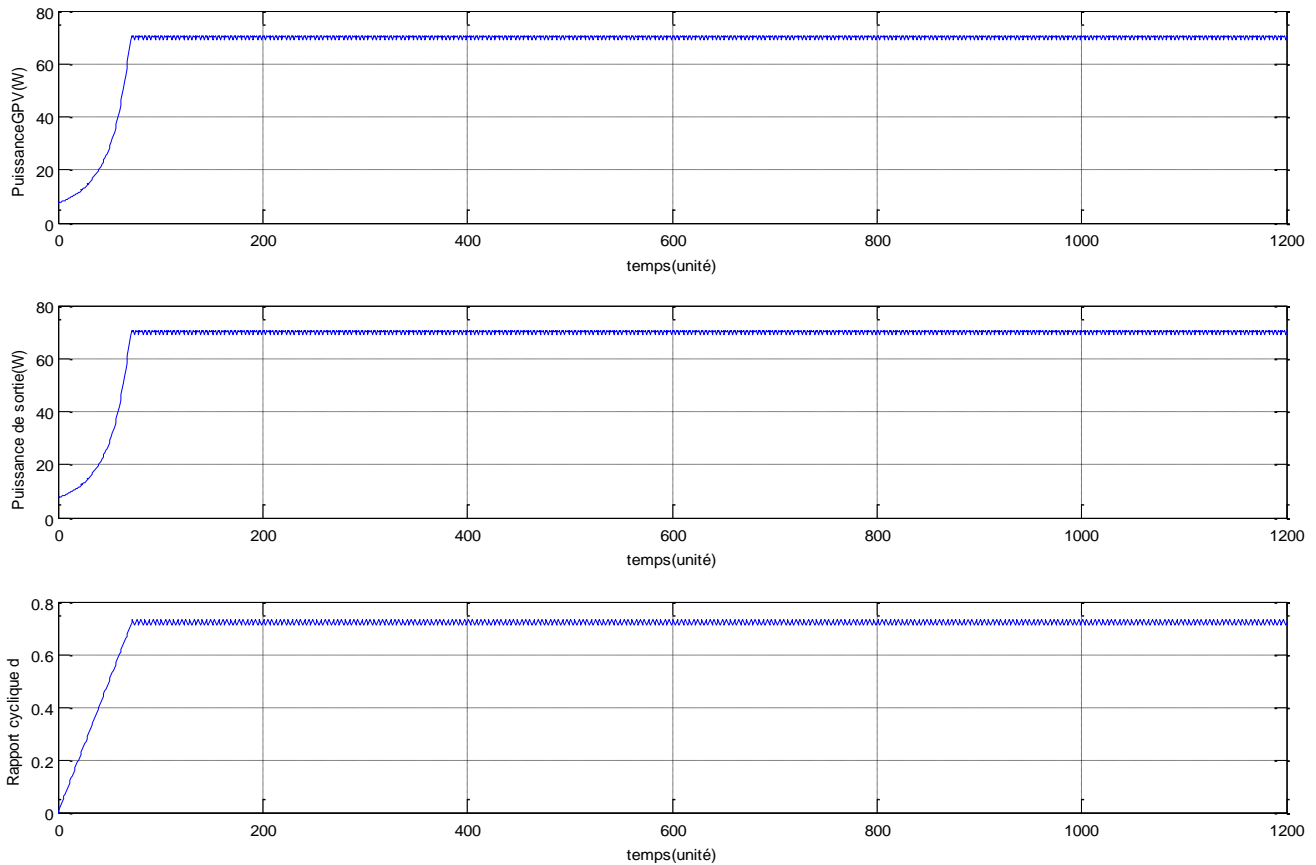


Figure 3.10. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie pour E et T constants.

Les conditions atmosphériques sont fixées à 25°C et $1000/\text{M}^2$.

Selon la figure 3.10, on note que la courbe de la puissance GPV coïncide avec la puissance de sortie transmise à la charge. Au régime permanent, la puissance GPV oscille autour du 70 W et la puissance de sortie est égale à 70 W. Cette figure reflète la rapidité du système à converger au régime permanent. On constate que le rapport cyclique oscille autour de 0.72 et l'efficacité est égale à 100%.

3.3.2.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E :

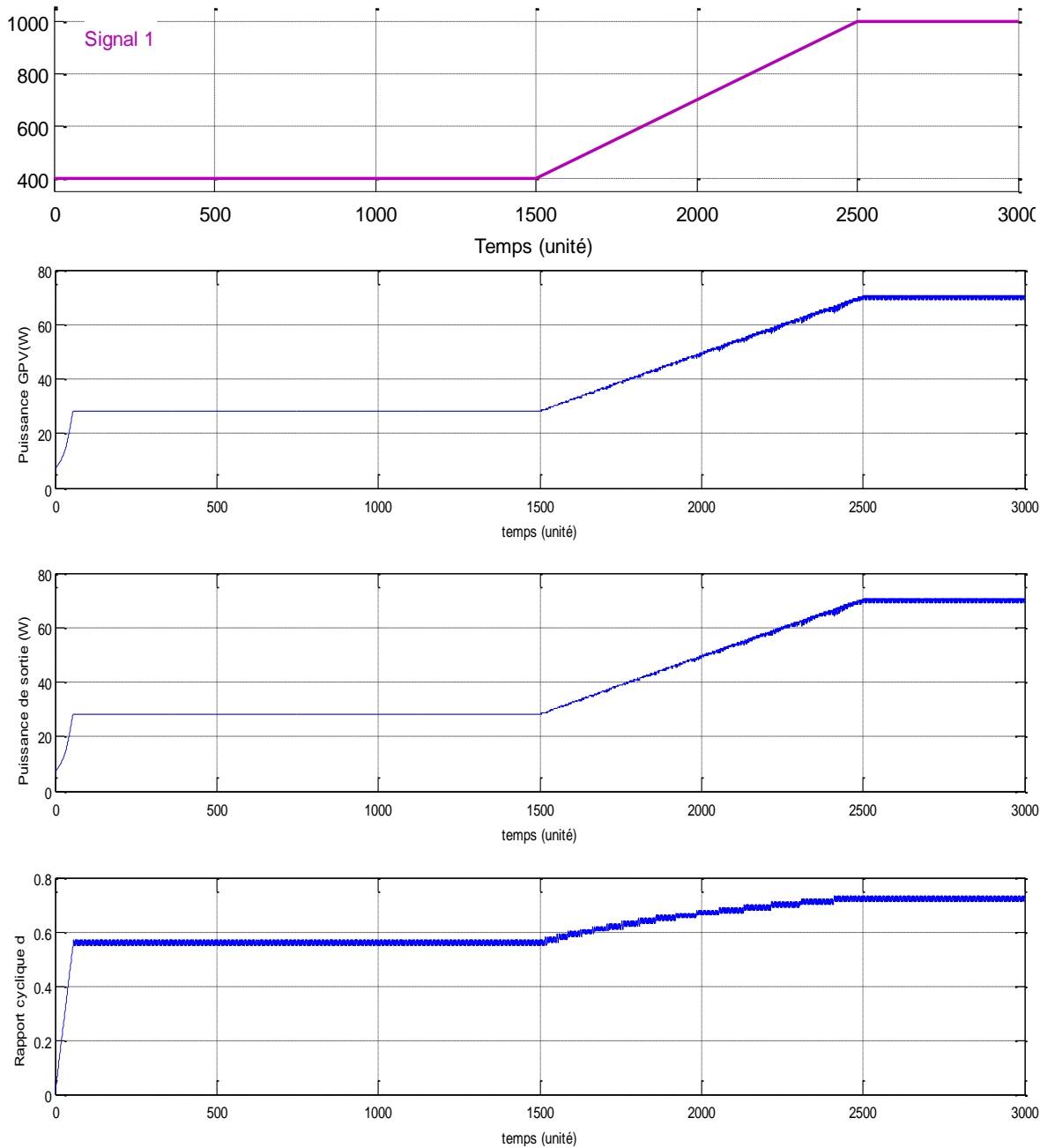


Figure 3.11. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie pour un changement lent de E

Pour ce test, la température est maintenue à une valeur constante égale à 25°C . On remarque que lors du changement lent de l'ensoleillement E, durant la période (1500-2500s), les signaux de puissance d'entrée et de sortie ainsi que du rapport cyclique suivent la variation du E avec une fluctuation autour du point MPP.

3.3.2.3. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E :

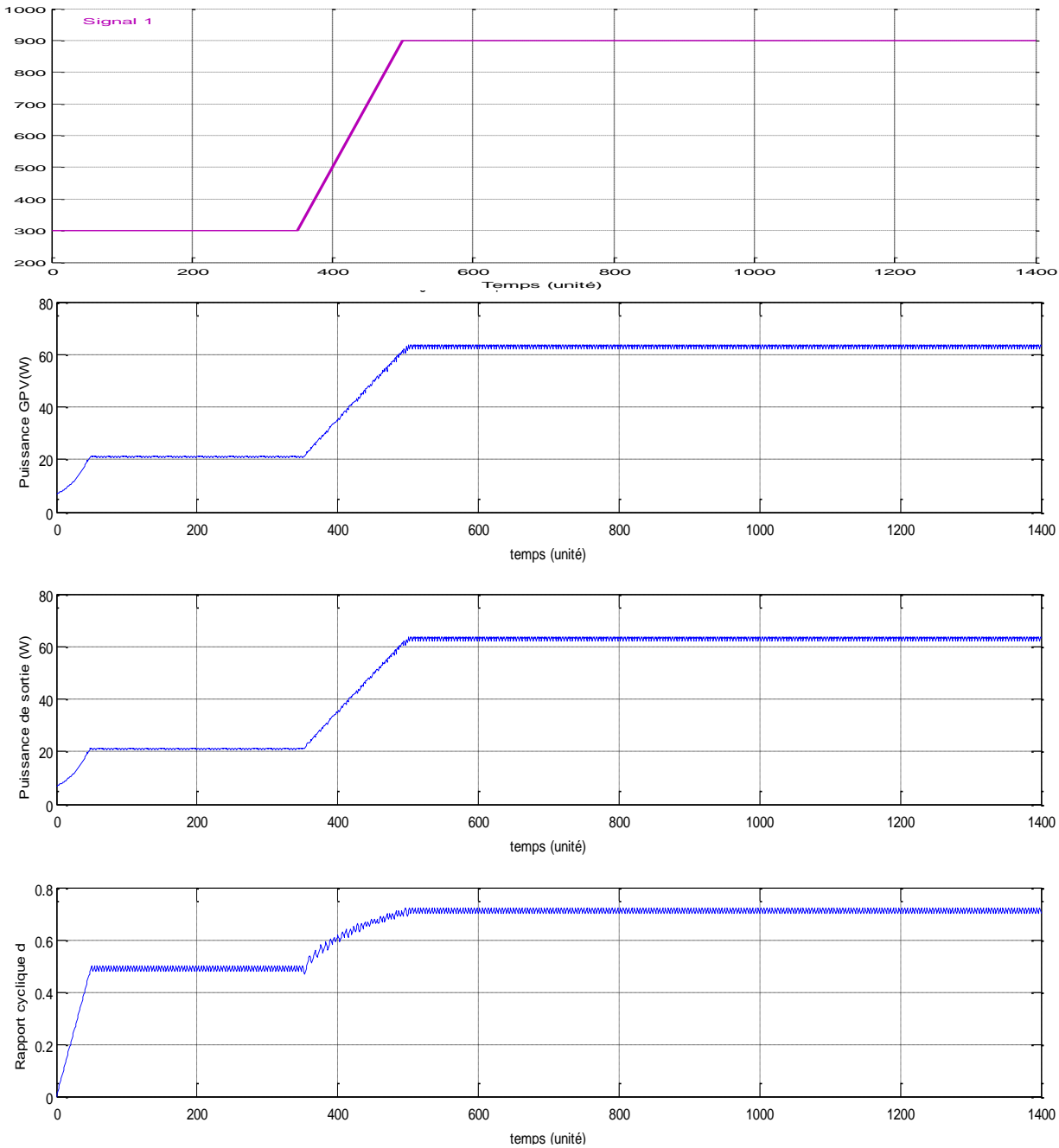


Figure 3.12. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie pour un changement brusque de E.

La figure 3.12 montre que le système répond immédiatement au changement rapide de l'ensoleillement, sans qu'il y est de chute de puissance ni du retard. Toute fois, on remarque les signaux de puissances et du rapport cyclique présentent des oscillations lors de ce changement. Lorsque E se stabilise à 1000W/m^2 , la puissance de sortie présente un taux d'ondulation plus élevé par rapport au cas précédent.

3.3.2.4. Changement de la température T :

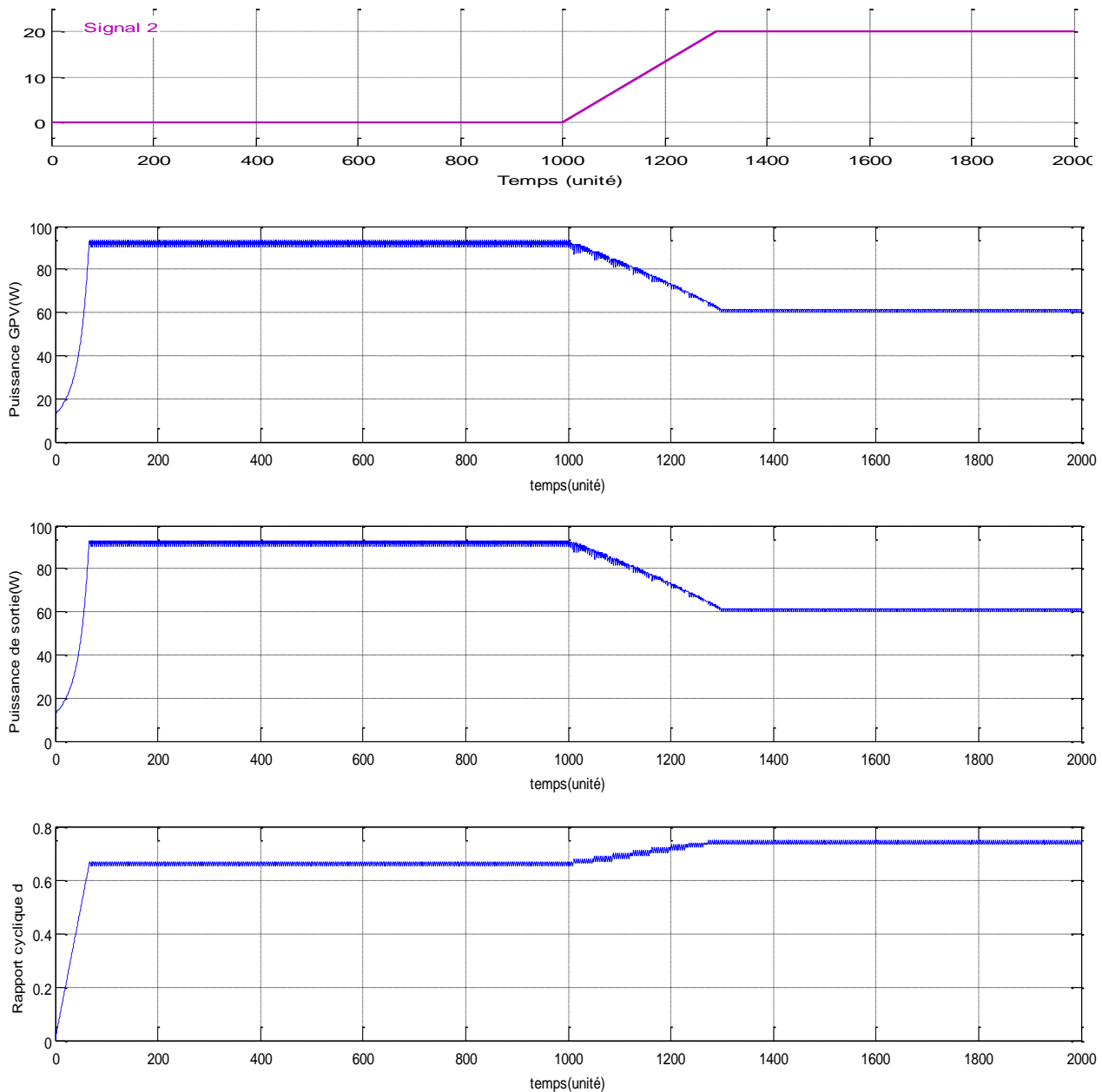


Figure 3.13. Courbes du rapport cyclique **d**, de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas de augmentation de T.

Dans ce cas, l'ensoleillement est maintenu à $1000W/m^2$.

La figure 3.13 montre que le système répond convenablement au changement de la température T, sans qu'il y est de chute de puissance ni du retard. Le rapport cyclique présente des fluctuations qui ont leur effet sur l'apparition des ondulations dans le signal de puissance de sortie.

La puissance GPV et la puissance de sortie chutent au fur et à mesure que la température augmente.

3.3.3. Méthode de la perturbation et l'observation P&O

3.3.3.1. Simulation sous un environnement stable :

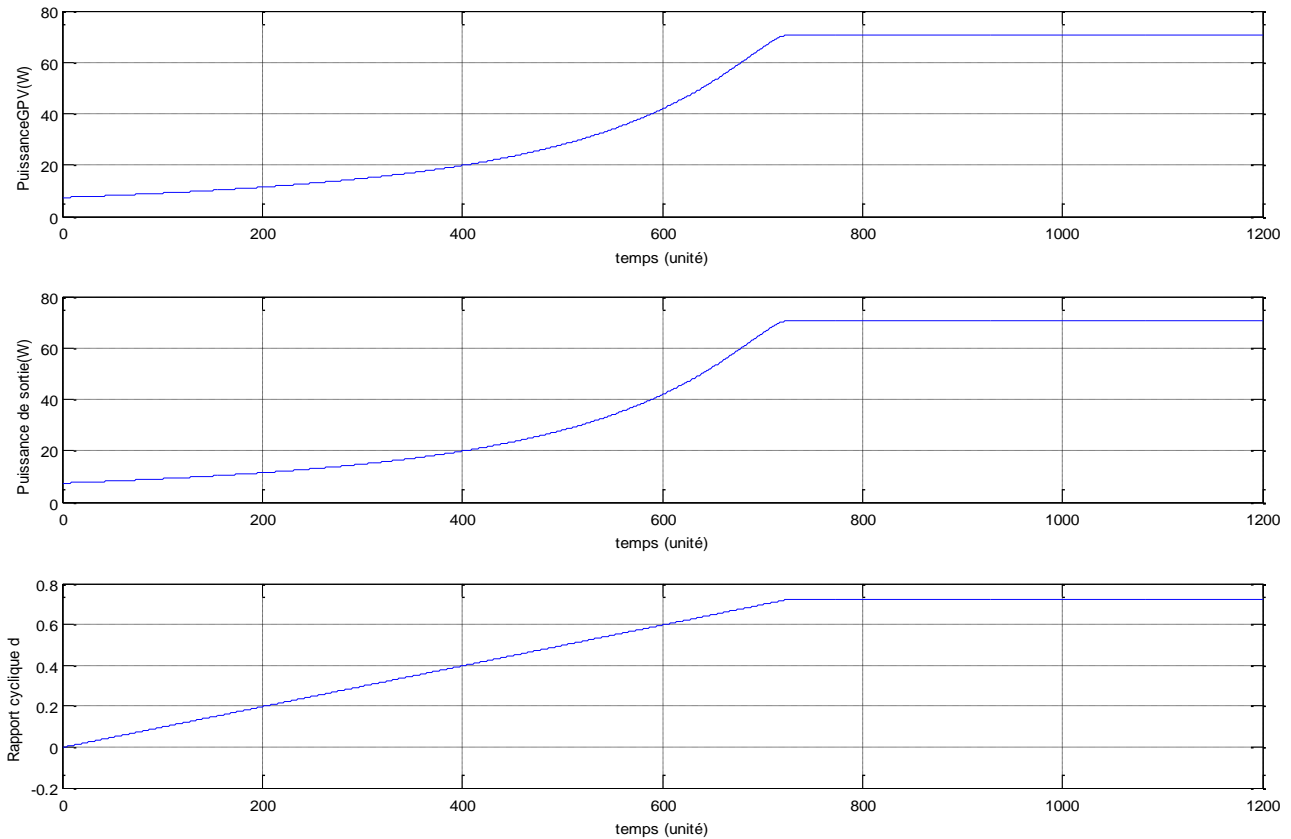


Figure 3.14. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas E de T constant.

D'après cette figure, on note que la courbe de la puissance du générateur photovoltaïque GPV correspond exactement avec la puissance de sortie transmise à la charge, cela est dû au fait qu'on a implémenté un modèle idéal pour le hacheur BOOST.

L'état transitoire indique la rapidité du contrôleur, sa rapidité est fonction de la largeur du pas de perturbation de la tension V_{ref} .

A l'état permanent, la valeur de la puissance de sortie se stabilise à environ de 70W, qui reflète le MPP du panneau solaire de 36 cellules montées en série pour les conditions normales d'insolation et de température.

3.3.3.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E :

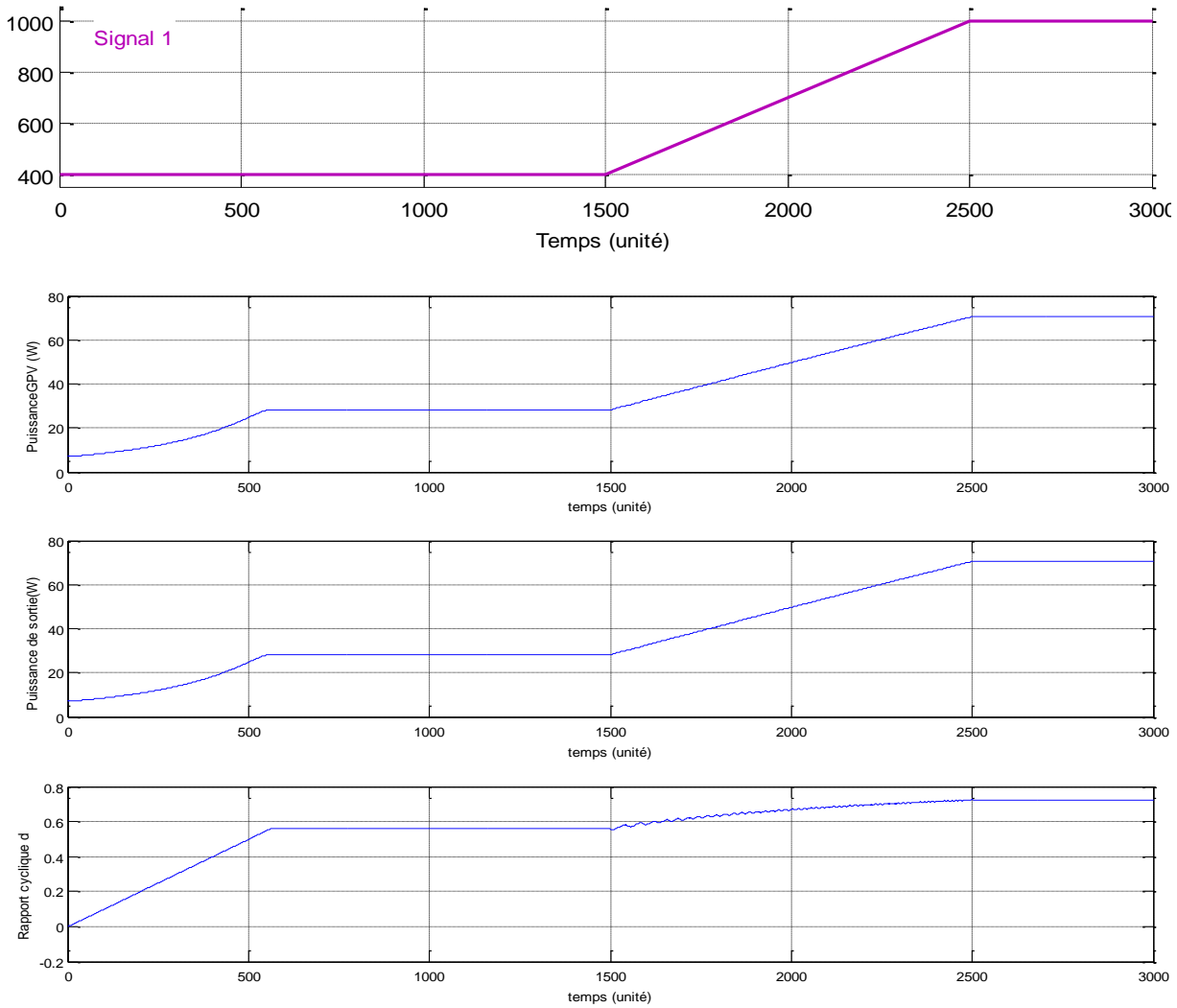


Figure 3.15. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie e_n en cas d'augmentation lente de E .

Pour ce test, la température est maintenue à une température constante égale à 25°C . On remarque que lors du changement lent de l'ensoleillement E , durant la période (1500-2500s), la réponse des signaux de puissance d'entrée et de sortie ainsi que du rapport cyclique suit la variation du E avec une fluctuation autour du point MPP.

3.3.3.3. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E :

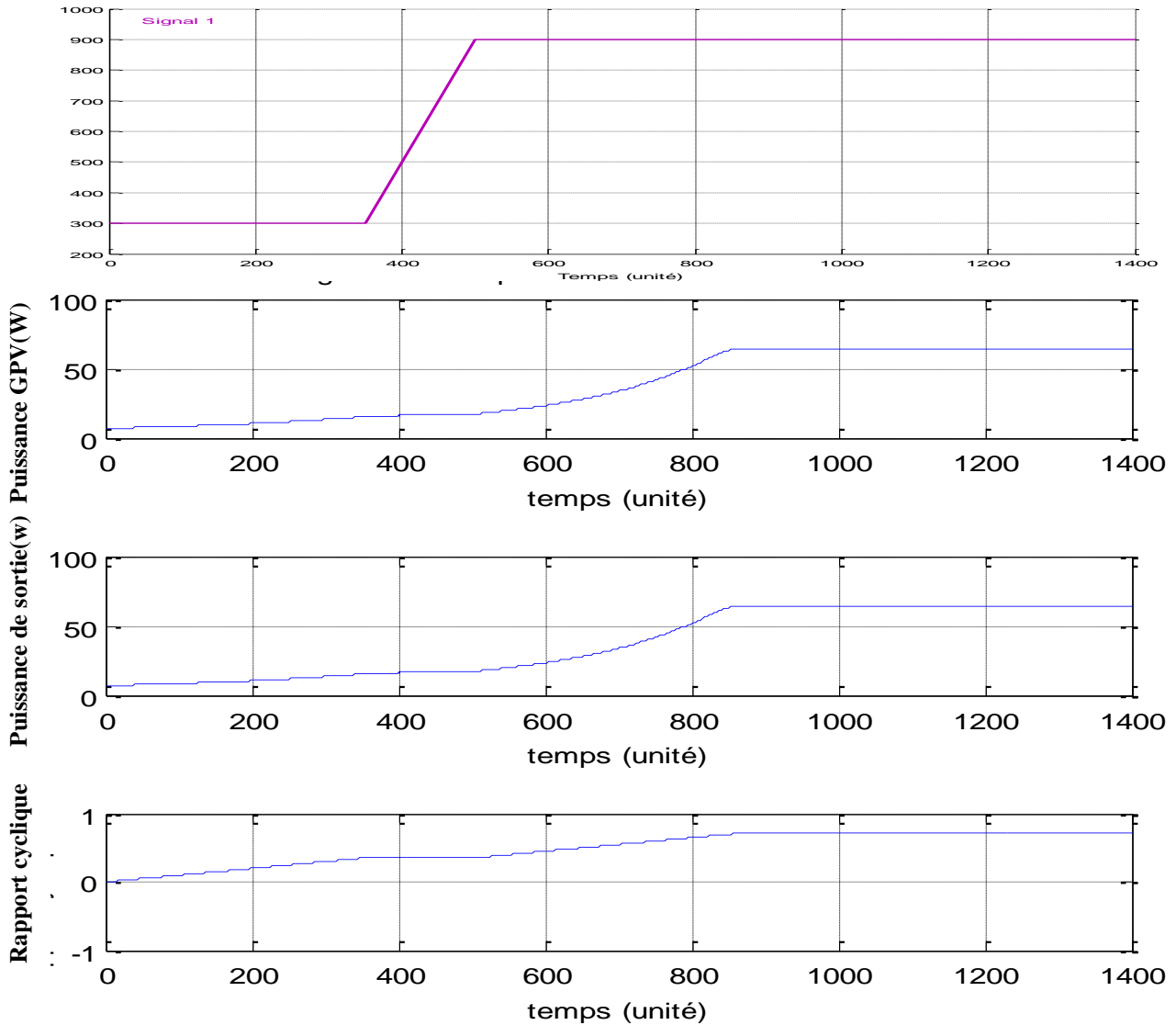


Figure 3.16. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas de brusque de E.

La figure 3.16 montre qu'il y a un retard de la réponse du système par rapport au changement rapide de l'ensoleillement, mais sans qu'il y est de chute de puissance. On remarque qu'il n y a pas de linéarité dans le changement des puissances P_{pv} et P_s donc leur évolutions ne suivent pas fidèlement le changement rapide de l'ensoleillement E.

3.3.3.4. Changement linéaire de la température T :

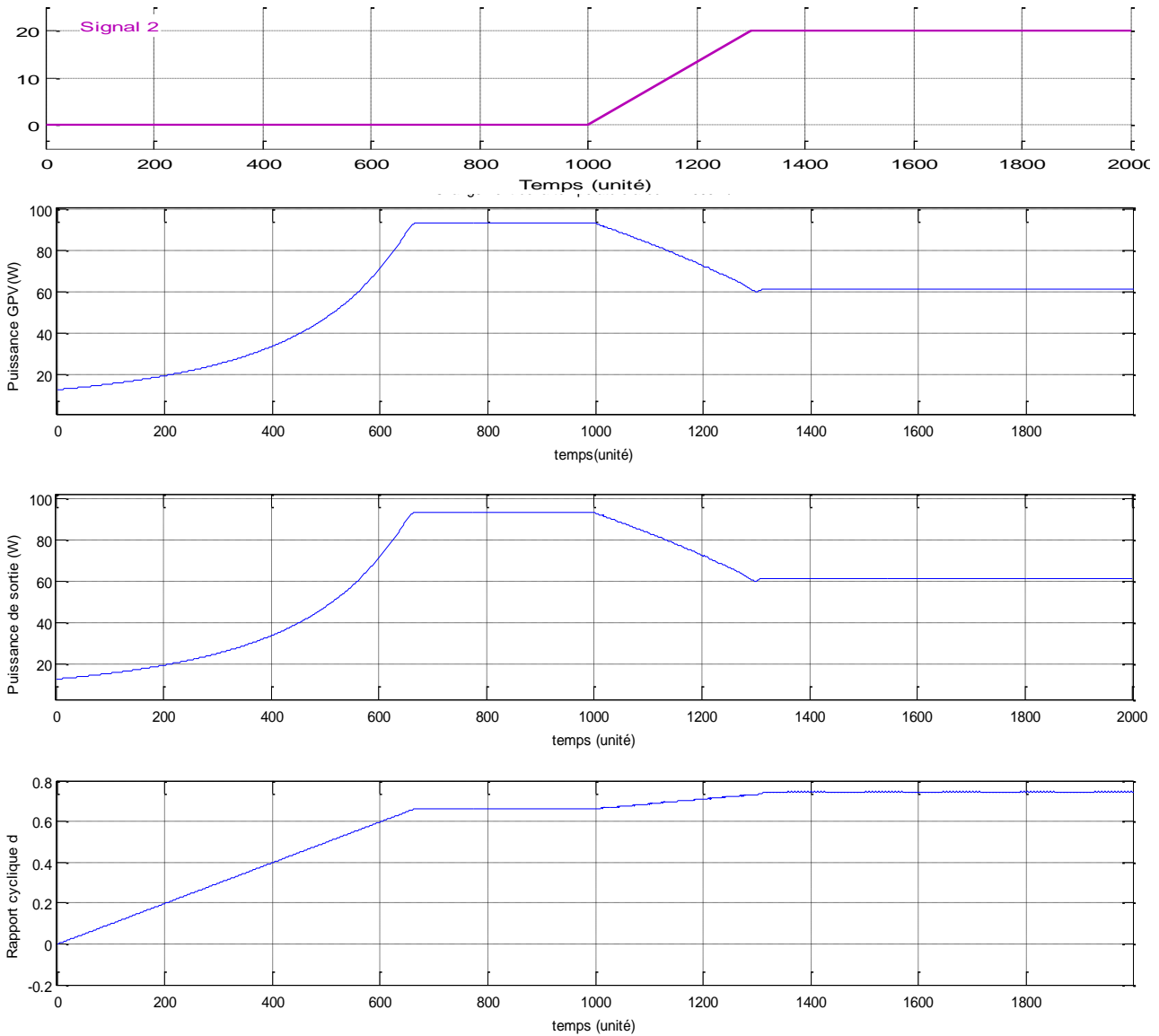


Figure 3.17. Courbes du rapport cyclique **d**, de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas d'augmentation de **T**.

Dans ce cas, l'ensoleillement est maintenu à $1000W/m^2$.

La figure 3.17 montre que le système présente un temps de réponse important avant d'atteindre le régime permanent mais il répond convenablement au changement de la température T, sans qu'il y est de chute de puissance ni du retard.

3.3.4. Méthode de la perturbation et l'observation P&O améliorée

3.3.4.1. Simulation sous un environnement stable :

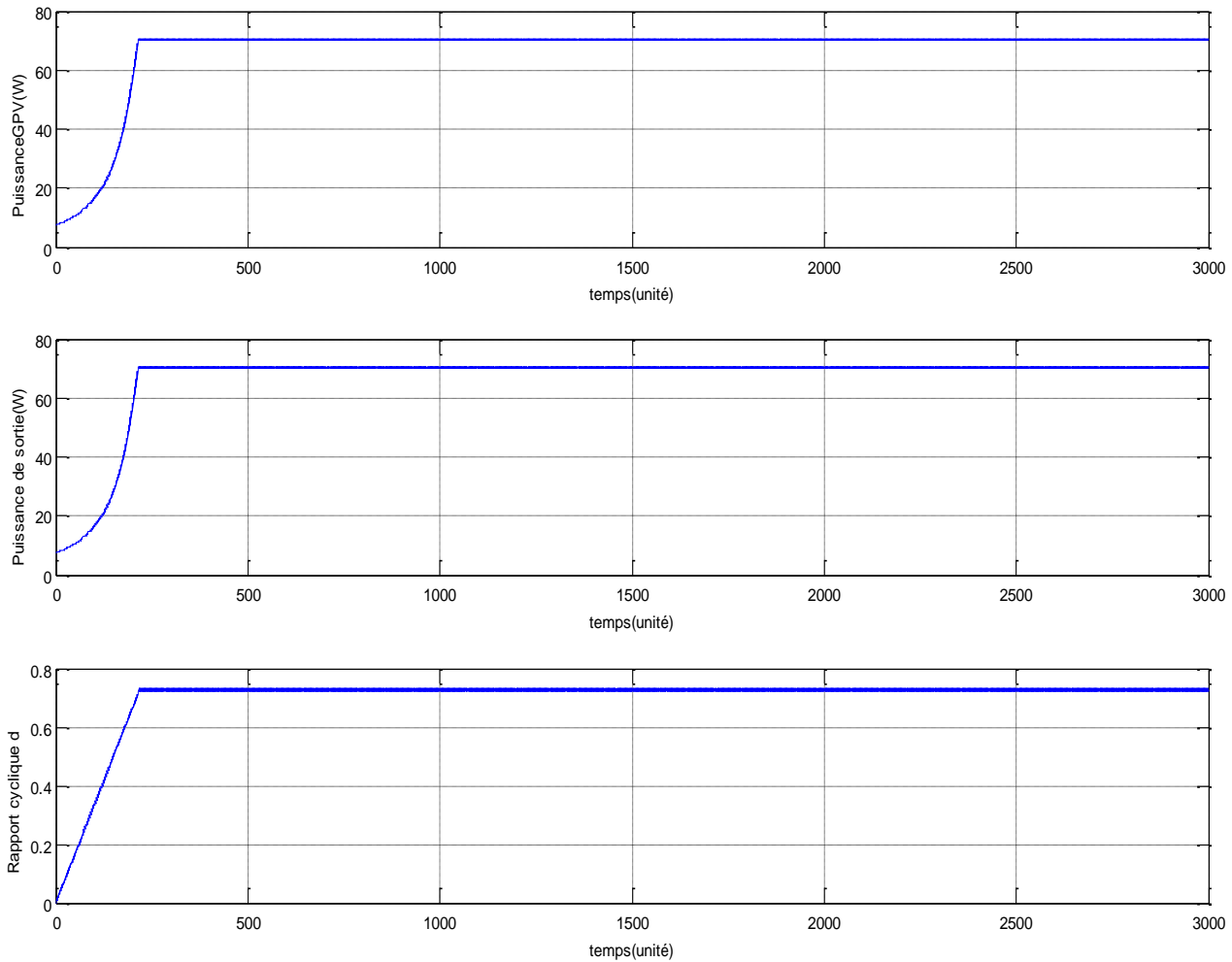


Figure 3.18. Le tracé des signaux (d) P_{PV} , P_s , V_{cp} et V_{GPV} en cas stable.

Une fois que le régime permanent est établi, la puissance GPV et la puissance de la sortie de la charge se stabilisent autour de 70W avec une efficacité de 100%, quant au rapport cyclique, il est égal à 0.72.

3.3.4.2. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E :

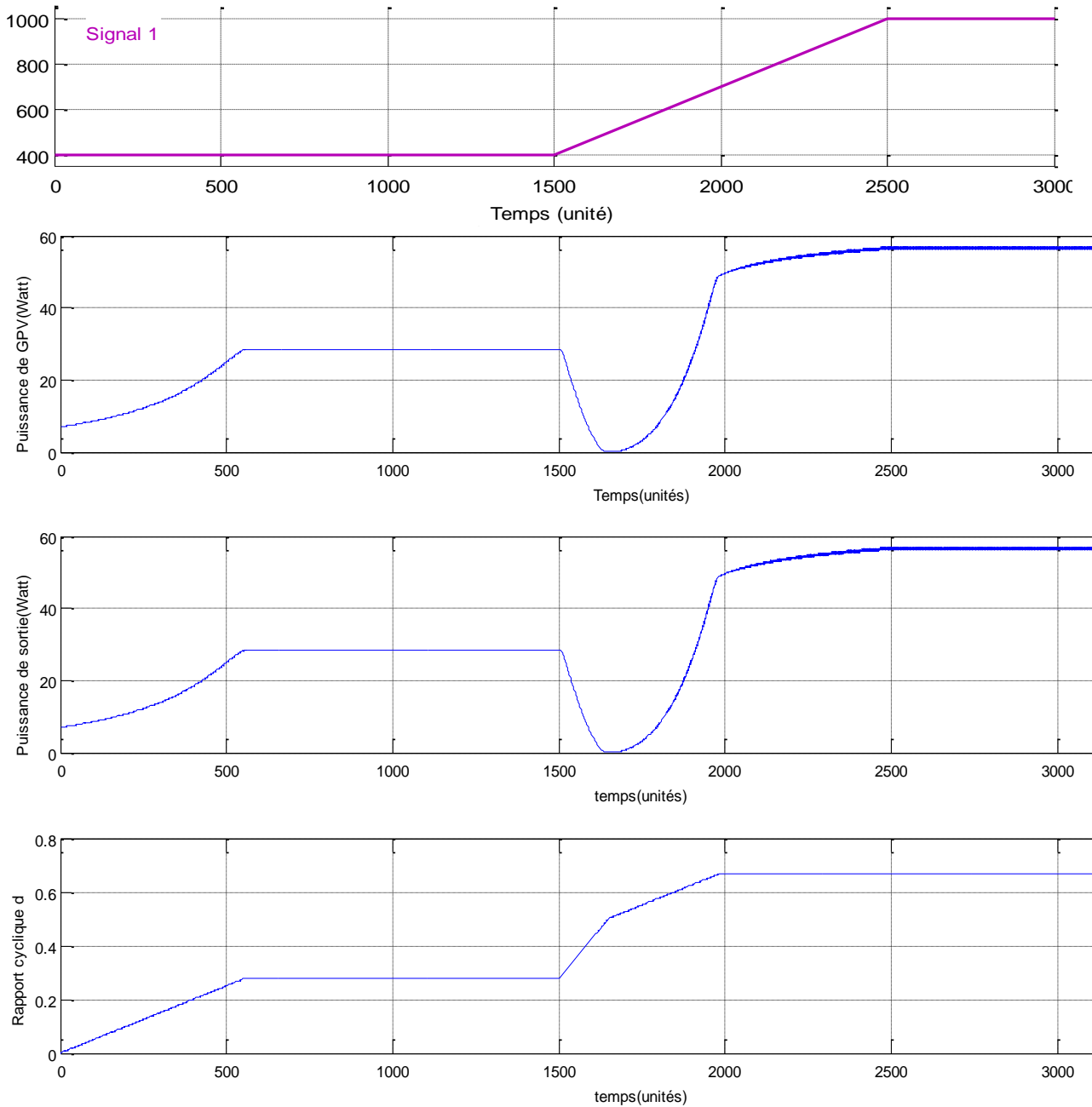


Figure 3.19. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas de changement lent de E.

Les signaux de puissances du panneau photovoltaïque et de la sortie de la charge ne suivent pas correctement le changement de l'ensoleillement E car on remarque qu'il y a une nette chute de puissance durant [1500,2500]. On note aussi la présence des ondulations.

3.3.4.3. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E :

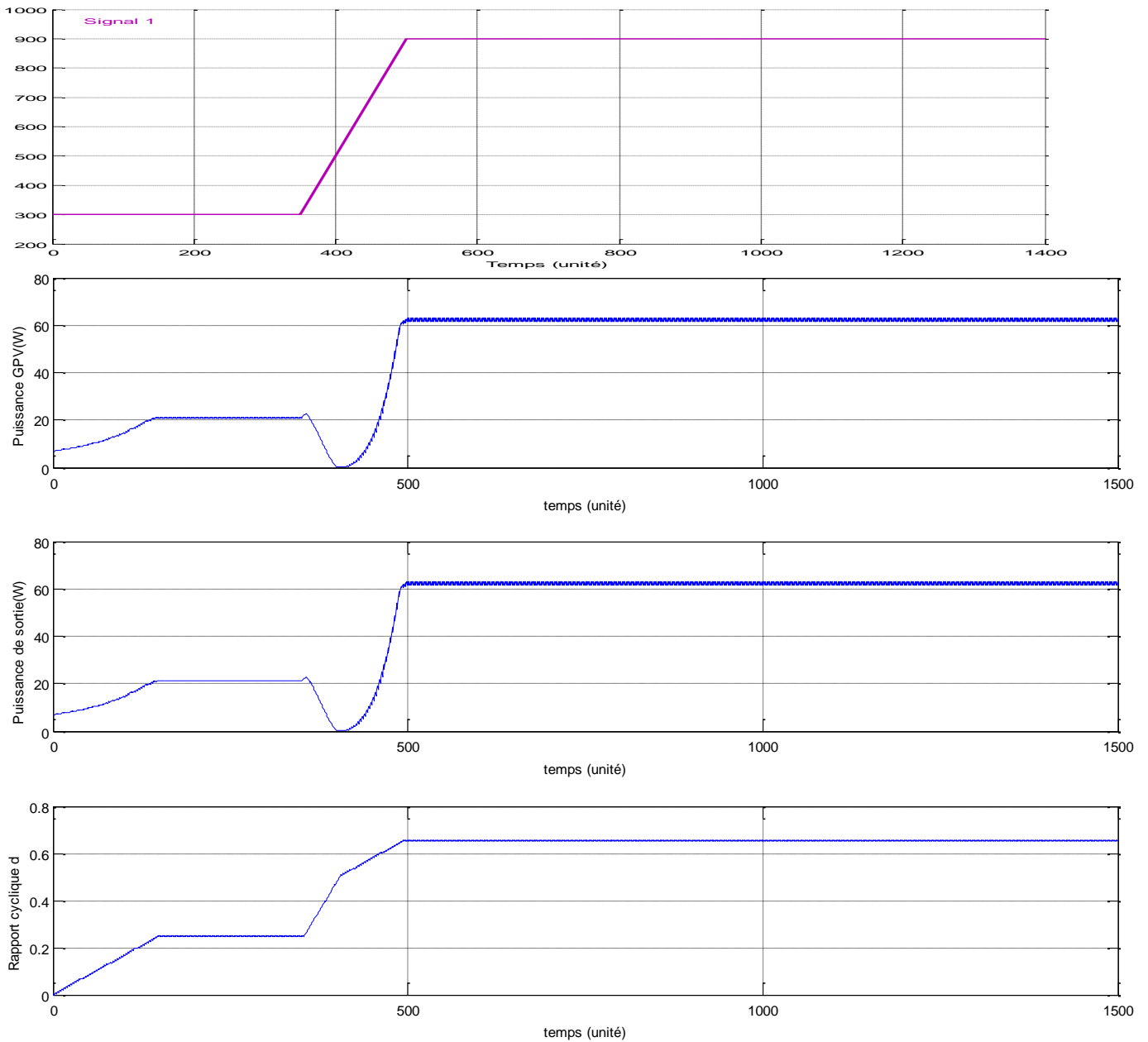


Figure 3.20. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas de changement brusque de E

Selon la figure 3.18, la puissance GPV et la puissance de sortie ne suivent pas correctement le changement de l'ensoleillement et on note aussi qu'il y a une chute de puissance durant [350, 500]. Dis que l'ensoleillement E atteint 1000W/m^2 , ces puissances se caractérisent par des ondulations qui sont dues au fait que rapport cyclique oscille autour de 0.7.

3.3.4.4. Changement linéaire rapide de la température :

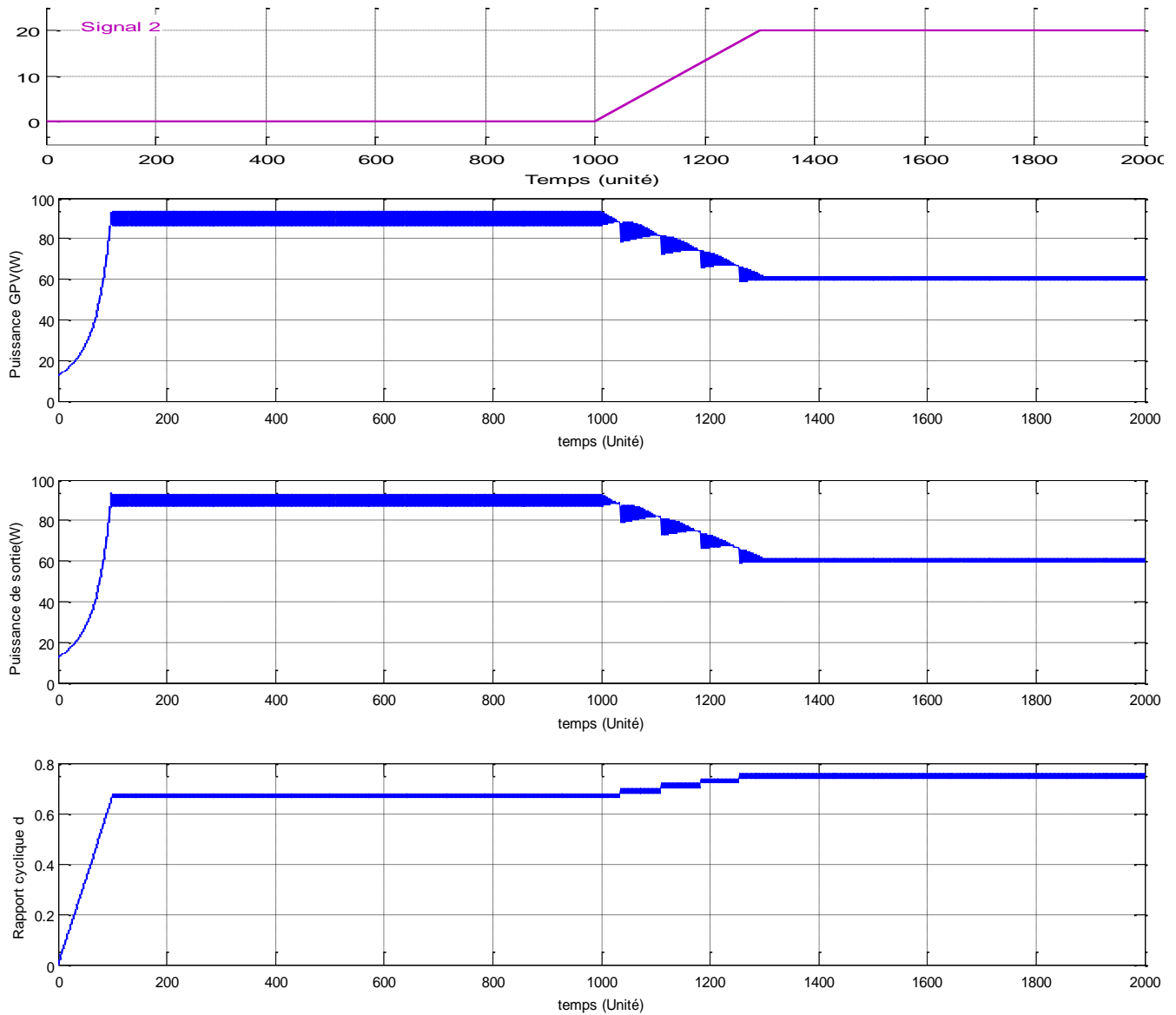


Figure 3.21. Courbes du rapport cyclique d , de la puissance GPV, et de la puissance de sortie en cas d'augmentation de T .

Dans ce cas, l'ensoleillement est maintenu à $1000W/m^2$.

D'après la figure 3.21, le système répond au changement de la température T , sans qu'il y est de chute de puissance mais on note qu'il y a des ondulations surtout durant la période $[1000,1300]$ ni du retard.

3.4. Comparaison des méthodes testées :

3.4.1. Changement linéaire lent de l'ensoleillement E

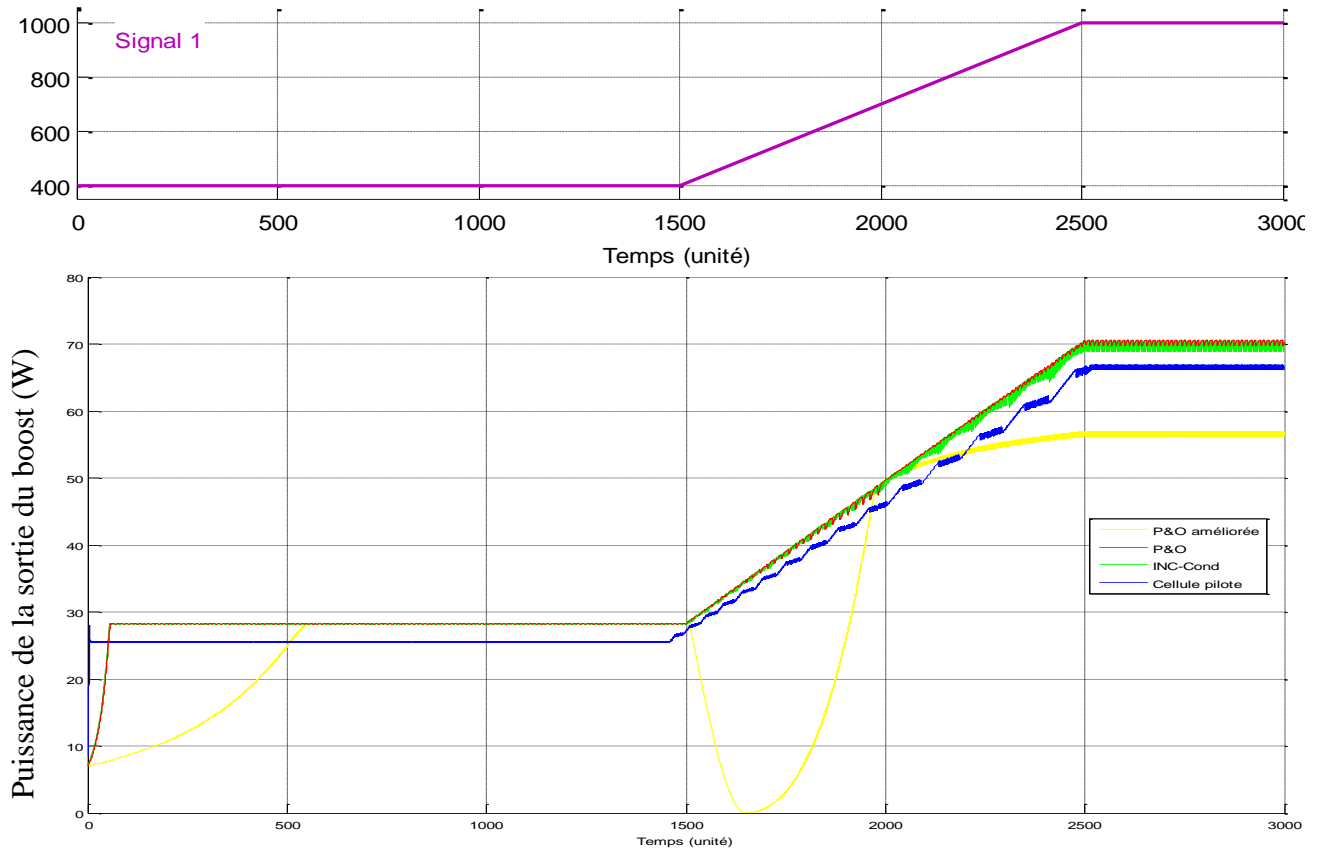


Figure 3.22. Réponse en puissance des méthodes MPPT en cas de changement lent de E.

Dans le cas d'un changement lent d'insolation, la méthode P&O améliorée présente des anomalies contrairement à la méthode P&O, car on constate en plus de retard de réponse il y a une chute considérable de puissance avec un taux d'efficacité le plus faible.

La méthode de l'incrémentation de la conductance et la méthode P&O suivent correctement le changement de l'ensoleillement avec un faible retard de réponse et un taux d'efficacité élevé, on note la puissance est caractérisée par des ondulations qui sont dues à la fluctuation de signal de rapport cyclique.

La méthode de contre réaction de tension avec la cellule pilote suit parfaitement le changement de l'ensoleillement E, sans retard de réponse. Le taux d'efficacité est moins important comparer aux méthodes précédentes car la puissance fournie par le panneau photovoltaïque n'est pas toute à fait transmise à la charge. On aussi la présence des ondulations surtout durant [1500,2500].

3.4.2. Changement linéaire rapide de l'ensoleillement E

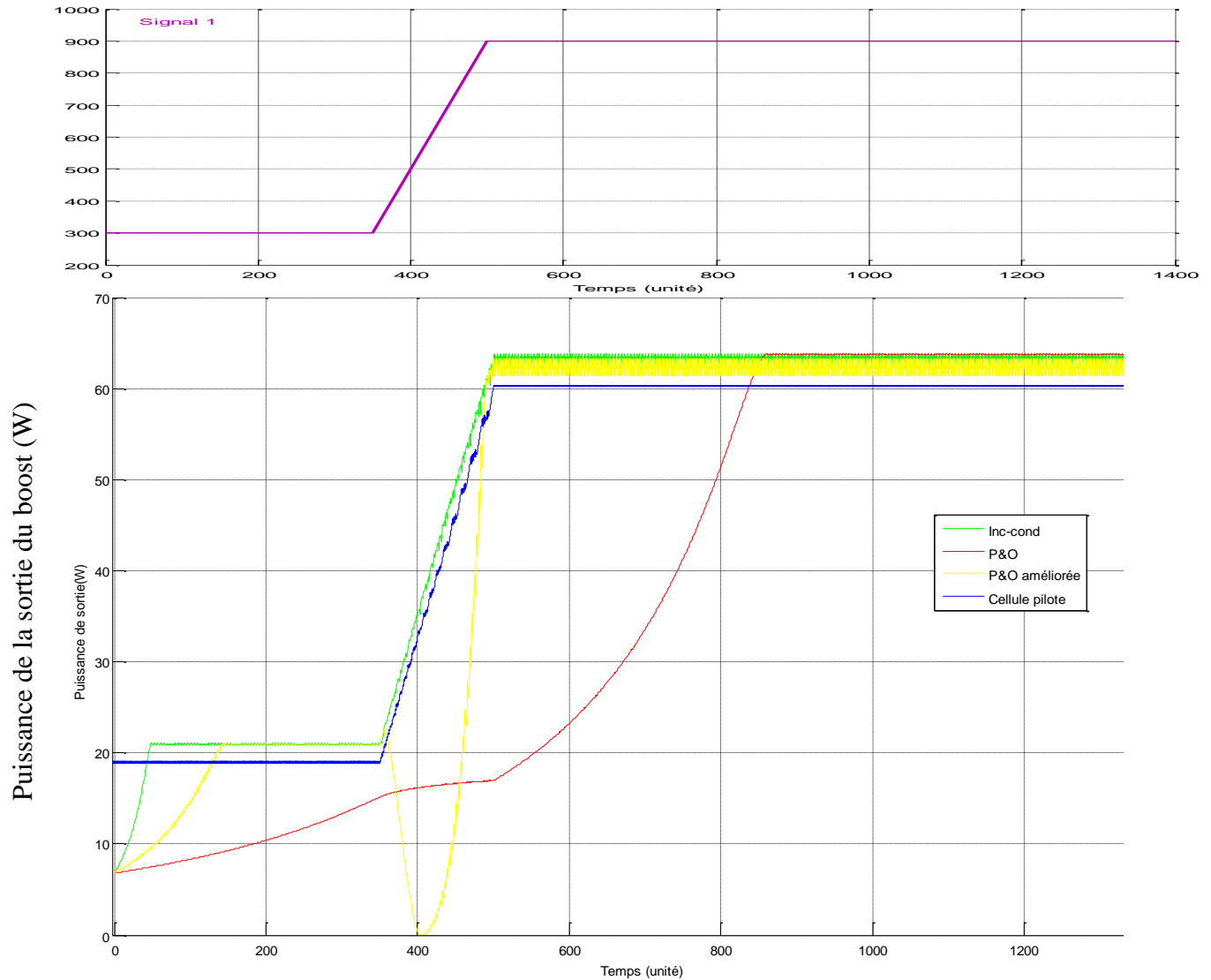


Figure 3.23 Réponse en puissance des méthodes MPPT en cas de changement rapide de E.

D'après la figure 3.23, le résultat de la simulation du système révèle que la méthode de l'incrément de la conductance poursuit le point MPP avec un faible retard de réponse. Quant à la méthode P&O, elle n'a pas pu suivre exactement la pente de variation de l'insolation. La P&O améliorée présente une chute de puissance, donc il y a une difficulté à poursuivre le MPP lors de variation de l'insolation. On remarque que le taux d'ondulation est important pour cette technique.

Pour la méthode de contre réaction de tension avec cellule pilote, les signaux de puissance du panneau photovoltaïque et de la sortie de la charge suivent convenablement le changement de l'ensoleillement E, mais avec un taux d'efficacité moins élevé comparé aux autres techniques.

3.4.3. Changement la température T :

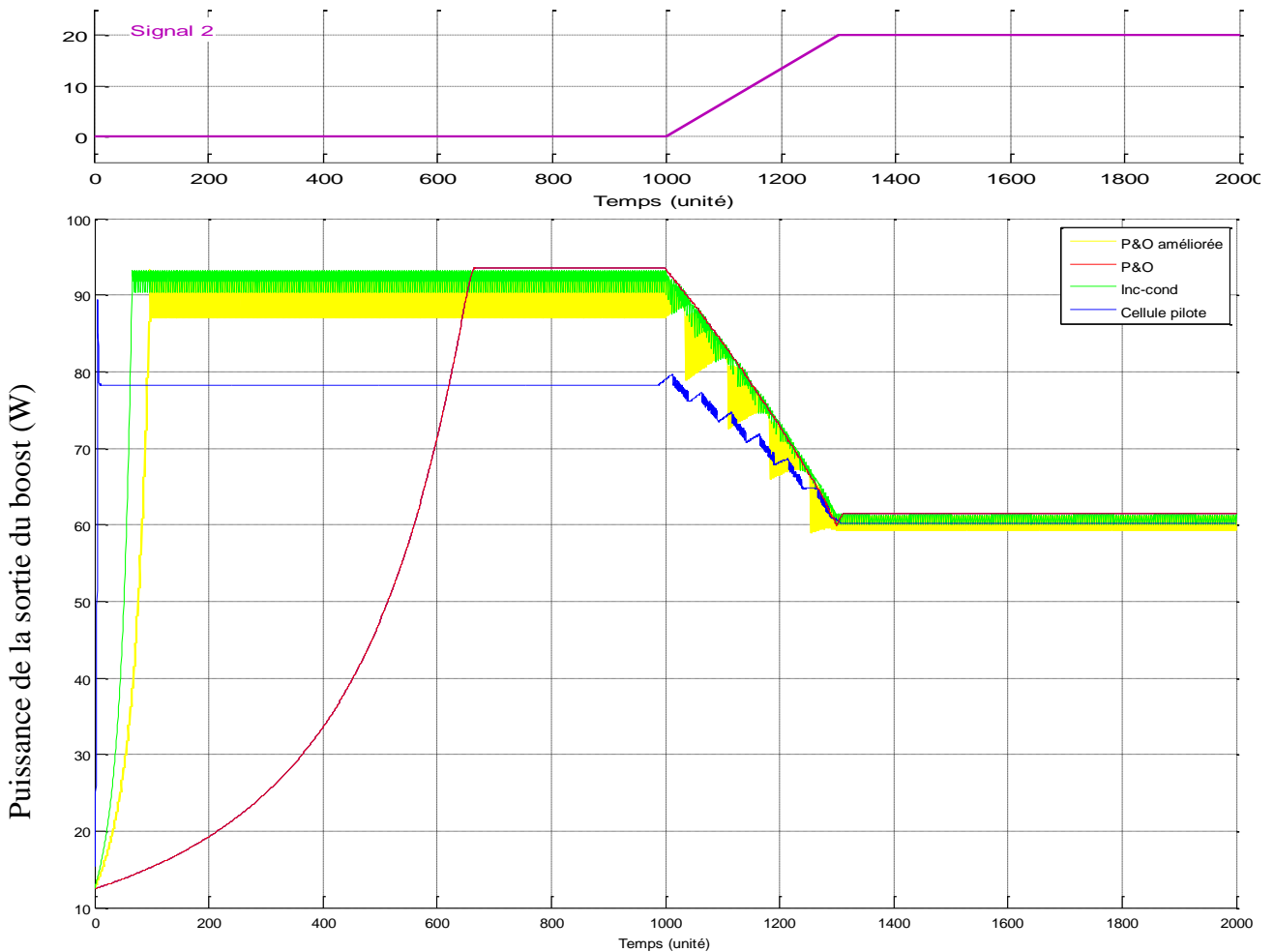


Figure 3.24. Réponse en puissance des méthodes MPPT en cas de changement de T.

La figure 3.24 la méthode P&O a un retard de réponse très élevé, avant que le régime soit établi, mais elle suit correctement le changement de la température. Les méthodes P&O améliorée et l'incrémentation de la conductance présentent un faible retard de réponse, elles suivent le changement de la température T mais les signaux de puissance de sortie se caractérisent par des ondulations qui représentent un inconvénient pour le système afin de traquer MPP.

Pour la méthode de contre réaction de tension avec cellule pilote, la puissance de la sortie de la charge suit convenablement le changement de l'ensoleillement E, mais avec un taux d'efficacité moins élevé comparer aux autres techniques.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, On a modélisé mathématiquement chaque élément du système global pour pouvoir l'implémenter en forme de bloc dans de simulink®.

La simulation a compris les algorithmes des méthodes de contre réaction de tension avec cellule pilote, l'incrément de la conductance, P&O et P&O améliorée, elle a donné des résultats discutés précédemment.

On a pu voir les avantages et les inconvénients de chaque technique.

Pour aborder la phase réalisation qui sera traitée dans le chapitre 4, on a opté pour la méthode de contre réaction de tension avec cellule pilote, en raison des résultats obtenus durant la phase de simulation car elle suit correctement le MPP même dans le cas du changement des conditions climatiques, mais elle est moins efficace que les autres méthodes. L'autre raison du choix est le coût raisonnable de la réalisation de la chaîne photovoltaïque.

CHAPITRE 4**REALISATION DU BANC D'ESSAI ET ÉVALUATIONS DES RESULTATS****4.1. Introduction**

Une fois que l'étape de la simulation a été achevée, nous avons abordé la phase de la réalisation, en choisissant l'une des méthodes simulées. Le choix s'est porté sur la méthode de contre réaction de la tension utilisant la cellule pilote, car elle a donné des résultats non seulement satisfaisants mais en plus c'est une méthode dont la réalisation est simple et à bas coût.

4.2. Principe de fonctionnement

Comme on l'a vu dans le chapitre 2, le principe de cette méthode repose sur le maintien de la tension de sortie, du panneau solaire, égale à une valeur de référence issue d'une cellule pilote à circuit ouvert, soumis aux mêmes conditions atmosphériques (ensoleillement et température) que le panneau avec une certaine pondération, en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

Le principe du schéma repose sur l'utilisation de deux rapports cycliques de valeurs extrêmes. Le choix de chaque rapport cyclique est en fonction de signe de l'erreur générée par la comparaison entre la tension du panneau en cours de fonctionnement et la tension à circuit ouvert de la cellule pilote. Le basculement du rapport cyclique de la PWM, entre ces deux valeurs extrême, fait varier la tension du panneau. Mais vu que la réponse de convertisseur DC-DC n'est pas instantanée (inertie de convertisseur), alors ce dernier réagit comme s'il était attaquée par une PWM de rapport cyclique égale à une valeur moyenne. Cette valeur moyenne est fonction d'un autre rapport cyclique qui représente les durées de commutation consacrées à chacun des deux rapports cycliques extrêmes précédents.

La figure 4.1 donne le schéma synoptique et les différentes formes d'ondes des signaux de contrôle. Les deux valeurs extrêmes auxquelles se réfèrent l'alternance du rapport cyclique doivent être les plus éloignées possible afin de permettre une poursuite optimale du point de puissance maximale quelque soit sa position. Ces deux rapports cycliques ne sont limités que par la fréquence maximale de fonctionnement du convertisseur DC-DC. Le rapport de division K , équation (2.2.5), prend en compte le nombre de cellules montées en série des panneaux solaires en cours de fonctionnement.

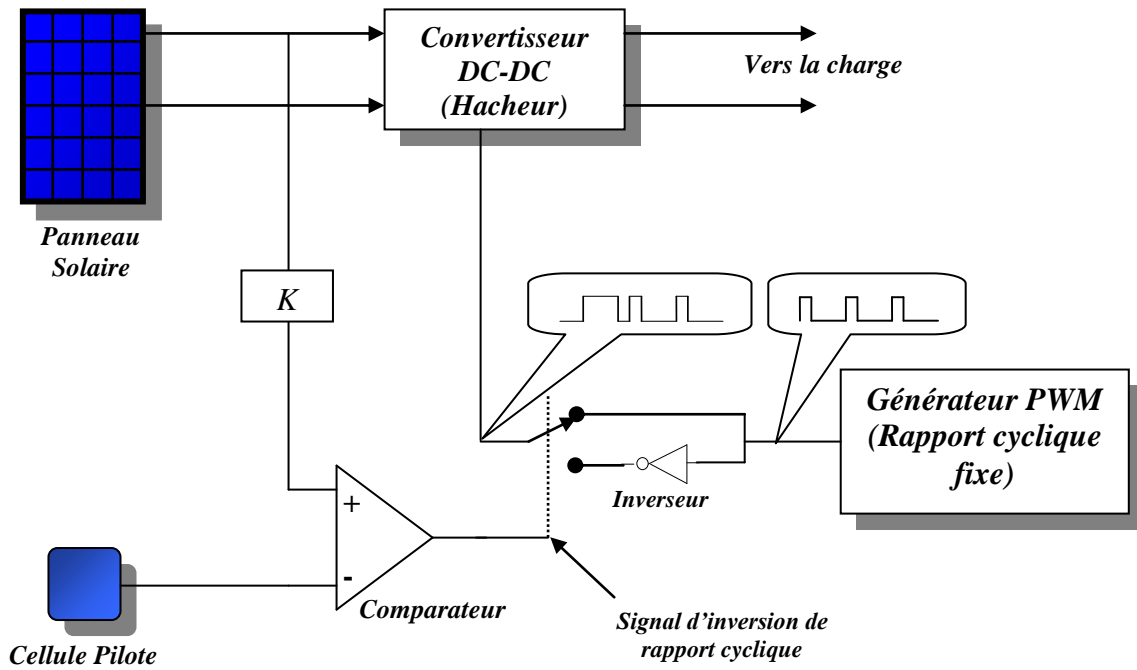


Figure 4.1. Schéma de principe de la méthode à contre réaction de tension avec cellule pilote proposée.

4.3. Réalisation

Cette partie comprend la réalisation des cartes suivantes :

- le convertisseur Boost.
- La carte d'alimentation.
- La carte de commande MPPT.
- La carte shunt de mesure.

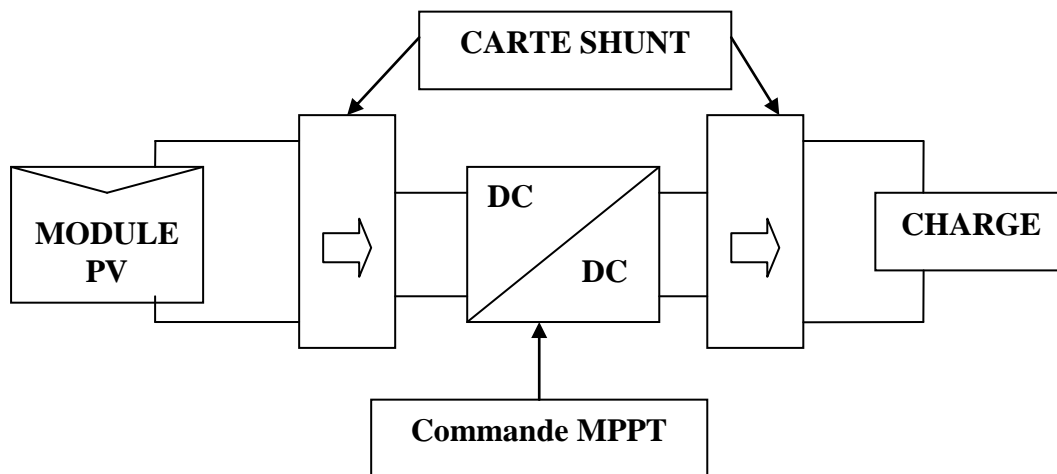


Figure 4.2 : Schéma synoptique du banc d'essai photovoltaïque.

4.3.1. Réalisation du convertisseur Boost

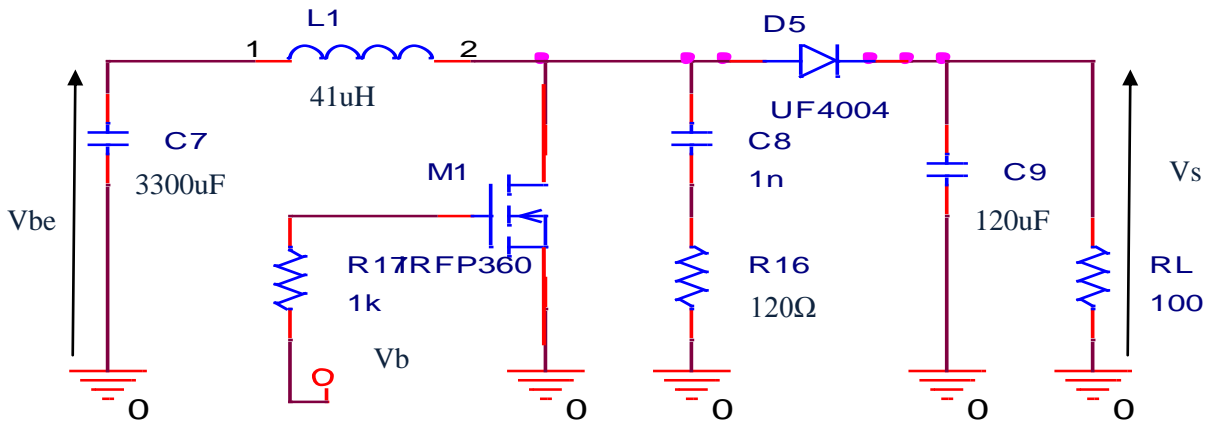


Figure4.3. Circuit électrique du convertisseur Boost

V_s : tension de sortie du boost.

V_b : tension du rapport cyclique.

V_{be} : tension d'entrée du boost.

4.3.1.1. Alimentation à découpage :

L'alimentation à découpage a pour rôle de délivrer, à partir d'un réseau alternatif ou continu, une tension continue découpée par un interrupteur (MOSFET) fonctionnant en commutation. Ce découpage s'effectue en général à des fréquences supérieures à 20 KHz (au-delà des fréquences audibles) jusqu'à quelques MHz. Le transfert d'énergie de l'entrée vers la sortie se fait par l'inductance qui stocke cette énergie sous forme magnétique puis la restitue au rythme du découpage. La régulation de tension se fait par action sur le temps de conduction de l'interrupteur.

Puisque l'interrupteur fonctionne en commutation, les pertes sont faibles. Elles se manifestent par des pertes de conduction et des pertes de commutation.

Par ailleurs plus la fréquence est élevée, plus les dimensions de l'inductance sont réduites. On gagnera en encombrement.

Le principal intérêt de l'alimentation à découpage est son rendement, par contre elle présente des problèmes de régulations et de compatibilité électromagnétique qui sont difficiles à maîtriser.

Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour une alimentation à découpage de type Boost.

4.3.1.2. Sélection des composants :

Le but de cette réalisation est l'extraction du maximum de puissance du panneau photovoltaïque et de son transfert à la charge. Les pertes du système doivent être minimales. Cela nous mène à faire un choix des composants selon la perte en puissance qui leur sont associées.

Le convertisseur Boost comprend essentiellement les composants suivants : un switch, une inductance, une capacité et une diode.

4.3.1.2.1. Sélection du Switch :

La tension de sortie en fonction de la tension d'entrée calculée dans le chapitre 1 est égale à :

$$V_o = \eta \frac{1}{1-D} V_i . \tag{4.3.1}$$

Avec un rendement η voisin de 1 et une tension d'entrée maximale pour un panneau égale à 17V, la tension de sortie V_o peut atteindre quelque 170V pour un rapport cyclique de 0.9 alors que cette tension est appliquée entre le drain et la source de transistor MOSFET pour cette raison il faut trouver un transistor qui puisse supporter cette tension. Parmi les transistors disponibles, le transistor IRFP360 présente les caractéristiques désirées c'est à dire : [20]

- $V_{dss} = 400V$ (Tension maximale entre le drain et la source) ;
- $R_{ds(on)} = 0.2\Omega$ (Résistance ohmique entre le drain et la source dans l'état conducteur) ;
- $I_d = 23A$ (Courant maximum admissible de drain).

4.3.1.2.2. Sélection de l'inductance

Le rôle d'une inductance est de stocker l'énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. Le choix de la bobine est conditionné par

- Diminuer l'encombrement, au niveau de la carte.
- Confiner le flux magnétique dans un espace restreint et ainsi limiter les rayonnements parasites.

Le dimensionnement de l'inductance du circuit Boost est très important pour son fonctionnement normal, du fait que le courant de charge de cette inductance est le même courant qui parcourt le transistor MOSFET. La valeur de l'inductance est obtenue à partir du système d'équations (1.40). Nous avons tenu compte des variations de l'intensité du courant qui traverse cette inductance ainsi que de la fréquence de commutation du MOSFET. En effet, une inductance faible risque une augmentation excessive de courant de l'inductance donc du courant du MOSFET avant la fermeture de ce transistor, alors qu'une valeur importante de l'inductance tend à augmenter la vitesse de la réponse du Boost vis-à-vis d'une variation du rapport cyclique, ce qui aura comme résultat de perturber le circuit MPPT et donc d'augmenter les ondulations des signaux.

Pour un rapport cyclique de 90% et une fréquence moyenne de 50Khz avec un courant maximal de 7A (30% du courant admissible par le MOSFET), l'inductance L , du circuit Boost utilisé, est égale à :

$$Ll = \frac{V_i}{2\Delta I_L} D * T_s = \frac{16(V)}{2 * 3.5(A)} * 0.9 * \frac{1}{50 * 10^3} (s) \approx 41\mu H \tag{4.3.2}$$

Cette inductance doit être réalisée comme les inductances de haute fréquence à l'aide d'un noyau en ferrite et de préférence de type torique pour diminuer les rayonnements magnétiques et avoir une résistance

ohmique la plus faible possible. Pour cela, cette inductance a été réalisée avec un fil multibrin afin que le rendement soit optimal.

4.3.1.2.3 Sélection de la capacité :

Pour les capacités d'entrée et de sortie, leurs influences se manifestent par des ondulations des tensions d'entrée et de sortie. Leurs valeurs sont en fonction de l'ondulation voulue ainsi que des grandeurs moyennes désirées. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, l'évaluation de ces deux capacités est faite à partir du système d'équations (1.40) ce qui donne

$$C7 = \frac{I_i - I_L}{2\Delta V_i} DT_s \quad (4.3.3)$$

$$C9 = \frac{-I_o}{2\Delta V_o} DT_s \quad (4.3.4)$$

Avec :

(C7,C9) correspond à (C1,C2) du chapitre 2.

$I_i = 3A$ (Courant d'entrée pour un ensoleillement maximum de $1000W/m^2$) ;

$I_L = 3.5A$ (Courant moyenne de l'inductance pour un pic de $7A$) ;

$V_o = 160V$ (Tension maximale pour un rapport cyclique de 90%) ;

$I_o = 0.3A$ (Courant de sortie pour un rapport cyclique de 90% dans le cas idéal)

Pour des ondulations désirées de 0.1% les valeurs de ces deux condensateurs et de :

$$C7 = \frac{3(A) - 3.5(A)}{2 * 10^{-4} * 16(V)} * 0.9 * \frac{1}{50 * 10^3} (s) \approx 3300\mu F \text{ (Valeur standard)} \quad (4.3.5)$$

$$C9 = \frac{0.3(A)}{2 * 10^{-4} * 160(V)} * 0.9 * \frac{1}{50 * 10^3} (s) \approx 120\mu F \text{ (Valeur standard)} \quad (4.3.6)$$

4.3.1.2. Sélection de la diode :

Le choix de la diode repose sur certains critères tels que la rapidité de la commutation, le courant que peut supporter cette diode, la tension inverse qui permet de réduire au minimum la puissance dissipée ainsi que la tension de claquage.

Quant au courant que la diode peut supporter, il doit être supérieur au courant maximal de la sortie du Boost.

D5 doit supporter une tension inverse maximale de $160V$ et un courant de sortie maximale égale à $0.35A$, son temps de recouvrement doit être très faible. Pour cela, le choix de la diode UF4004, nous a semblé le plus adéquat. C'est une diode rapide qui a d'excellentes performances. Elle est caractérisée par les paramètres suivants :

Tension inverse max $V_{d_{inv}} = 200V$,

Courant direct max $I_d = 3A$,

Temps de recouvrement maximale $t_{rr} = 50\text{ns}$.

4.3.1.2.4. Circuit SNUBBER :

Ce circuit est inséré en parallèle avec le Mosfet IRFP360. Il a pour rôle de filtrer les ondulations.

Notre choix des valeurs, de la capacité $C8 = 1\text{nF}$ et de la résistance $R16 = 120\Omega$, est empirique.

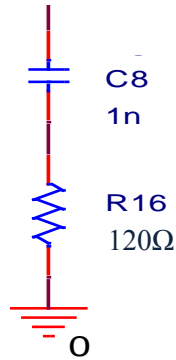


Figure 4.3.2 : Circuit SNUBBER

4.3.2. Commande MPPT

Comme le montre la figure 4.3.3, la commande MPPT se compose de quatre blocs, le bloc d'alimentation, le circuit MPPT, le générateur PWM et le circuit driver.

Le bloc d'alimentation comprend les régulateurs LM7812C et LM7805C qui nous délivrent 12V et 5V à partir de la tension du panneau V_{pv} .

Le circuit MPPT est constitué principalement de comparateur LM311 qui génère un signal à deux états correspondants à la position du point de fonctionnement par rapport au point voulu (au-dessous ou au-dessus). Ce point est réglé par le potentiomètre R20, le signal de sortie du comparateur sert à inverser ou à garder le même rapport cyclique initial généré par le générateur PWM, ce signal est discrétisé à l'aide de la porte NAND avec trigger du circuit CD4093. L'inversion ou la non inversion du signal PWM est réalisée par la porte XOR à deux entrées du circuit CMOS CD9030. Le signal de sortie de cette porte attaque le transistor MOSFET (IRFP450) du circuit Boost après qu'il ait été ramené à un niveau suffisant par le circuit driver réalisé avec deux transistor montés en push-pull Q2(BC639) et Q3(BC639) ainsi que le transistor préamplificateur Q1 (BC639) monté en émetteur commun. Le potentiomètre R21 sert à régler l'offset du comparateur pour son équilibrage.

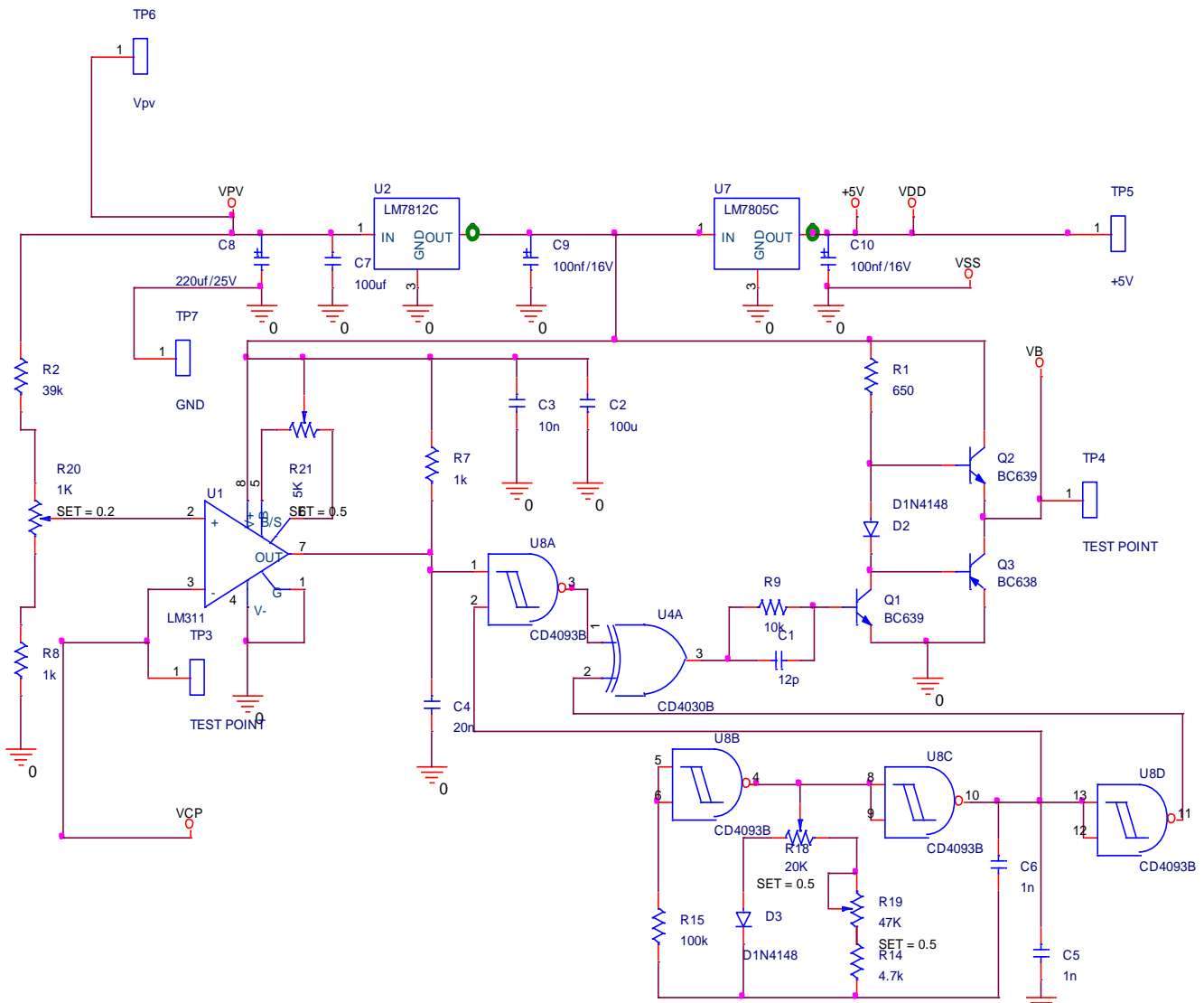


Figure 4.3.3 : Carte analogique de commande MPPT

Les circuits intégrés CMOS et le comparateur LM311 caractérisés par une faible consommation sont alimentés par 12V issus directement de la tension du panneau à travers le régulateur LM7812.

4.3.3. Carte shunt :

La carte de mesure (shunt) a pour rôle de mesurer la tension et le courant de sortie du panneau photovoltaïque V_{PV1} , I_{PV1} et la tension et le courant de sortie du convertisseur V_S , I_S . Elle comprend un bloc de mesure de courant et un autre pour la tension.

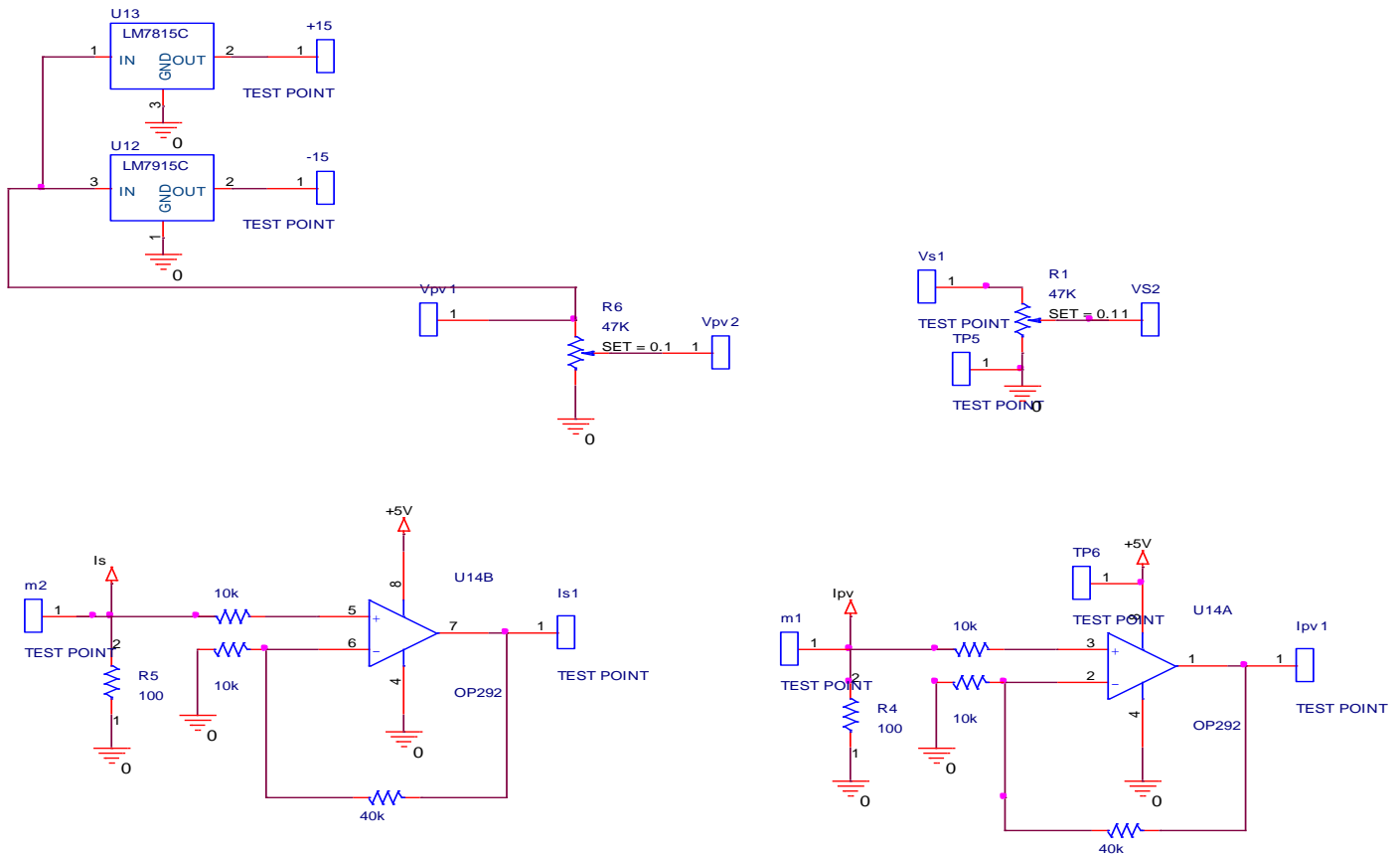


Figure 4.3.4.1 : Carte de mesure (shunt)

+15V & -15V : Tension d'alimentation du capteur du courant.

+5V : Alimentation de l'OP292.

Vpv1 : Tension de la sortie du panneau photovoltaïque.

$V_{pv2} = V_{pv1}/10$.

Vs1 : La tension de sortie du convertisseur (boost).

$V_{s2} = 0.1V_{s1}$

M1 : La tension de sortie du capteur du courant lié à la sortie du PV.

M2 : La tension de sortie du capteur du courant lié à la sortie du boost.

$I_{s1} = 0.5 I_s$.

$I_{pv1} = 0.5 I_{pv}$.

4.3.3.1. Mesure de tension :

Le principe de mesure de la tension du panneau et celle de la sortie du convertisseur est le même. Pour effectuer la mesure de la tension du panneau, on réduit la tension de la sortie du panneau V_{PV1} en utilisant un potentiomètre, le but est d'avoir un rapport de 10.

$V_{PV2} = V_{PV1}/10$.

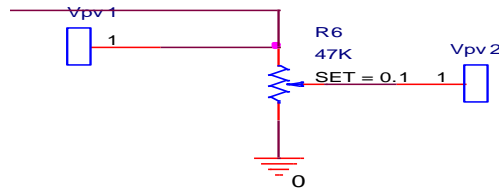


Figure 4. 3.4.2 : Mesure de la tension

4.3.3.2. Mesure du courant

Dans ce qui suit, la mesure du courant photovoltaïque I_{PV} est identique à celle du courant de sortie du convertisseur I_S .

La figure 4.3.4.3 montre le principe de mesure du courant photovoltaïque. Le capteur de courant LA24NP est connecté à son entrée au panneau photovoltaïque et sa sortie au convertisseur Boost. Il est alimenté par une tension de 15V.

Ce capteur à effet de hall nous permet de mesurer le courant I_{PV} avec un rapport de 1000. [21]

La tension V_{R4} , prise aux bornes de la résistance R4 connectée à la borne de mesure du capteur, est égale à $I_{PV} / 10$. L'Amplificateur OP292, dont les performances sont remarquables en matière de bruit, a pour rôle d'amplifier la tension V_{R4} avec un facteur de 5.

$$V_{R4} = (I_{PV} / 1000) \times 100\Omega.$$

$$V_{R4} = I_{PV} / 10.$$

$$I_{PV1} = 5.$$

$$I_{PV1} = I_{PV} / 2.$$

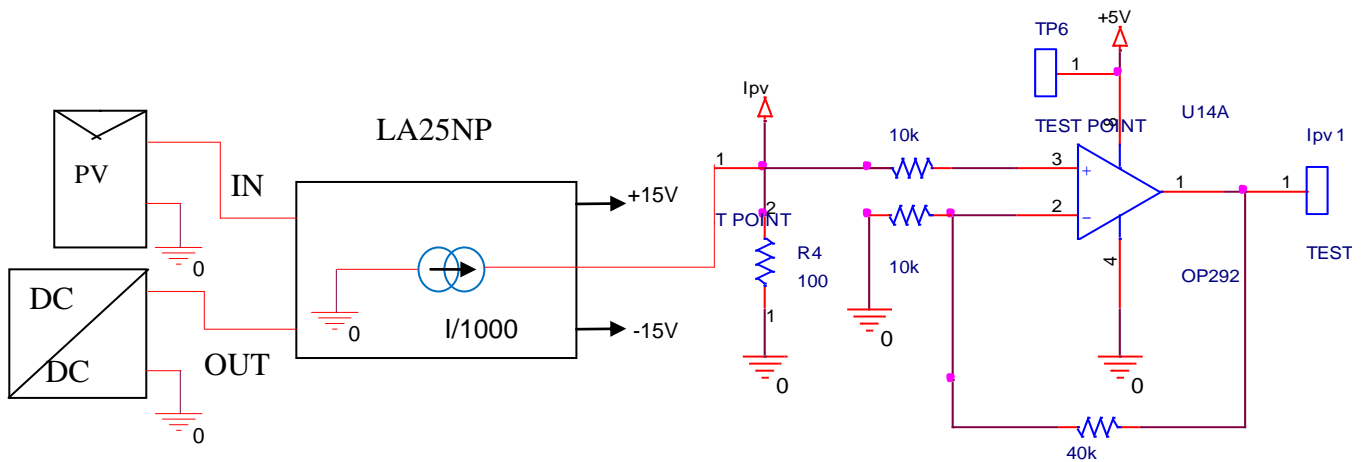


Figure 4.3.4.3. : Mesure du courant photovoltaïque

4.4. Tests et résultats des mesures :

La vérification de nos résultats est faite sur un banc constitué d'un panneau photovoltaïque et d'une cellule pilote dont les caractéristiques sont données ci-dessous.

4.4.1 Caractéristiques du panneau

Les caractéristiques du panneau utilisé sont les suivantes

Modèle : SIEMENS -SM55

Les spécifications techniques correspondent $1000\text{W}/\text{m}^2$ et 25°C .

Puissance maximale : 55 watts.

Courant	{	ICC: 3.45A
		I: 3.15A
Tension	{	VCO : 21.5C
		V: 17.4V

La charge utilisée est une lampe de 12volts et 21 watt.

Nous avons procédé à une série de mesures, qui nous ont permis d'avoir des informations sur l'efficacité du contrôleur MPPT (Puissance extraite du panneau / Puissance disponible du panneau), le rendement du hacheur (Puissance de charge/Puissance du panneau) qui nous permis d'estimer la performance de la méthode MPPT utilisée. Pour visualiser la variation du rapport cyclique, nous avons utilisé une sonde d'oscilloscope à la sortie du contrôleur MPPT.

- Pour un horaire donné, la mesure de la tension et du courant du panneau photovoltaïque, qui correspondent à la puissance maximale (disponible), est effectuée. La même opération est répétée après avoir connecté la charge au panneau pour noter les valeurs de la tension et du courant du panneau photovoltaïque qui correspondent à la puissance photovoltaïque extraite ainsi que la tension et le courant de la charge.
- Pour chaque mesure, la puissance du GPV disponible, la puissance extraite du GPV et la puissance de charge ont été déduites. Nous avons calculé aussi l'efficacité du MPPT et le rendement du hacheur comme représenté par le tableau 4.4.1 et le tableau 4.4.2.

4.4.2 La mesure des paramètres en utilisant un seul panneau PV :

La résistance utilisée est une lampe de 12 volt et 21 Watts.

Les mesures ont été prises le 29 juin 2010 et le 21 septembre 2010.

Pour la journée du 29 juin, nous avons mesuré les tensions et les courants de sortie du panneau et du convertisseur Boost. L'intervalle de temps de mesure que l'on a choisi était de 15 minutes. Les mesures effectuées nous ont permis de déduire les valeurs de la puissance extraite du panneau photovoltaïque, la puissance de charge et le rendement du convertisseur boost.

Les tests ont permis d'avoir le tableau suivant :

TEMPS (Heure)	VCP (V)	V _{PV} (V)	I _V (A)	P _{PV} (W)	V _S (V)	I _S (A)	P _S (W)	η Rendement du Boost (%)
9 :30	0.28	16.00	2.06	32.96	14.9	2.00	29.8	88.90
10 :00	0.30	16.07	2.02	32.46	15.03	1.99	29.91	92.14
10 :15	0.28	16.02	2.02	32.36	14.88	1.99	29.61	91.50
10 :30	0.26	15.97	2.06	32.90	14.85	1.94	28.81	87.57
10 :45	0.24	16.02	2.04	32.68	14.86	1.94	28.82	88.19
11 :00	0.27	16.17	2.04	32.99	14.99	2.00	29.98	90.88
11 :15	0.27	16.23	2.05	33.27	15.02	2.00	30.04	90.29
11 :30	0.28	16.23	2.06	33.43	14.99	1.99	28.83	86.24
11 :45	0.28	16.29	2.07	33.72	14.82	1.96	29.05	86.72
12 :00	0.28	16.35	2.07	33.84	14.96	1.99	29.77	87.97
12 :15	0.28	16.26	2.06	33.50	14.95	2.00	29.9	89.25
12 :30	0.28	16.27	2.06	33.52	14.95	2.00	29.9	89.20
12 :45	0.26	16.26	2.06	33.50	14.72	1.96	28.85	86.12
13 :00	0.28	16.30	2.02	32.93	14.84	1.95	28.94	87.88
13 :15	0.27	16.20	2.07	33.53	14.96	1.93	28.73	86.61
13 :30	0.29	16.34	2.03	33.17	14.87	1.98	29.44	88.75
13 :45	0.28	16.07	2.02	32.46	14.82	1.96	29.05	89.49
14 :00	0.28	15.97	2.01	32.10	14.73	1.97	29.02	90.41
14 :15	0.29	15.97	2.07	33.06	14.97	1.97	29.49	89.20
14 :30	0.29	15.55	2.02	31.41	14.4	1.99	28.66	91.25
14 :45	0.29	15.47	1.96	30.32	14.02	1.93	27.06	88.98
15 :00	0.30	14.83	1.95	28.92	13.37	1.85	24.73	85.52
15 :10	0.30	14.27	1.92	27.40	13.3	1.87	24.87	90.76
15 :20	0.31	13.34	1.89	25.21	12.14	1.80	21.85	86.67
15 :30	0.31	11.93	1.80	21.47	10.9	1.76	19.18	89.33
15 :40	0.33	11.63	1.75	20.35	10.53	1.68	17.69	86.93
15 :50	0.33	10.12	1.56	15.78	8.96	1.49	13.35	84.60
16 :00	0.34	9.49	1.48	14.05	8.32	1.42	11.81	84.06
16 :10	0.33	7.6	1.41	10.72	6.65	1.34	8.91	83.12
16 :20	0.36	6.65	1.23	8.15	5.61	1.15	6.45	79.14
16 :30	0.37	5.8	1.17	6.79	4.9	1.14	5.59	82.33
16 :40	0.37	5.5	0.44	2.42	4.5	0.37	1.67	68.80
16 :45	0.44	0.92	0.29	0.26	0.21	0.29	0.06	23.08
17 :00	0.4	0.91	0.29	0.26	0.19	0.29	0.05	19.23

Tableau 4.4.1. Résultats expérimentaux pour un panneau PV.

V_{PV} : La tension du panneau photovoltaïque

I_V : Le courant du panneau photovoltaïque

P_{PV} : La puissance extraite du panneau photovoltaïque

V_S : de la tension du la charge

I_S : le courant de la charge

P_S : la puissance de charge.

η : le rendement du convertisseur boost.

MPPT(%) : l'efficacité du contrôleur MPPT.

La figure 4.4.1 montre que les signaux de puissances P_{PV} et P_S présentent une certaine stabilité avec des oscillations peu importantes. La puissance de la charge P_S suit convenablement le changement de la puissance du panneau P_{PV} , mais la puissance n'est pas entièrement transférée à la charge.

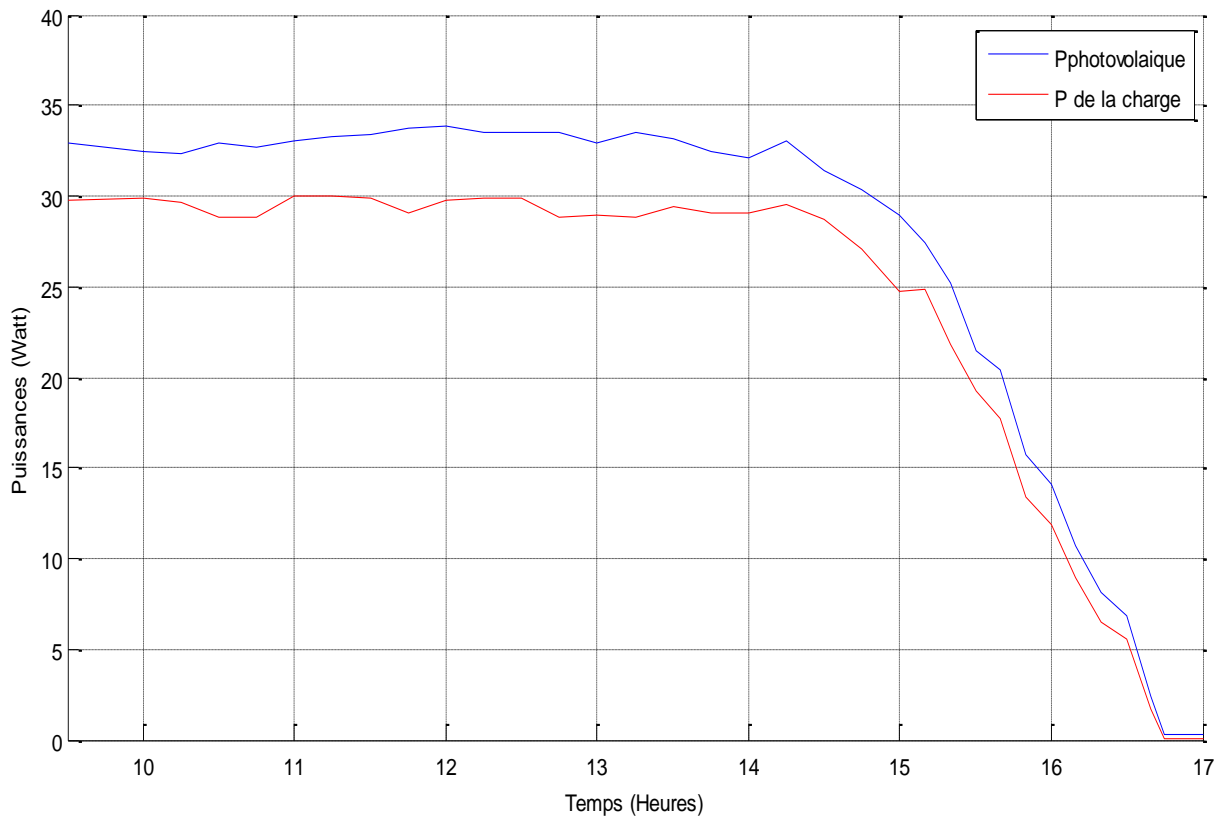


Figure 4.4.1 : Tracé des puissances

Le rendement fourni par le convertisseur boost est appréciable. Ses valeurs fluctuent entre 82.33% et 92.14% durant la période [9^h30, 16^h00] et commence à chuter à partir de 16^h40 pour atteindre 19.23 % à 17^h00.

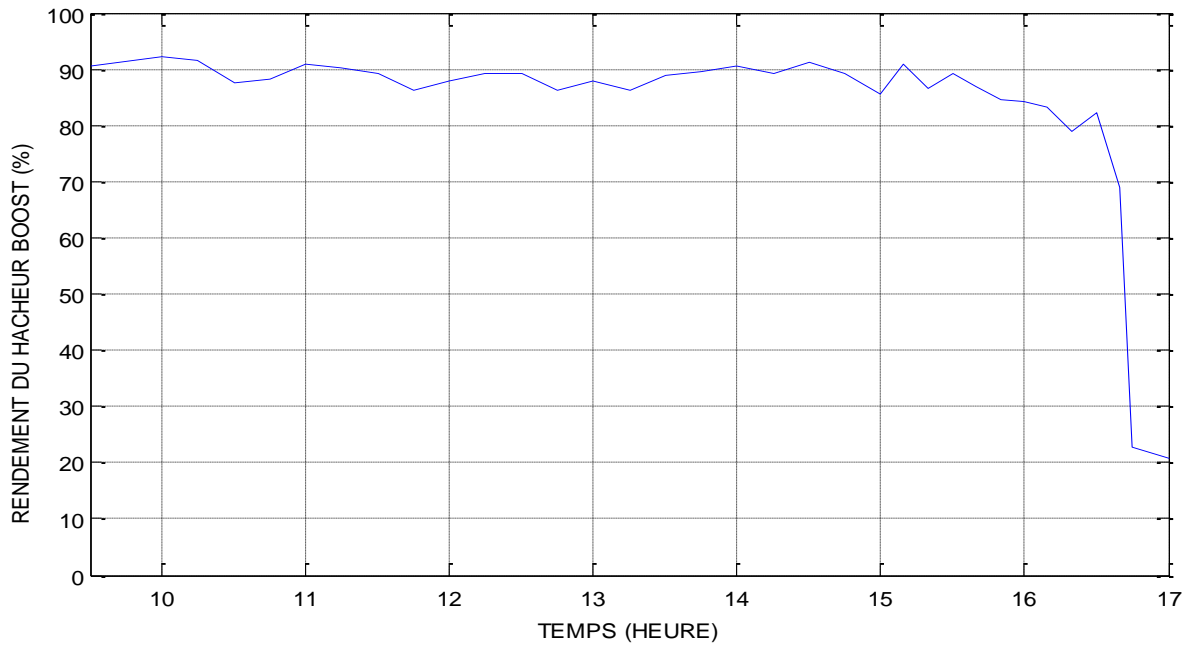


Figure 4.4.2 : Tracé du rendement du convertisseur boost

Pour la seconde série de mesures, 21 septembre, nous avons extrait les tensions et courants de sortie du panneau disponible à partir de la courbe $I=f(V)$, en utilisant une charge électronique, correspondant au point de puissance maximale. Nous avons mesuré aussi les tensions et les courants de sortie du panneau et du convertisseur Boost relié à la charge. Les mesures effectuées nous ont permis de déduire les valeurs de la puissance disponible délivrée par le panneau, la puissance extraite du panneau photovoltaïque, la puissance de charge, le rendement du convertisseur boost et l'efficacité du MPPT.

Les conditions climatiques, durant cette journée, différaient de celles du 29 juin, car le ciel était nuageux et l'ensoleillement n'était stable. Par conséquent, la prise des mesures était difficile.

Les résultats des tests sont affichés dans le tableau 4.4.2 :

V_D : la tension du panneau mesuré à vide.

I_D : le courant du panneau mesuré à vide.

P_D : la puissance disponible délivrée par le panneau

V_{PV} : La tension du panneau photovoltaïque

I_V : Le courant du panneau photovoltaïque

P_{PV} : La puissance extraite du panneau photovoltaïque

V_S : de la tension du la charge

I_S : le courant de la charge

P_S : la puissance de charge.

η : le rendement du convertisseur boost.

MPPT(%) : l'efficacité du contrôleur MPPT.

TEMPS (Heure)	V _D (V)	I _D (A)	P _D (W)	V _{PV} (V)	I _V (A)	P _{PV} (W)	Efficacité du MPPT (%)	V _S (V)	I _S (A)	P _S (W)	η (%)
8 :30	8,5	0,21	1,79	0,89	0,24	0,21	11,73	0,71	0,23	0,16	76,19
9 :00	15	0,69	10,35	6,12	1,17	7,16	69,18	5,34	1,14	6,09	85,06
9 :45	14,09	0,97	13,67	8,34	1,11	9,26	67,74	5,23	1,1	5,75	62,1
10 :00	13,61	1,68	22,86	15,42	1,23	18,97	82,98	14,51	1,21	17,56	92,57
10 :15	13,36	0,6	8,02	7,42	0,72	5,34	66,58	4,72	0,64	3,02	56,55
10 :30	13,53	0,67	9,07	6,02	1,12	6,74	74,31	5,35	1,1	5,89	87,39
11 :00	12,39	1	12,39	9,46	1,42	13,43	108,39	8,44	1,39	11,73	87,34
11 :17	14,6	1,7	24,82	13,23	1,64	21,7	87,43	12,65	1,63	20,62	95,02
11 :30	13,66	2,33	31,83	16,11	1,72	27,71	87,06	14,95	1,72	25,71	92,78
11 :45	13,21	1,09	14,4	7,95	1,32	10,49	72,85	7,04	1,33	9,36	89,23
12 :00	14,91	0,69	10,29	7,59	1,19	9,03	87,76	6,73	1,2	8,08	89,48
12 :15	11,4	0,75	8,55	5,87	1,1	6,46	75,56	4,72	0,98	4,63	71,67
12 :30	14,24	0,61	8,69	7,39	0,69	5,79	18,99	6,87	0,68	4,67	64,85
12 :45	10,96	0,73	8	6,64	1,09	7,24	90,5	5,57	1,06	5,9	81,49
13 :00	12,82	1,01	12,95	5,22	0,97	5,06	39,07	4,78	0,93	4,45	87,94
13 :15	13,85	0,61	8,45	3,19	0,81	2,58	30,53	2,37	0,79	1,87	72,48
13 :30	8,13	0,25	2,03	0,92	0,26	0,24	11,78	0,71	0,25	0,18	74,27

Tableau 4.4.2. Résultats expérimentaux pris le 21 Septembre 2010.

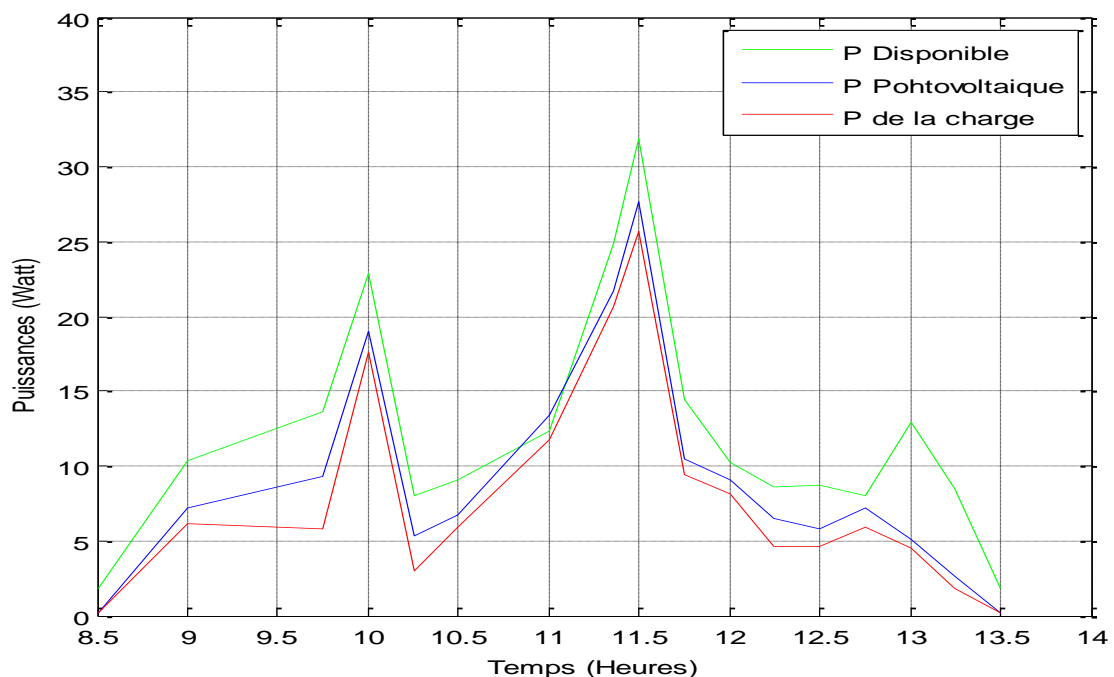


Figure 4.4.3 : Tracé des puissances

On remarque que les tracés de la puissance photovoltaïque, P_{PV} , extraite du panneau et la puissance de la charge, P_S , suivent l'évolution de celui de la puissance disponible P_D mais leurs valeurs restent inférieures. Cette chute de puissance est due non seulement à l'efficacité du contrôleur MPPT mais aussi aux caractéristiques de la lampe (12 volts, 21Watt). La figure 4.4.3 montre que les signaux de puissances P_D , P_{PV} , P_S présentent une certaine fluctuation due aux changements de l'ensoleillement. La puissance de la charge P_S suit convenablement le changement de la puissance du panneau P_{PV} .

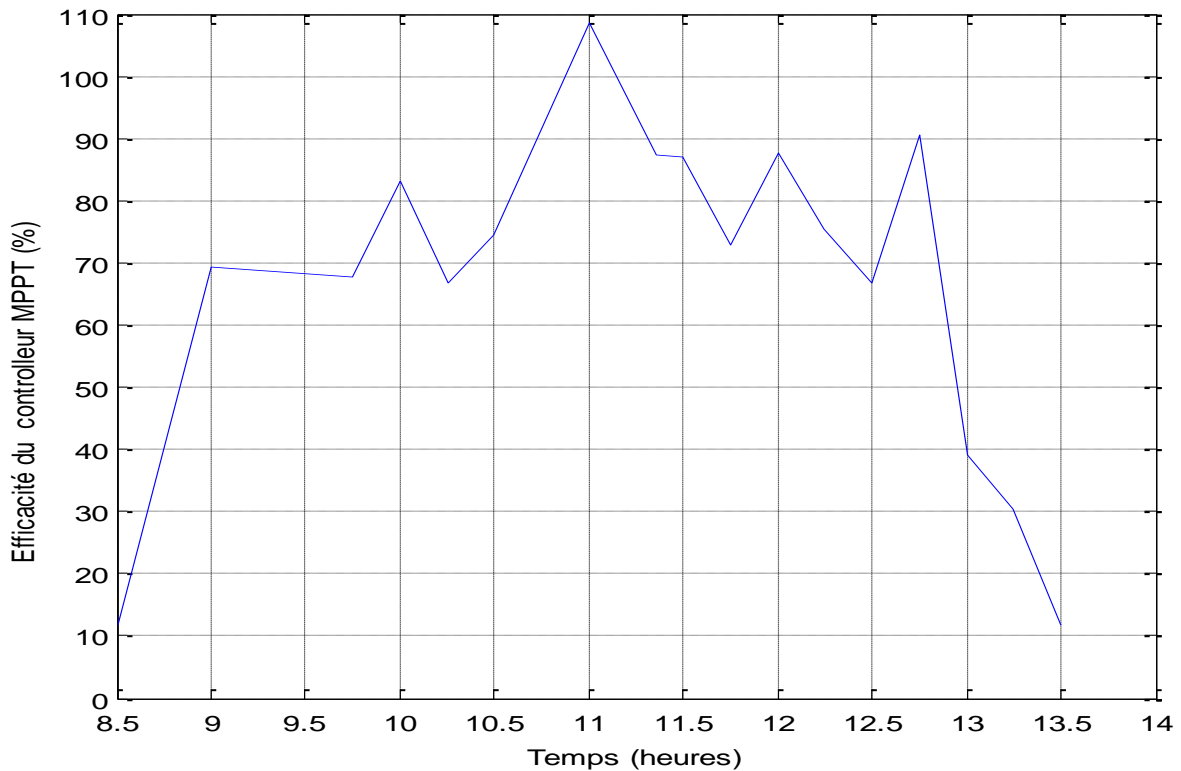


Figure 4.4.4 : Graphe reflétant l'efficacité du contrôleur MPPT

On note que l'efficacité du MPPT est sensible aux changements de l'ensoleillement. Durant la période [8^h30, 9^h00] l'efficacité varie entre 11,73% et 69,18%. Avec l'augmentation de l'ensoleillement, l'efficacité dépasse les 90% à 11^h10. A partir de 15h00, elle chute avec la diminution de l'ensoleillement pour atteindre la valeur 4.85% à 17^h00.

Le rendement du hacheur boost, qui est sensible aux variations de l'ensoleillement, est appréciable. Ses valeurs fluctuent entre 76,19% et 56,55 % durant la période [8^h30, 10^h15] pour atteindre 90,88% à 11H00. Il commence à chuter avant d'atteindre 72.48 % à 13^h15.

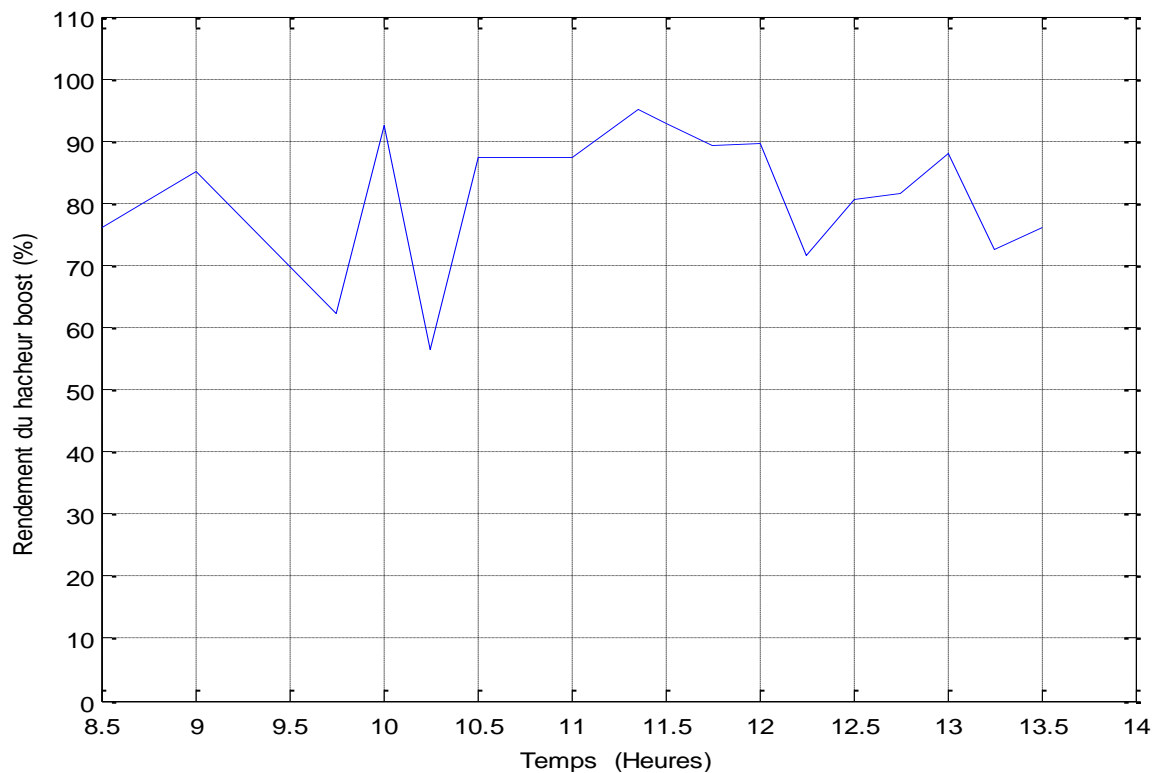


Figure 4.4.5 : Tracé du signal du rendement du convertisseur boost

4.5. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons choisi la méthode de contre réaction de la tension utilisant la cellule pilote pour la réalisation du contrôleur MPPT, nous avons utilisé un convertisseur de type Boost.

En premier lieu, nous avons procédé à la sélection des composants utilisés dans la réalisation du banc d'essai. Puis, nous avons réalisé le convertisseur Boost, la carte d'alimentation, la carte de commande MPPT et la carte shunt de mesure. La dernière étape est dédiée aux tests et à l'interprétation des résultats. On a commenté les performances de cette technique. La simulation effectuée sous MATLAB a permis d'obtenir des résultats meilleurs par rapport à ceux de la réalisation. Cela est dû au fait que les composants utilisés en simulation sont idéaux contrairement à ceux employés en pratique. L'autre difficulté était due aux changements aléatoires des conditions atmosphériques (ensoleillement), ce qui a influé sur la qualité de la prise des mesures,

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Le travail que nous vous avons présenté a consisté à mettre au point un banc d'essai photovoltaïque. Il a pour but de réaliser un outil pour le développement de système de commande afin d'augmenter le rendement de la conversion, permettant la maximisation de la production de l'électricité.

Pour effectuer ce travail, nous avons effectué une étude théorique des composants de la chaîne photovoltaïque, entre autres, le générateur photovoltaïque, les convertisseurs et les batteries. Nous avons passé en revue quelques méthodes de la recherche du point de puissance maximale (MPPT), adoptées afin d'améliorer le rendement du système photovoltaïque.

La seconde étape avait pour objectif le test de la performance de ces méthodes. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel SIMULINK DE MATLABR2007b qui nous a permis de simuler les méthodes P&O, P&O améliorée, l'algorithme à incrémentale de conductance et la technique basée sur la contre réaction de la tension avec une cellule pilote.

Nous avons testé ces techniques à l'état stable et lors de changement des conditions atmosphériques (ensoleillement, température) lent ou brusques.

La maximisation de la production, compte tenu du caractère fluctuant de la source PV considérée, passe par le développement de commandes de types MPPT performantes, à hauts rendements, en particulier lors des divers états transitoires (changements brusques d'ensoleillement et de la température).

Dans la phase de la réalisation du banc d'essai photovoltaïque, pour notre part, nous avons opté pour une commande à contre réaction de tension avec une cellule pilote, en raison du coût réduit de cette dernière. Nous avons réalisé une commande MPPT incluant un générateur PWM et un driver.

Dans ce travail, notre choix s'est porté sur une alimentation à découpage utilisant un convertisseur BOOST ayant un MOSFET de type IRP360.

Nous avons réalisé une carte shunt qui nous permet de mesurer les tensions et les courants d'entrée et de sortie du système photovoltaïque.

Ce banc d'essai nous a permis de déduire le rendement énergétique de la chaîne de conversion et l'efficacité de la commande MPPT. De plus, il nous offre la possibilité d'analyser le comportement des composants de la chaîne à tout moment et d'effectuer des comparaisons directes sous divers conditions climatiques.

Bibliographie

- [1] www.inti.be
- [2] Énergie solaire photovoltaïque, Auteur: ANNE LABOURET. DUNOD PARISV2003.
- [3] H.J. Möller ,*Semiconductors for Solar Cells*. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.
- [4] H.KNOPF ,*analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle*, Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University 1999.
- [5] C. ALONSO « Contribution à l'optimisation, la gestion le traitement de l'énergie ».mé m o i r e en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger les recherches. université PAUL SABATIER – TOULOUSE, Le 12 Décembre 2003.
- [6] Rémi de BETTIGNIES ,“cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués”,Thèse de Doctorat, École Doctorale d'Angers, 23 Septembre 2003.
- [7] Jancarle L. Santos, Fernando Antunes *,1, Anis Chehab, Ci'cero Cruz“*A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter*”, Federal University of Ceara´ , Available online 29 August 2005
- [8] C.CABAL, “Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque” .Thèse du doctorat, université TOULOUSE III – PAUL SABATIER,15 Décembre 2008.
- [9] J'urgen Schmid, Heribert Schmidt,“*Power Conditioning for Photovoltaic Power Systems*”, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*.2003.
- [10] Akihiro Oi, “*design and simulation of photovoltaic water pumping system*”. Master of Science in Electrical Engineering. Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo. September 2005
- [11] S.ISSAADI, “*Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones*”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2006.
- [12] Shihong Park, Thomas M. Jahns, *Fellow*, “*A Self-Boost Charge Pump Topology for a Gate Drive High-Side Power Supply*”, IEEE transactions on power electronics, VOL. 20, NO. 2, MARCH 2005
- [13] A.F. BOEHINGER, “*self adaptive DC converter for solar apaceraft power supply*”. IEEE Transactions aerospace and Electronic systems, AES-4, n°1,pp102-111,1968.
- [14] Ziyad M. Salameh, Fouad Dagher, and William A. Lynch. *Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems*. Solar Energy,46(5):279{282, 1991.
- [15] K. SOBAlHI, *Etude et réalisation d'un hacheur de tracking (MPPT) à contre réaction de tension*, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2003.
- [16] Charles R. Sullivan and Matthew J. Powers. *High-eÆciency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle*. In *Proceedings of the 1993 IEEE 24th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pages 574{580, Seattle, WA, USA, June 1993. IEEE, IEEE Piscataway, NJ, USA.
- [17] Ziyad M. Salameh, A. K. Mulpur, and F Dagher. *Two stage electrical array recon_guration controller for PV powered water pump*. In *Pro-ceedings of the 1988 Annual Meeting, American Solar Energy Society*, pages 399{404, June 1988.

Bibliographie

- [18] J. FADAT, “ Chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque Commande MPPT”, *La Revue 3EI n° 43 – Décembre 2005*
- [19] K.H.Hussein, I.Muta, T. Hoshino and M.Osakada. “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing conditions”. IEEE proceedings. Generation, Transmission and distributions. Vol142, pp 59-64. Stevenage, Herts, UK, January 1995.
- [20] www.datasheetcatalog.com
- [21] www.lem.com.

PROGRAMMES SIMULÉS SOUS MATLAB

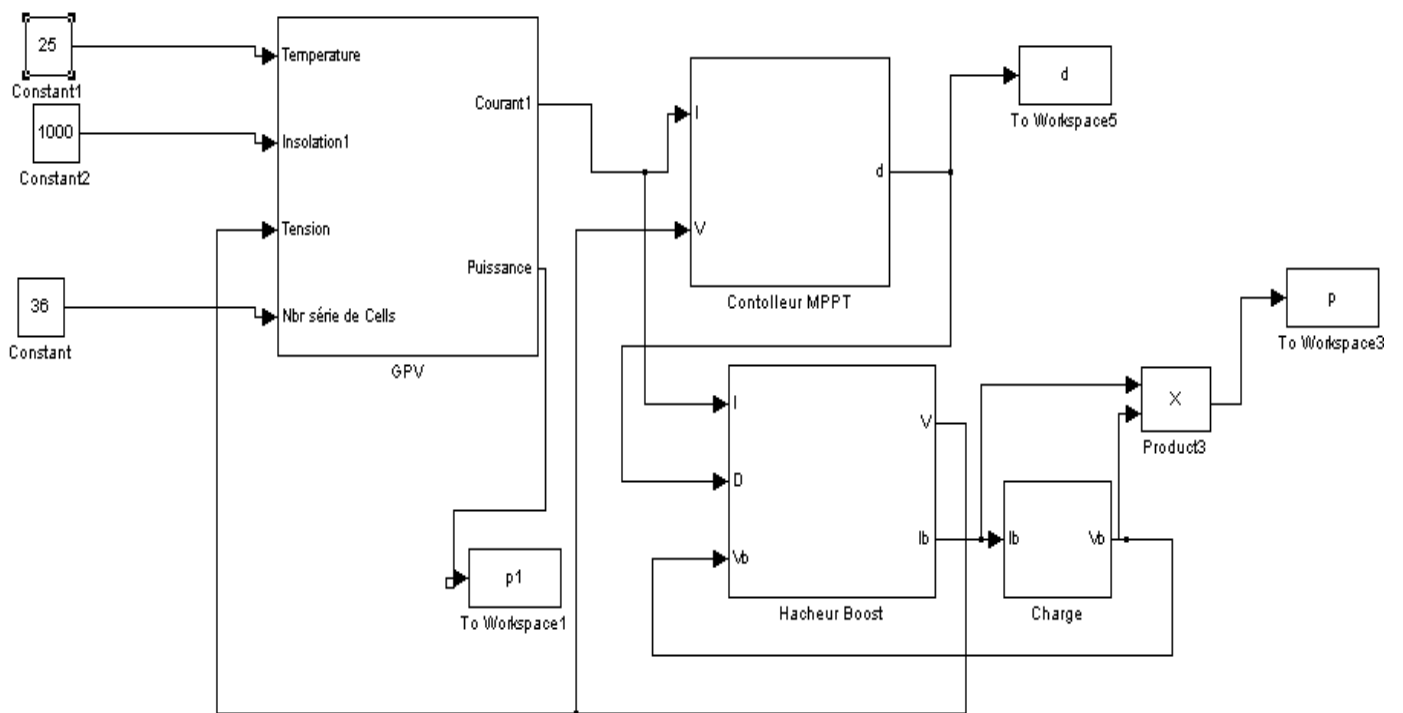


Figure 1: Modèle de système photovoltaïque

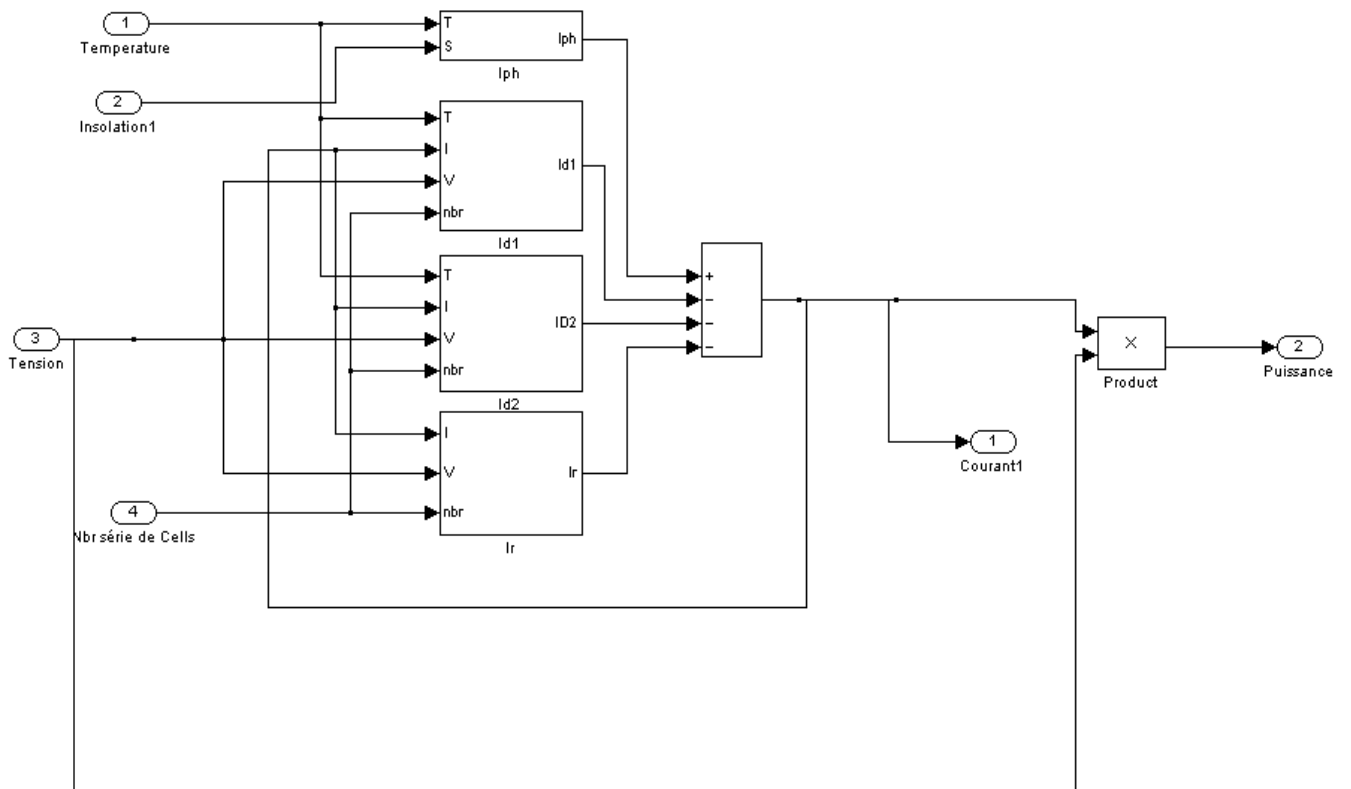


Figure 2: Panneau photovoltaïque (GPV)

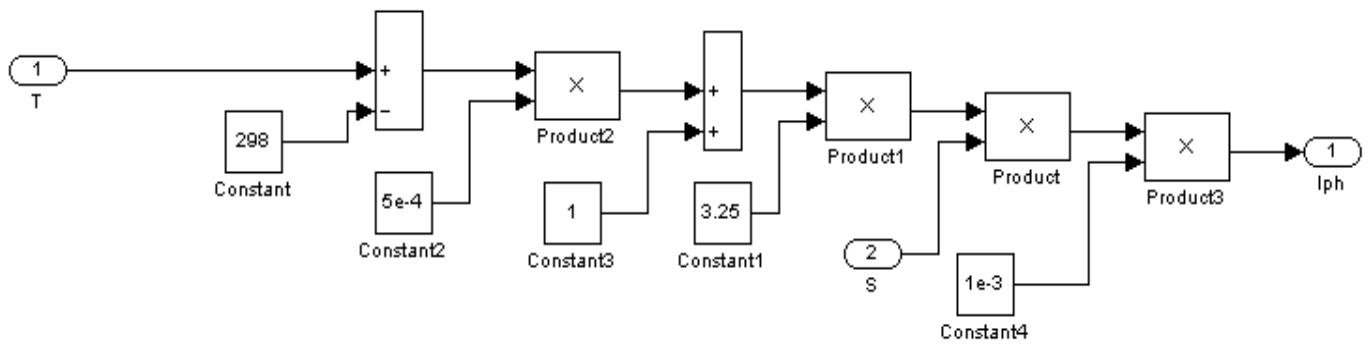


Figure 3 : le bloc Iph

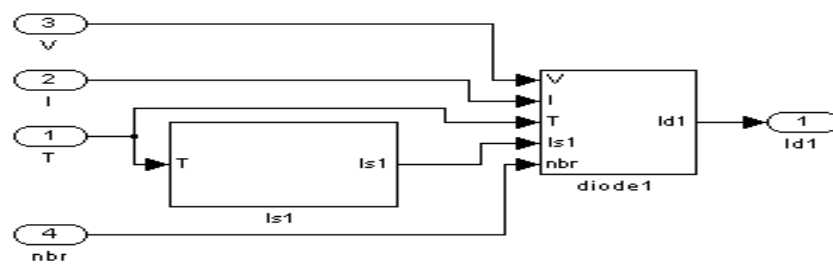


Figure 4 : le bloc Id1

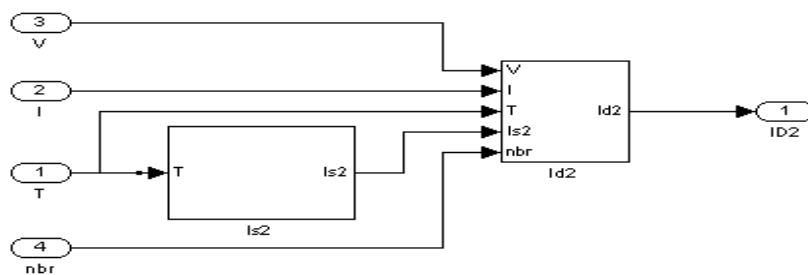


Figure 5: le bloc Id2

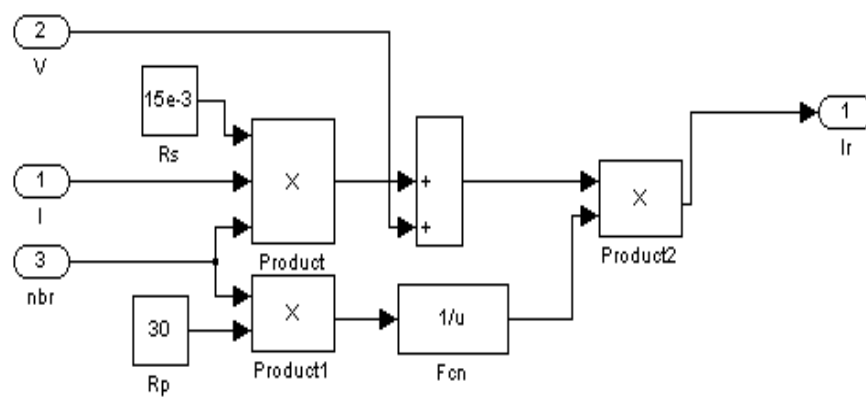


Figure 6 : le bloc Ir

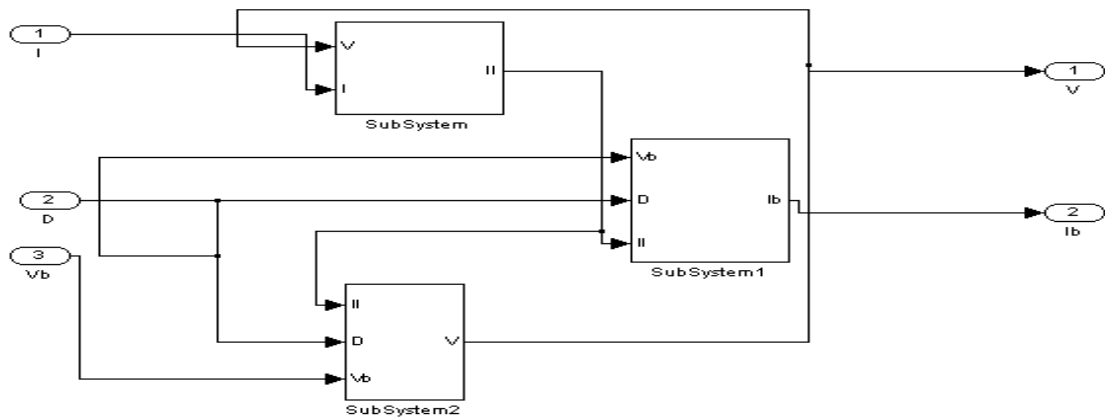


Figure 7: Convertisseur Boost

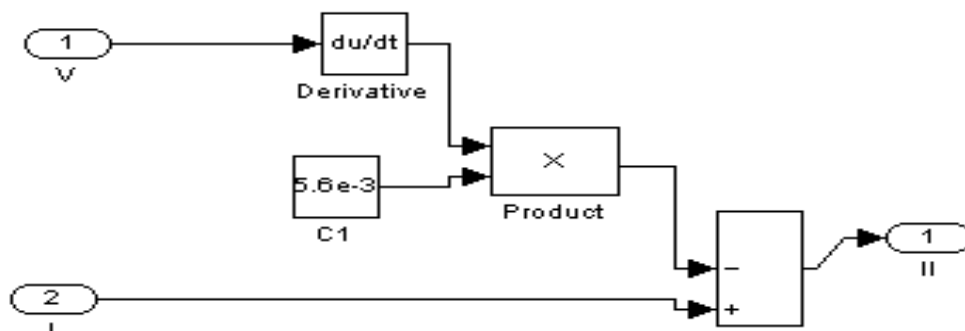


Figure 8: Sub system

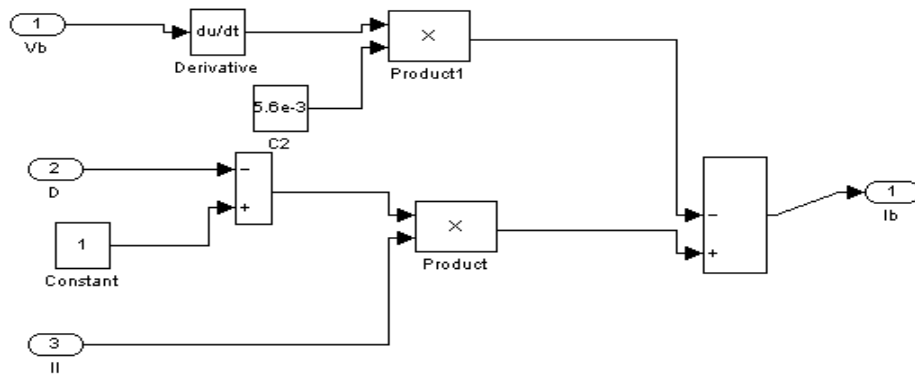


Figure 9 : Sub system1

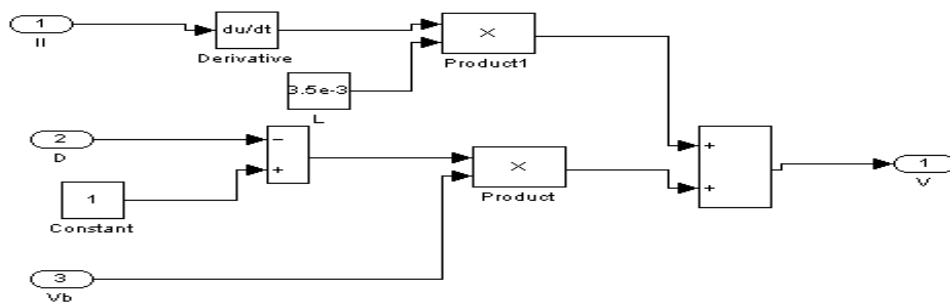


Figure 10 : Sub system2

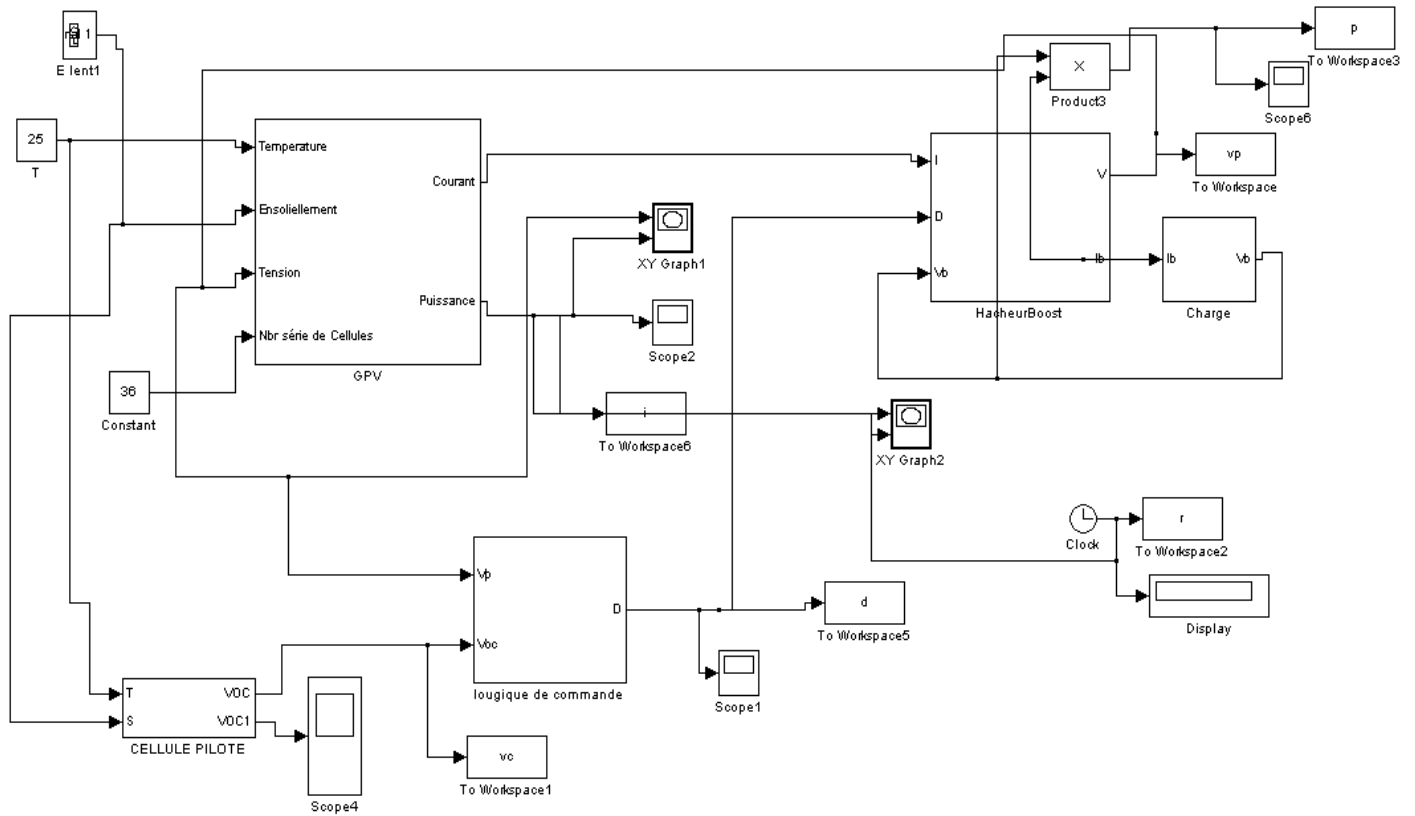


Figure 11 : système photovoltaïque utilisant une cellule pilote

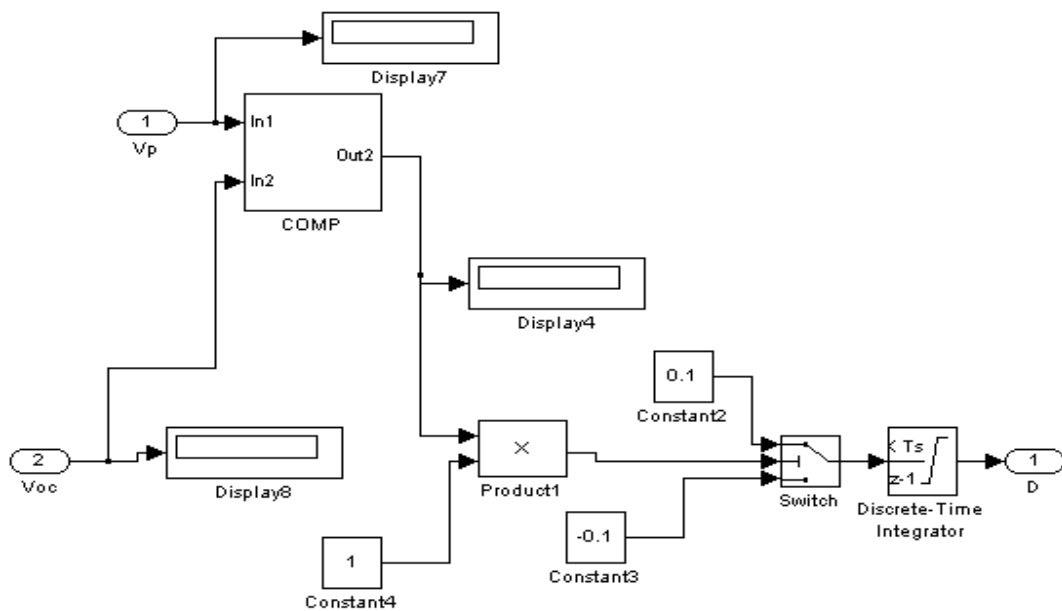


Figure 12 : commande MPPT destinée au système photovoltaïque utilisant une cellule pilote

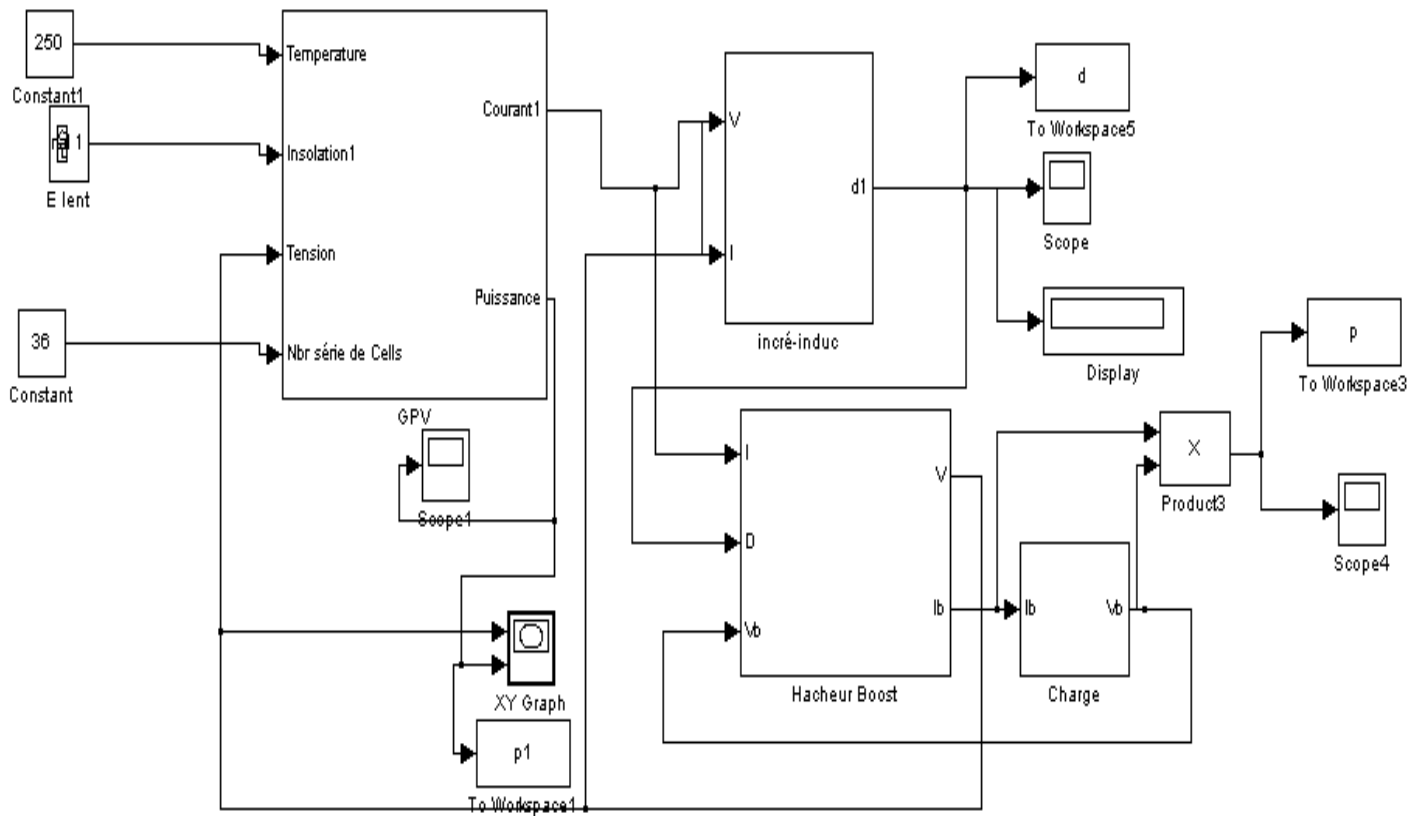


Figure 12 : Système photovoltaïque utilisant la technique de l'incrémentale de conductance

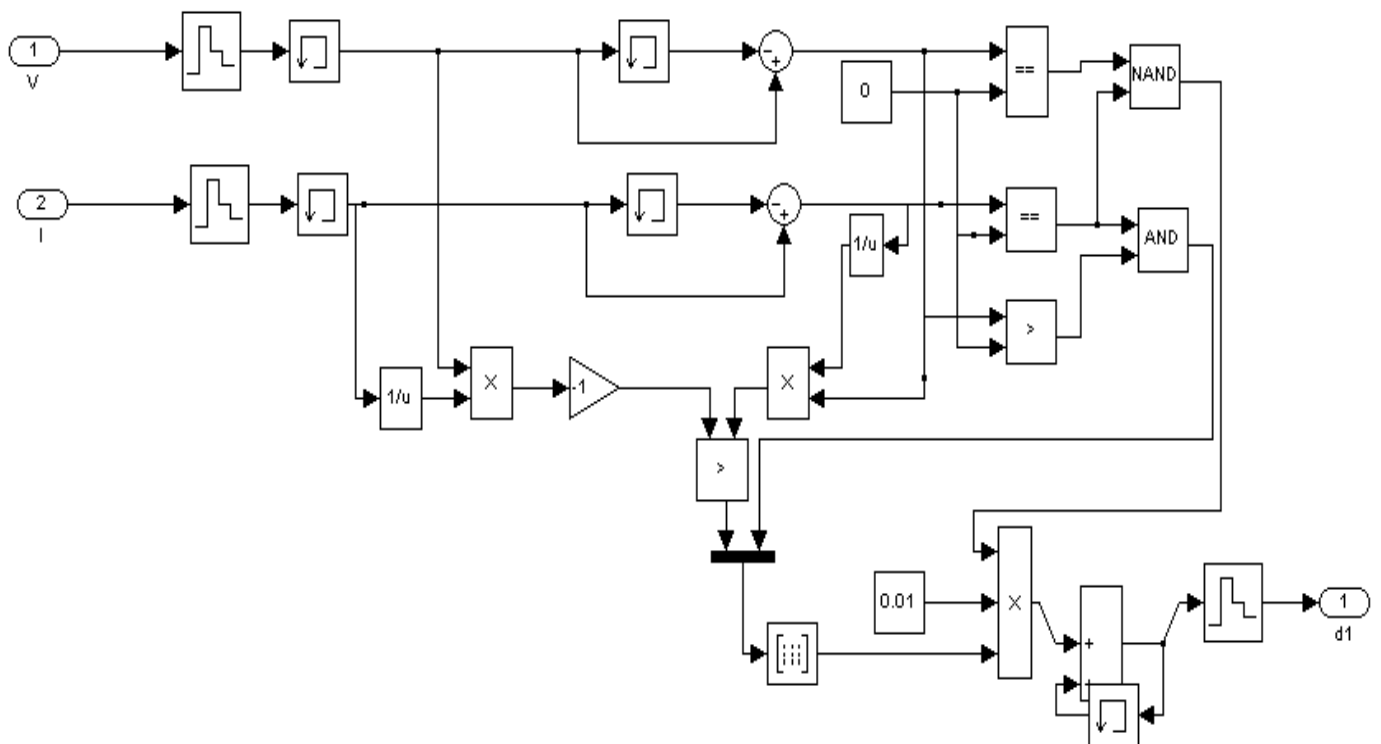


Figure 13 : la technique de l'incrémentale de conductance

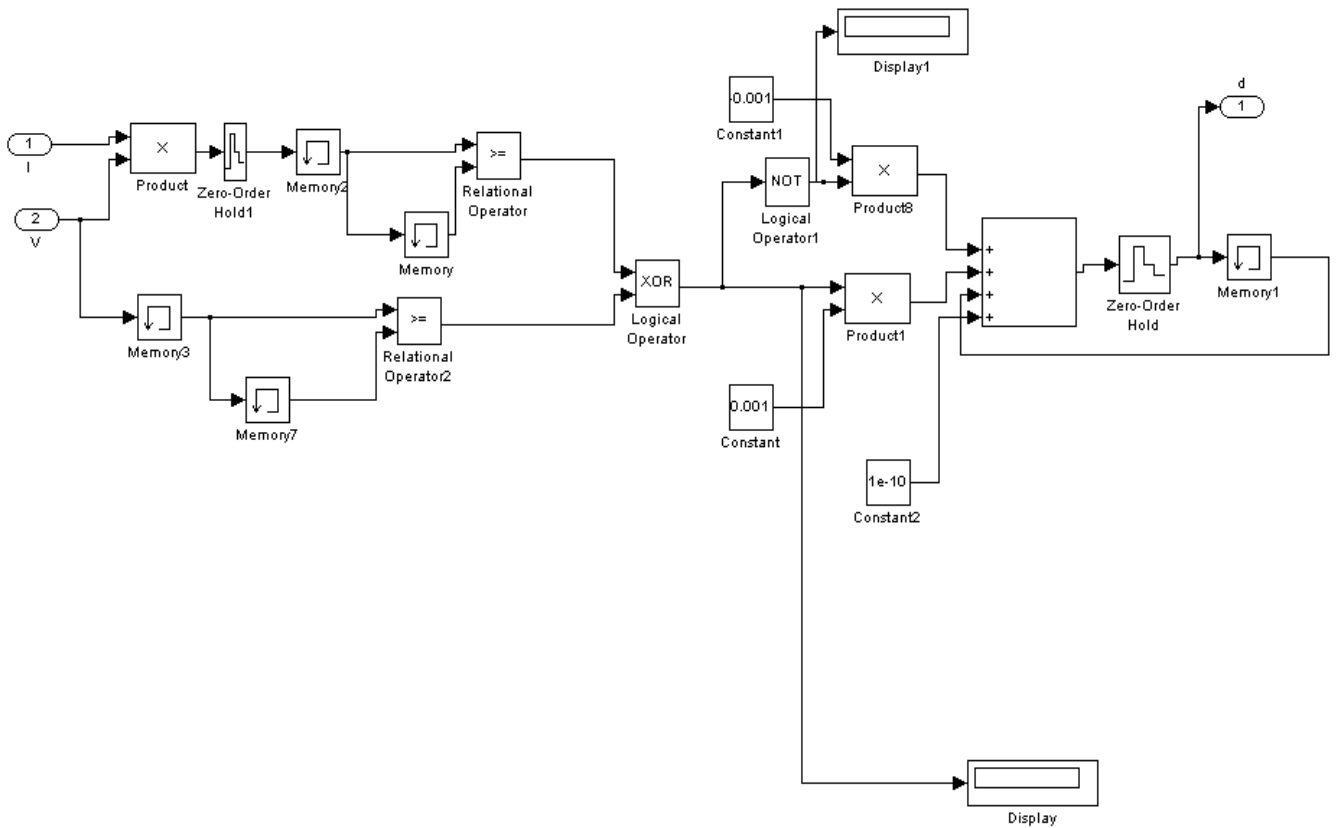


Figure 14 : la technique de P&O

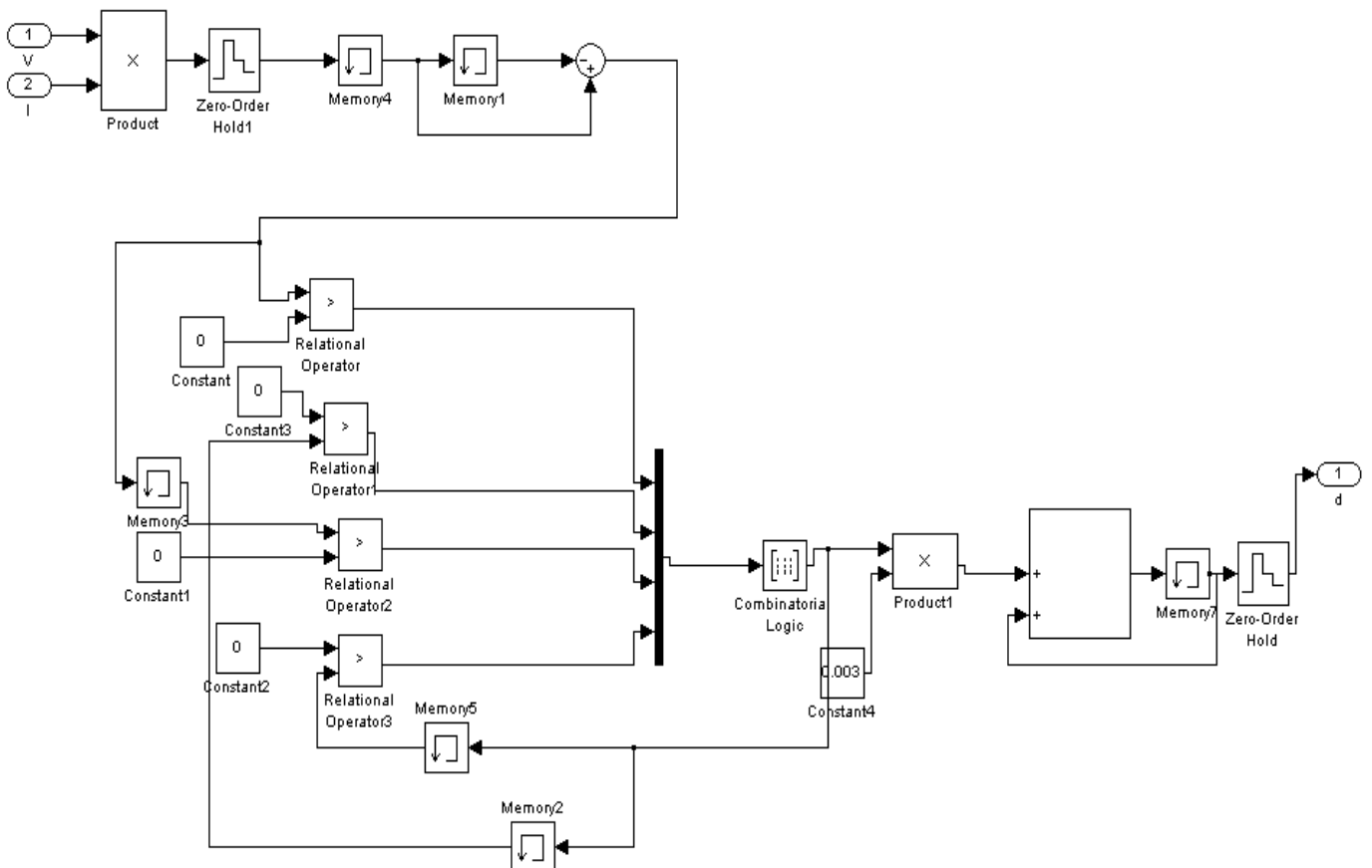


Figure 15 : la technique de P&O améliorée.



Figure1 : convertisseur type Boost

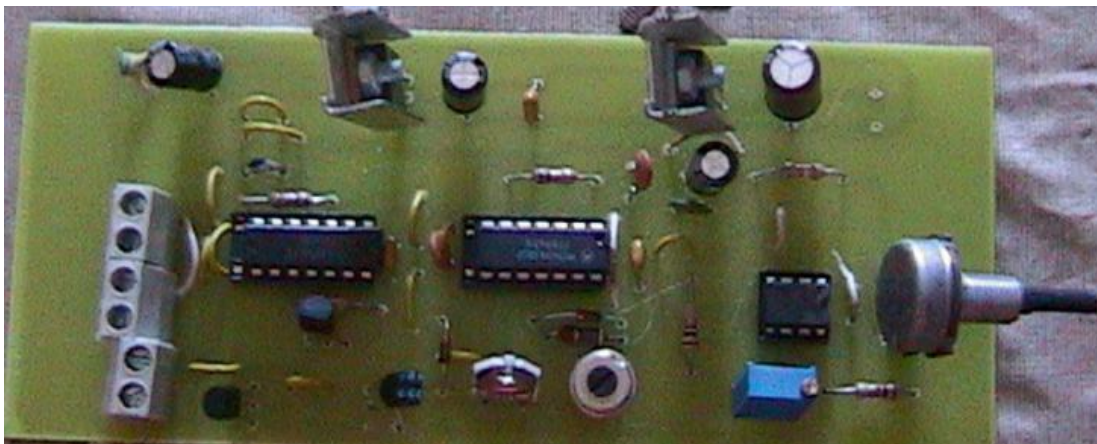


Figure2 : Carte de commande MPPT



Figure3 : Carte de mesure



Figure4 : alimentation symétrique ± 15 volts

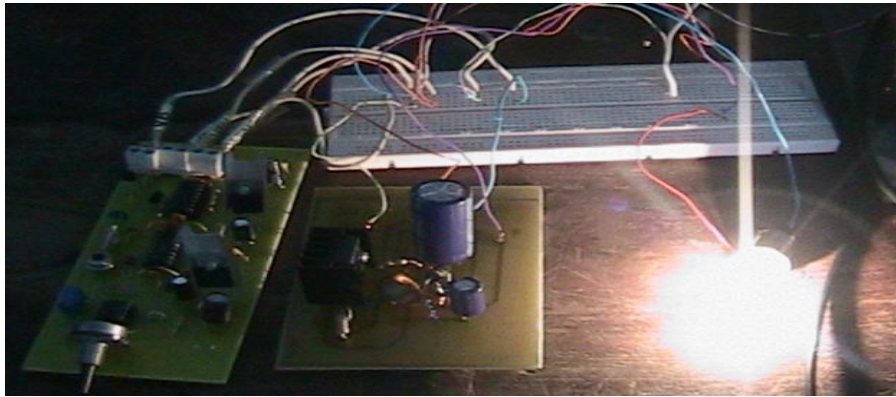


Figure 5 : Banc d'essai en marche.

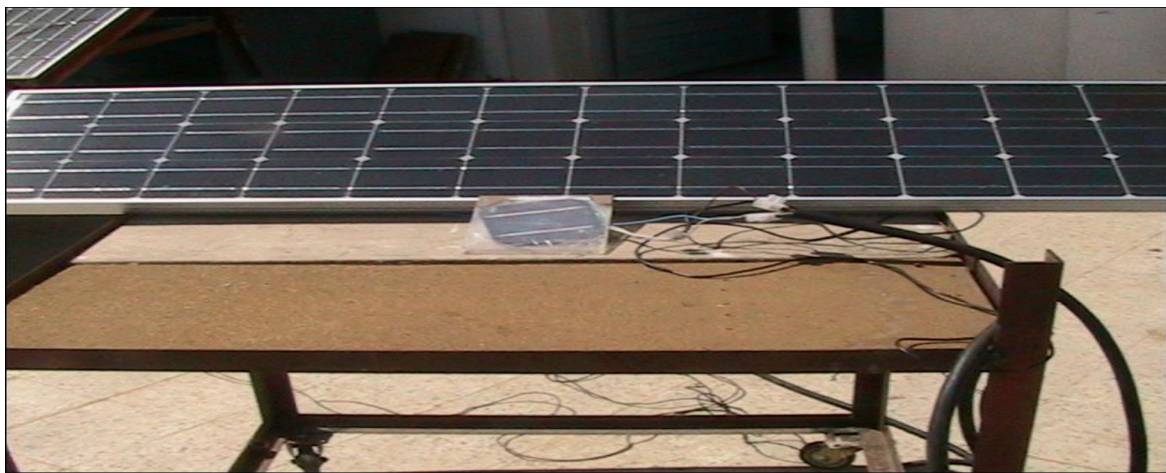


Figure6 : le panneau photovoltaïque utilisé

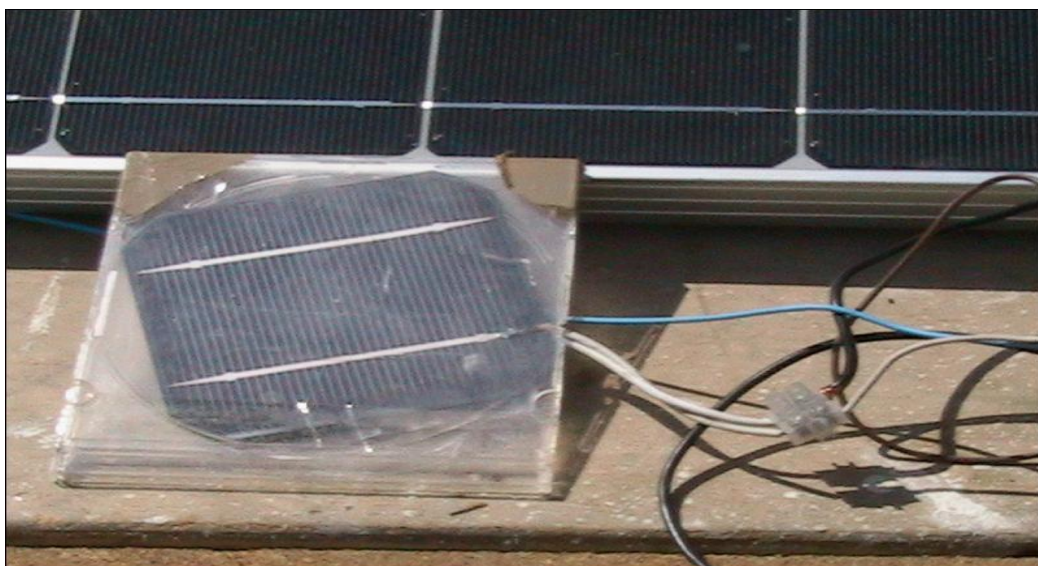


Figure 7 : la cellule pilote utilisée.