

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique

Microsystèmes et microélectronique et conception de circuits

présenté par

Ziani Seyfeddine

&

Ould Mammar Mohamed

---

# Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT)

---

Proposé par : Ould Amrouche Said & Cheggaga Nawale

Année Universitaire 2016-2017

## Remerciements

---

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier Dr : Ould Amrouche Said qui a proposé et a dirigé ce travail.

On remercie également Mdm : Cheggaga Nawal, pour ses précieux conseils

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce Projet en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

A nos parents pour leur compréhension et pour ce qu'ils ont enduré pour nous offrir le bonheur et la confiance, nous exprimons notre gratitude.

Enfin, on tient également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Dédicace

Je dédie ce travail à :

Je tiens d'abord à dédier ce travail aux deux personnes qui comptent le plus pour moi qui sont mes parents.

Je dédie ce travail à mon encadreur et mes professeurs qui m'ont bien entouré tout au long de mes études.

A mes très chers frères et sœurs.

A mon binôme Mohamad qui ma supporter tous ces années.

A toutes mes amies et mes collègues d'études, et surtout Benkercha Rabah.

Et Mr : Cherguelaine mustapha directeur de maison jeune de Beni Tamou.

Seyfeddine

Je tiens d'abord à dédier ce travail aux deux personnes qui comptent le plus pour moi qui sont mes parents. Et aussi à mon très cher frère et sœurs.

Ma famille a était et sera toujours mon premier soutien moral.

Aussi je dédie ce travail à mes amis et collègues de promos qui sont des personnes exceptionnelles.

Enfin je dédie ce travail à mon encadreur et mes professeurs qui m'ont bien entouré tout au long de mes études

Mohamed

---

**ملخص:** تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة من الناحية البيئية. من خصائص الألواح الشمسية إنها لا تعطي استطاعتها العظمى إلا في نقطة عمل معينة تلك النقطة غير ثابتة بل تتحرك مع الظروف الجوية من شدة الضوء والحرارة لذلك وجب الاستغلال الأمثل لطاقة المتوفرة. في هذه المذكرة سنقوم بدراسة ومحاكاة نظامين لتعقب بحيث يكون استعمال نظام التعقب عملي وفعال وبسعر منخفض

**كلمات المفاتيح:** - الاستطاعة القصوى - محول مستمر\_ مستمر – كهروضوئي

---

**Résumé :** L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques ; et un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque travaille avec une meilleure efficacité. Le but de ce mémoire est l'étude et la simulation de deux mécanismes de poursuite

**Mots clés :** Convertisseur DC-DC, MPPT, Photovoltaïque, Poursuite.

---

**Abstract:** Solar electricity is seen as an important source of renewable energy. The photovoltaic array is an unstable source of power. Since the peak power point depends on the cell temperature and the insolation level. A maximum peak power point tracking is then necessary for maximum efficiency. The aim of this Master thesis is to study and simulate two peak power point tracking methods, in order to make solar energy more efficient.

**Keywords:** DC-DC Converter, MPPT, Photovoltaic, Tracking.

---

## Listes des acronymes et abréviations

$E_{ph}$  : L'énergie de photon.

$h$  : Constante de PLANCK  $= (6.62 \times 10^{-34} \text{ J/s})$ .

$f$  : Fréquence correspondant à la longueur d'onde  $\lambda$ .

$C$  : étant la vitesse de propagation de la lumière  $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ .

PV : photovoltaïque.

$I_{ph}$  : photo-courant.

$I_{sat}$  : courant de saturation dans la diode (A).

$K$  : constante de Boltzmann  $(1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K})$ .

$W_c$  : Watt crête.

GPV : générateur photovoltaïque.

$V_{co}$  : tension de circuit ouvert.

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit.

$V_{ppm}$  : tension au point de puissance maximale.

$I_{ppm}$  : courant au point de puissance maximale.

$P_{max}$  : puissance maximale.

I-V : Le courant en fonction de la tension.

P-V : la puissance en fonction de la tension.

PPM : point de puissance maximum.

MPPT: maximum power point tracking.

DC-DC : continu-continu.

MCC : moteur à courant continu.

DC-AC continu alternative.

PF : point de fonctionnement.

CS : convertisseur statique.

P&O: perturb and observe.

IncCond : incrémentation de la conductance.

$V_{pv}$  : tension du panneau photovoltaïque.

$P_{pv}$  : puissance du panneau photovoltaïque.

D : rapport cyclique.

G : L'éclairement (Radiation).

Max prod : maximum produit.

Somme prod : somme produit.

$E$  : l'erreur.

$CE$  : la variation de l'erreur.

COG : centre de gravité (center of gravity).

NOCT : Normal Operating Cell Température.

STC : condition standards (25°C et 1000W/m<sup>2</sup>).

$V_{out}$  : tension a la sortie du convertisseur boost.

$R_c$  : la résistance de charge.

$\Delta V_{in}$  : ondulation sur la tension d'entrée du boost.

$f_s$  : fréquence de commutation.

$\Delta I_L$  : Ondulation du courant inducteur.

CCM : fonctionnement en mode continue.

Q : la charge du condensateur.

Vref : la tension de référence.

Tr : température de référence = 298 K

T : température expérimental en Kelvin

A = B : facteur d'idéalité = 1.6

q : charge d'Electron =  $1.6 \times 10^{-19}$  C

Rs : résistance séries de module PV

Iscr : courant de courte –circuit de module PV a 25<sup>0</sup> C et 1000W/m<sup>2</sup>

Ki : coefficient de température courant de courte –circuit

Ego: band de gap for silicone = 1.1 eV

Ns : nombre des cellules connectées en séries

Np : nombre des cellules connectées en parallèle

## Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre 1    Système photovoltaïque .....	4
1.1    Introduction .....	4
1.2    Énergie solaire.....	4
1.3    La cellule photovoltaïque.....	5
1.3.1    Effet photovoltaïque .....	5
1.3.2    Technologies des cellules PV.....	6
1.3.3    Modélisation de la cellule PV et choix de circuit équivalent.....	7
a    Modèle à une diode .....	8
b    Modèle à deux diodes.....	9
1.3.4    Paramètre des cellules photovoltaïques.....	10
1.4    Module PV.....	12
1.4.1    Caractéristique courant/tension (I-V) .....	12
1.4.2    Regroupement des cellules en série .....	13
1.4.3    Regroupement des cellules en parallèle .....	14
1.4.4    Regroupement des cellules en (Série + Parallèle).....	15
1.4.5    Influence de la température .....	15
1.4.6    Influence de l'éclairement.....	16
1.5    Champ PV.....	17
1.5.1    Protections classiques d'un GPV .....	18
1.6    Application des systèmes photovoltaïques .....	19
1.6.1    Systèmes hybrides.....	19
1.6.2    Systèmes raccordés au réseau .....	19
1.6.3    Systèmes autonomes .....	20
1.7    Conclusion .....	21
Chapitre 2    Convertisseur DC-DC.....	22
2.1    Introduction .....	22
2.2    Connexion directe générateur photovoltaïque-charge .....	22
2.2.1    Limite de la connexion directe .....	23
2.2.2    Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation.....	24
2.3    Les types des convertisseurs de tension DC/DC .....	25
« HACHEUR ».....	25



2.3.1	Convertisseur Boost .....	25
2.3.2	Convertisseur abaisseur « BUCK » .....	29
2.3.3	Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST » .....	33
2.4	Analyse et choix du convertisseur.....	35
2.5	Avantage de convertisseur BOOST.....	37
2.6	Conclusion .....	38
Chapitre 3	Les méthodes d'optimisation.....	39
3.1	Introduction .....	39
3.2	Principe de fonctionnement de MPPT .....	39
3.3	Classification de l'algorithme de suivi la puissance maximale.....	41
3.3.1	Les méthodes indirectes .....	41
a	Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert .....	42
b	Méthode basée sur la mesure du courant en court-circuit .....	43
3.3.2	Les méthodes directes .....	43
a	Premières commandes MPPT .....	43
b	Algorithme de perturbation et observation.....	44
c	Algorithme Hill Climbing .....	46
d	Algorithme d'incrément de la conductance .....	48
e	Commande MPPT par la logique floue .....	50
3.4	Conclusion.....	52
Chapitre 4	Simulation et évaluation des résultats.....	53
4.1	Introduction .....	53
4.2	L'outil Matlab/Simulink.....	54
4.3	Simulation d'un panneau photovoltaïque .....	55
4.4	Connexion directe PV-charge.....	60
4.5	Modélisation et simulation d'un hacheur élévateur (Boost).....	62
4.5.1	Dimensionnement des paramètres du le convertisseur DC- DC Boost.....	62
4.5.2	Simulation du convertisseur DC-DC Boost .....	67
4.6	Simulation de l'algorithme MPPT Perturb and Observe (P&O) .....	68
4.6.1	Bloc MATLAB de l'algorithme P&O et signal PWM .....	68
4.6.2	Le code MATLAB de l'algorithme P&O.....	69
4.6.3	Simulation de système globale (Module PV, convertisseur, MPPT, charge) .....	69
4.6.4	Discussion des résultats obtenus .....	72
4.7	Simulation de l'algorithme logique floue.....	72

4.7.1	Bloc MATLAB de l'algorithme logique floue complet .....	75
4.7.2	Simulation de système globale (Module PV, convertisseur, MPPT, charge) .....	75
4.7.3	Discussion des résultats obtenus .....	78
4.8	Comparaison entre les commandes (P&O et la logique floue).....	79
4.8.1	Comparaison dans les conditions standard ( $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{w}/\text{m}^2$ ) .....	79
a	Discussion des résultats obtenus .....	79
4.8.2	Comparaison entre les commandes (P&O et la logique floue) avec une variation d'ensoleillement.....	80
a	Discussion des résultats obtenus .....	80
4.9	Conclusion .....	81
	Conclusion générale.....	82
	Annexes.....	84
	Bibliographies.....	90

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Le potentiel en l'Algérie en énergie solaire.....	1
<b>Figure 1.1.</b> L'effet photovoltaïque.....	6
<b>Figure 1.2.</b> Les différents types de cellules. ....	7
<b>Figure 1.3.</b> Schéma équivalent d'une cellule PV à une diode. ....	8
<b>Figure 1.4.</b> Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes. ....	9
<b>Figure 1.5.</b> : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit.....	10
<b>Figure 1.6.</b> : Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert.....	10
<b>Figure 1.7.</b> Caractéristique courant-tension d'une photopile.....	11
<b>Figure 1.8.</b> La caractéristique ( $I-V$ ) d'une cellule photovoltaïque.....	13
<b>Figure 1.9.</b> Caractéristique courant tension de $N_s$ cellule en série.....	14
<b>Figure 1.10.</b> Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.....	14
<b>Figure 1.11.</b> Caractéristiques courant-tension pour différentes assemblage de modules PV.....	15
<b>Figure 1.12.</b> La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température.....	16
<b>Figure 1.13.</b> La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température.....	16
<b>Figure 1.15.</b> La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement .....	17
<b>Figure 1.16.</b> Protection d'un GPV avec diode by-pass et diode anti-retour.....	18
<b>Figure 1.17.</b> Système hybrides PV éoliens. ....	19
<b>Figure 1.18.</b> Système PV raccordé au réseau. ....	20
<b>Figure 1.19.</b> Système PV autonome avec ou sans conversion DC/AC.....	20
<b>Figure 2.1.</b> Connexion directe d'un GPV à sa charge. ....	23
<b>Figure 2.2.</b> Points de fonctionnement pour différentes charges .....	24
<b>Figure 2.3.</b> Etage d'adaptation entre le GPV et la charge.....	24
<b>Figure 2.4.</b> Symbole et signaux du convertisseur DC/DC .....	25

<b>Figure 2.5.</b> Schéma de principe d'un convertisseur élévateur du type Boost .....	25
<b>Figure 2.6.</b> Circuit équivalent pour $T_{ON}$ .....	26
<b>Figure 2.7.</b> Circuit équivalent pour $T_{OFF}$ .....	27
<b>Figure 2.8.</b> Forme du courant $i_1$ .....	27
<b>Figure 2.9.</b> Chronogrammes du convertisseur élévateur « Boost ».....	29
<b>Figure 2.10.</b> Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck » .....	30
<b>Figure 2.11.</b> Convertisseur Buck Durant l'état on.....	31
<b>Figure 2.12.</b> Convertisseur Buck Durant l'état off.....	31
<b>Figure 2.13.</b> Chronogramme du convertisseur abaisseur « Buck ».....	32
<b>Figure 2.14.</b> Schéma du convertisseur inverseur « Buck-Boost » .....	33
<b>Figure 2.15.</b> Convertisseur Buck-Boost Durant l'état ON.....	34
<b>Figure 2.16.</b> Convertisseur Buck-Boost Durant l'état OFF.....	34
<b>Figure 2.17.</b> Chronogrammes du convertisseur inverseur « Buck-Boost » .....	35
<b>Figure 2.18.</b> Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.....	36
<b>Figure 2.19.</b> Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseur.....	37
<b>Figure 3.1.</b> Variation du Point de Puissance Maximale avec l'éclairement, la température la charge	41
<b>Figure 3.2.</b> Organigramme de la première commande MPPT.....	44
<b>Figure 3.3.</b> Caractéristique $P_{PV}$ ( $V_{PV}$ ) d'un panneau solaire.....	45
<b>Figure 3.4 :</b> Organigramme de la méthode P&O .....	46
<b>Figure 3.5.</b> Principe de la méthode HC .....	47
<b>Figure 3.6.</b> Algorithme de la méthode HC .....	47
<b>Figure 3.7.</b> Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond.....	48
<b>Figure 3.8.</b> Organigramme de la méthode IncCond .....	49

<b>Figure 3.9.</b> Schéma de principe de la régulation floue .....	50
<b>Figure 3.10.</b> Fonctions d'appartenances de : L'entrée E ; L'entrée CE et La sortie dD.....	51
<b>Figure 4.1.</b> Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT.....	53
<b>Figure 4.2.</b> Bibliothèque SIMULINK.....	54
<b>Figure 4.3.</b> Schéma bloc du module PV en MATLAB-SIMULINK.....	56
<b>Figure 4.4.</b> Sous-systèmes du module PV en MATLAB-SIMULINK.....	56
<b>Figure .4.5.</b> Bloc de conversion T(k).....	57
<b>Figure .4.6.</b> Bloc de $I_{sat}$ .....	57
<b>Figure .4.7.</b> Bloc de $I_{ph}$ .....	58
<b>Figure .4.8.</b> Bloc de $I_0$ .....	58
<b>Figure .4.9.</b> Sous-système $N_sAKT$ .....	59
<b>Figure .4.10.</b> Sous-système $I_{pv}$ .....	59
<b>Figure 4.11.</b> Connexion directe module PV-charge.....	60
<b>Figure 4.12.</b> L'intersection de la caractéristique $I=f(V)$ du module PV et la droite de charge.....	60
<b>Figure 4.13.</b> Modèle SimPower du hacheur Boost.....	62
<b>Figure 4.14.</b> Variation de la valeur L en fonction de D présentée dans (4.3).....	65
<b>Figure 4.15.</b> Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur $C_{in}$ durant une période de commutation T.....	66
<b>Figure 4.16.</b> Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur $C_{out}$ durant une période de commutation T.....	67
<b>Figure 4.17.</b> Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur DC-DC Boost.....	68
<b>Figure 4.18.</b> Bloc MATLAB de de l'algorithme et signal PWM.....	68
<b>Figure 4.19.</b> Schéma MATLAB SIMULINK d'un système PV avec la Commande MPPT (P&O).....	70

<b>Figure 4.20.</b> Tension sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme P&O.....	70
<b>Figure 4.21.</b> Courant sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme P&O.....	71
<b>Figure 4.22.</b> Puissance sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme P&O .....	71
<b>Figure 4.23.</b> Le rendement avec l'algorithme P&O.....	71
<b>Figure 4.24.</b> Fonction d'appartenance de l'entrée E.....	73
<b>Figure 4.25.</b> Block MATLAB de de l'algorithme et signale PWM.....	75
<b>Figure 4.26.</b> Schéma global d'un système PV avec commande MPPT logique flou.....	76
<b>Figure 4.27.</b> Tension sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme floue .....	76
<b>Figure 4.28.</b> Courant sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme floue .....	77
<b>Figure 4.29.</b> Courant sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme floue .....	77
<b>Figure 4.30.</b> Le rendement avec l'algorithme logique flou.....	78
<b>Figure 4.31.</b> Puissance fournie à la sortie de panneau avec les deux commandes P&O) et logique floue.....	79
<b>Figure 4.32.</b> Puissance en fonction de temps sous d'ensoleillement de 700 W/m <sup>2</sup> à 1000 W/m <sup>2</sup> pour les deux algorithmes.....	80

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Rendement des types de silicium.....	7
<b>Tableau 3.1.</b> Principe de l'algorithme P&O.....	45
<b>Tableau 3.2.</b> Exemple d'une table de règles pour une commande logique floue.....	51
<b>Tableau 4.1.</b> Caractéristiques électriques du module PV RISEN SYP185-M.....	55
<b>Tableau 4.2.</b> Résultats de la connexion directe PV-Charge.....	61

# Introduction générale

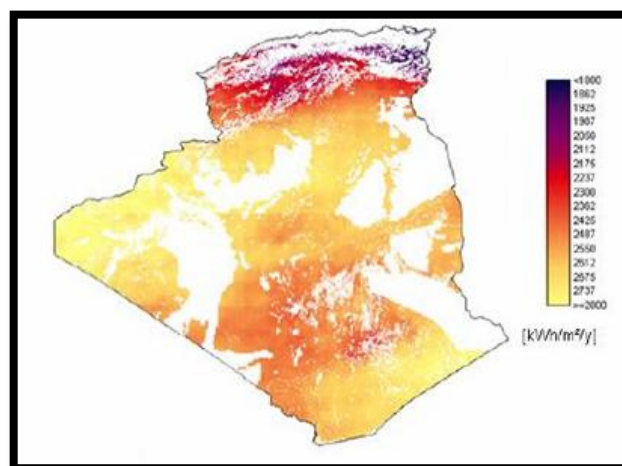
---

Depuis le siècle dernier, la consommation de l'énergie a augmenté d'une manière considérable et nos ressources en pétrole, charbon, ou en gaz ne sont pas éternelles. Et il est aussi de notre devoir de ne pas consommer plus pour ne pas aggraver la pollution.

Une alternative se trouve dans l'utilisation des énergies renouvelables telles que l'énergie hydraulique, éolienne ou solaire. L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique.

L'énergie solaire disponible est souvent exprimée en unités d'énergie par temps par unité de surface, par exemple en Watt par mètre carré ( $W/m^2$ ).

Avec  $2\,381\,741\text{ km}^2$  de surface, l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme (figure 1), et selon les données d'ensoleillement l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés dans le monde [1].



**Figure 1.** Le potentiel en l'Algérie en énergie solaire.



L'énergie solaire est la mieux partagée par tous les habitants du globe terrestre. Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement. Celle dernier et réduit au statut d'énergie par l'effet photovoltaïque.

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie [2].

La caractéristique  $I$ - $V$  du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble de plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologique qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation .le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale(PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique. Plusieurs système a été introduire dans le domaine photovoltaïque pour exploité la puissance maximale parmi ces systèmes on trouve le système connecté au réseau, le système autonome ou/et le système hybride.

L'objet de notre mémoire porte sur la présentation de la technique d'adaptation et commande de ces systèmes. L'étude effectuée est axée et orientée vers l'optimisation de la puissance du générateur PV, et sur l'incorporation d'un convertisseur continu-

continu commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT).

Dans ce travail nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, Ce mémoire est partagé en quatre chapitres :

Où le premier chapitre expose en détail l'énergie photovoltaïque, par l'étude de l'élément de base qui est la cellule, les différentes technologies de constructions, puis le module, ses caractéristiques.

Le deuxième chapitre aborde le problème de couplage, direct et indirect à travers un étage d'adaptation les convertisseurs DC-DC.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des différentes techniques pour suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, présente les différentes méthodes (directes et indirectes) pour optimiser la puissance.

Le quatrième chapitre, présente la simulation du panneau PV et le dimensionnement des différents paramètres du hacheur élévateur utilisé, le système étudié et les résultats de la simulation sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK) de l'ensemble générateur photovoltaïque– hacheur élévateur– charge– commande MPPT, pour une température variable et un éclairement variable. Ainsi que la comparaison entre les deux techniques logique floue et (P&O).

Enfin, une conclusion générale discute les résultats obtenus.

# Chapitre 1 Système photovoltaïque

---

## 1.1 Introduction

L'énergie solaire est disponible partout sur la planète en des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. Son apport est variable, au gré des jours et des saisons, mais elle est relativement prévisible. Même si elle est relativement diluée, son rapport énergétique annuel pourrait répondre à la consommation énergétique de la plupart des pays.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais des capteurs fabriqués avec des matériaux semi-conducteurs, à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit.

Ce chapitre décrit les concepts de base de systèmes photovoltaïques et de production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque [3].

## 1.2 Énergie solaire

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre  $150 \cdot 10^6$  km. La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à  $90 \cdot 10^{15}$  GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que  $180 \cdot 10^6$  GW. Avant d'arriver à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Aussi, on introduit la notion de l'éclairement qui est la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteint  $1 \text{ kW/m}^2$  pour un site situé au niveau de la mer.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et ce malgré une atténuation importante à la traversée de l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante, quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [4].

## **1.3 La cellule photovoltaïque**

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [5].

### **1.3.1 Effet photovoltaïque**

La conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi-conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire (Figure 1.1).

L'effet PV est un phénomène optoélectronique fut découvert par le physicien Français EDMOND BECQUEREL en 1839. Mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Chapin, Pearson et Prince, développent la première cellule PV avec un rendement énergétique ne dépassant pas 4,5% au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites [6].

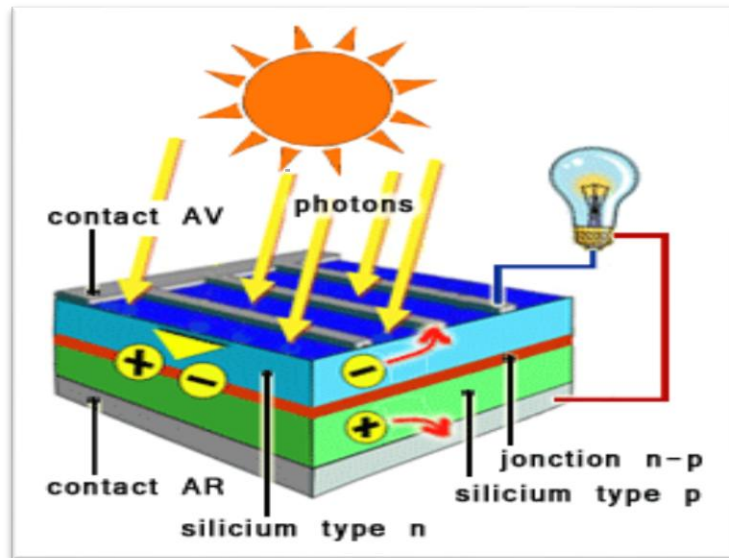


Figure 1.1. L'effet photovoltaïque

### 1.3.2 Technologies des cellules PV

Le matériau de base, utilisé dans la fabrication des cellules PV, est dans la plupart des cas le silicium. Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

#### *a Cellule au silicium monocristallin*

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher [7].

#### *b Cellule au silicium poly-cristallin*

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser [7].

### ***c Cellule au silicium amorphe***

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces [8], mais Leur rendement est plus bas que celui des cellules cristallines.

Le tableau 1.1 montre le rendement de chaque type de cellule.

La Figure 1.2 montre les différents types de cellules.

Types	Monocristallin	poly-cristallin	amorphe
Rendement	13 à 17%	11 à 15%	6 à 10%

**Tableau 1.1.** Rendement des types de silicium



Silicium monocristallin

Silicium poly-cristallin

Silicium amorphe

**Figure 1.2.** Les différents types de cellules.

### **1.3.3 Modélisation de la cellule PV et choix de circuit équivalent**

Pour trouver le modèle d'une cellule PV, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

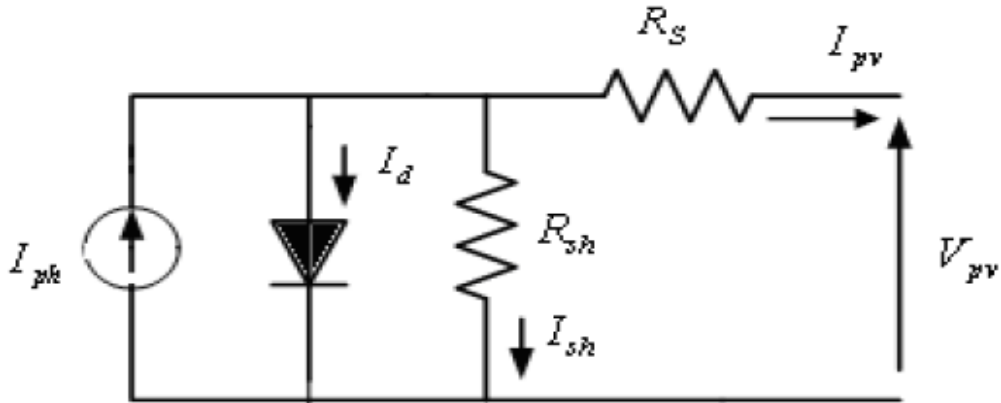
On présentera deux modèles d'une cellule PV:

Modèle à une diode.

Modèle à deux diodes.

### a Modèle à une diode

Le fonctionnement d'une cellule PV est décrit par le modèle standard à une diode, établi par Shokley, est représenté sur la figure (1.3).



**Figure 1.3.** Schéma équivalent d'une cellule PV à une diode.

Comme la montre le schéma de la figure (1.3) une cellule solaire comporte en réalité une résistance série  $R_s$  et une résistance en dérivation ou shunt  $R_{sh}$ . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile:

- ✓ La résistance série  $R_s$  représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;
- ✓ La résistance shunt  $R_{sh}$ , qui modélisé les fuites par l'effet de bond autour de la cellule solaire [9].

Selon le schéma équivalent d'une cellule PV à une diode dans La figure (1.3), on a [10]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1-1)$$

$$I_d = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (1-2)$$

Avec :

$$U_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (1-3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1-4)$$

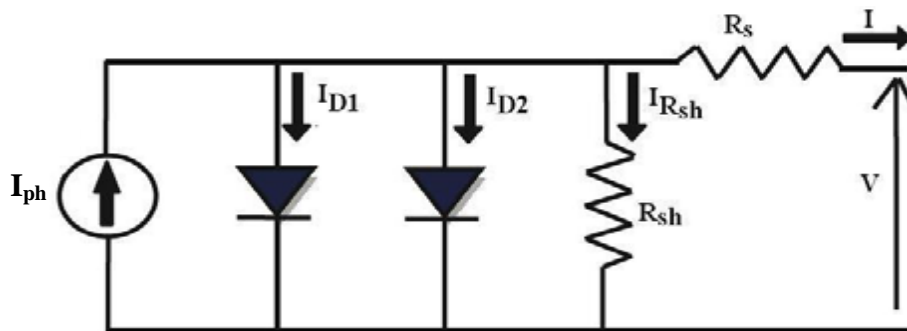
$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - \left( \frac{V + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1-5)$$

L'équation caractéristique de la cellule est alors donnée par:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V + I_{PV} R_s}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1-6)$$

### **b Modèle à deux diodes**

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma d'une cellule PV devient dans le cas de la figure 1.4



**Figure 1.4.** Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes.

Selon le schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes dans La figure 1.4, en a résultat :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V + I R_s}{A U_T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V + I R_s}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right)$$

q: charge de l'électron ( $1.9 \times 10^{-19}$  coul).

K: la constante de Boltzmann.

Ut: tension thermique.

Is: courant de saturation de la diode.

V: tension aux bornes de la diode.

T: température absolue (en kelvin).

$I = I_{pv}$ : le courant généré par la cellule et fourni à la charge.

$I_{Rsh}$ : le courant correspond au courant des connexions parallèles.



A: Facteur de qualité.

❖ Parmi nos schémas on a travaillé sur modèle à une diode

### 1.3.4 Paramètre des cellules photovoltaïques

D'après la caractéristique courant-tension des cellules photovoltaïques on extrait les paramètres suivant:

#### a Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

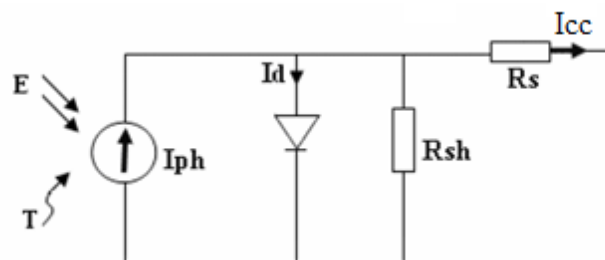


Figure 1.5. : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque en court-circuit

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} \quad (1.7)$$

#### b Tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ )

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température. Elle varie peu avec l'intensité lumineuse.

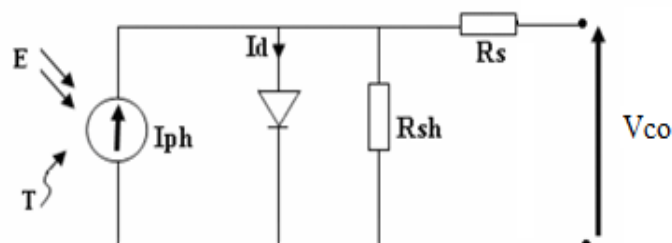


Figure 1.6. : Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque en circuit ouvert.

$$0 = I_{ph} - \left( e^{\frac{V_{co}}{U_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (1.8)$$

$$V_{co} = U_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (1.9)$$

### c La puissance

Le but recherché par tout utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La figure 1.7 représente la caractéristique courant-tension d'une photopile sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension × intensité).

Pour l'éclairement considéré, le point  $P_{max}$  représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, dit puissance maximale, est associé à une tension optimale  $V_{max}$  et à une intensité optimale  $I_{max}$ . C'est cette puissance par la suite qui sera toujours recherché par notre régulateur de recherche du point de puissance maximale  $P_{max}$  [10.]

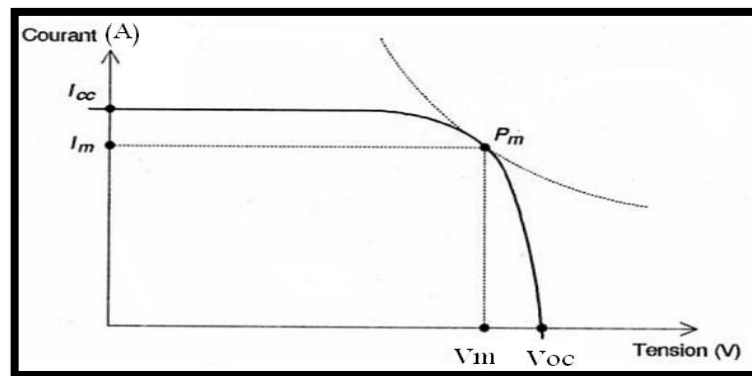


Figure 1.7. Caractéristique courant-tension d'une photopile

### d Facteur de qualité A

C'est un paramètre dépendant de la qualité de la diode, (compris entre 1 et 2).

### e Facteur de forme

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

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

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70% [10].

### ***f Rendement d'une cellule solaire***

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Ce rendement est donné par le rapport entre la puissance électrique maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident [10] :

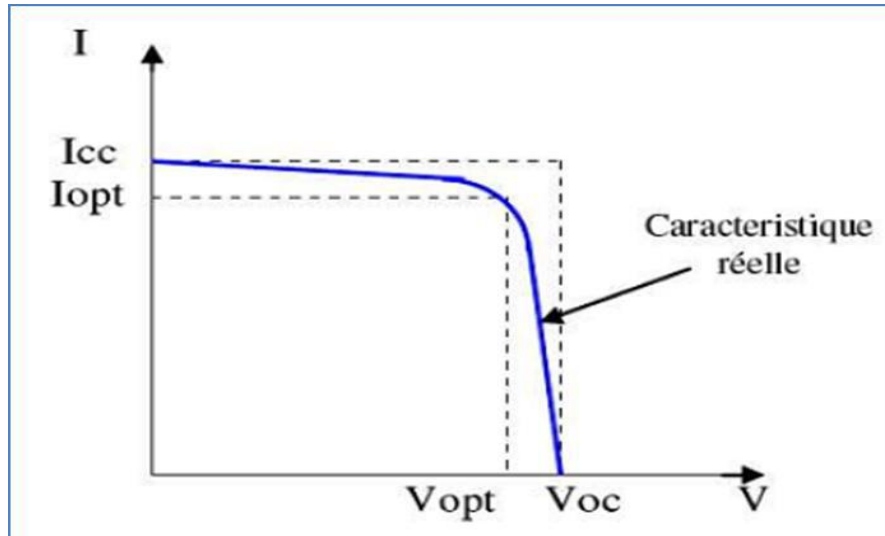
$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (1.11)$$

## **1.4 Module PV**

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [11].

### **1.4.1 Caractéristique courant/tension (I-V)**

La Figure 1.8 représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.



**Figure 1.8.** La caractéristique ( $I$ - $V$ ) d'une cellule photovoltaïque.

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit).

De même, elle coupe l'axe des abscisses en  $V_{co}$  (tension maximale de circuit-ouvert).

#### 1.4.2 Regroupement des cellules en série

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure 1.9 permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [12].

$$V_{CONS} = N_s * V_{co} \quad (1.12)$$

$$I_{CCNS} = I_c \quad (1.13)$$

**VCONS:** La somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

**ICCNS:** Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

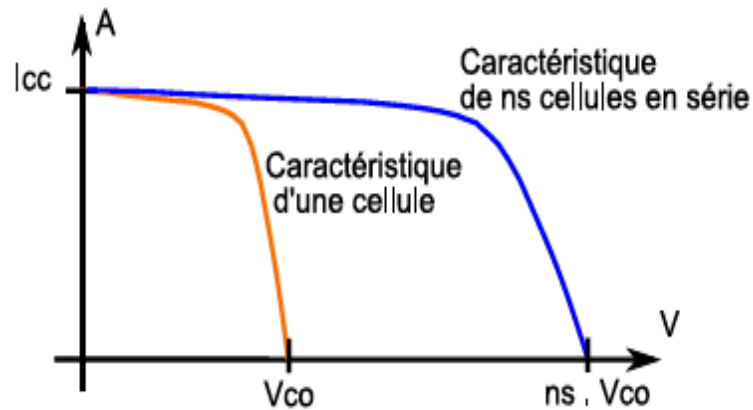


Figure 1.9. Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série.

### 1.4.3 Regroupement des cellules en parallèle

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule figure 1.10 est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [13].

Avec :

$$I_{CCNP} = N_p \times I_{CC} \quad (1.14)$$

$$V_{CO} = V_{CONP} \quad (1.15)$$

$I_{CCNP}$  : la somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

$V_{CONP}$  : tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle

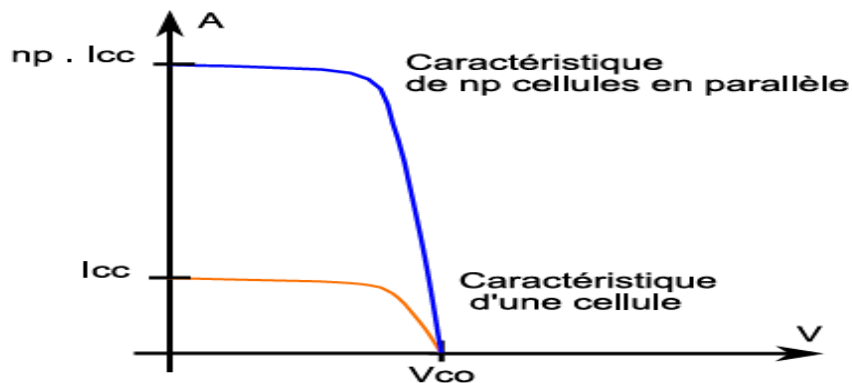


Figure 1.10. Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

#### 1.4.4 Regroupement des cellules en (Série + Parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on utilise un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.

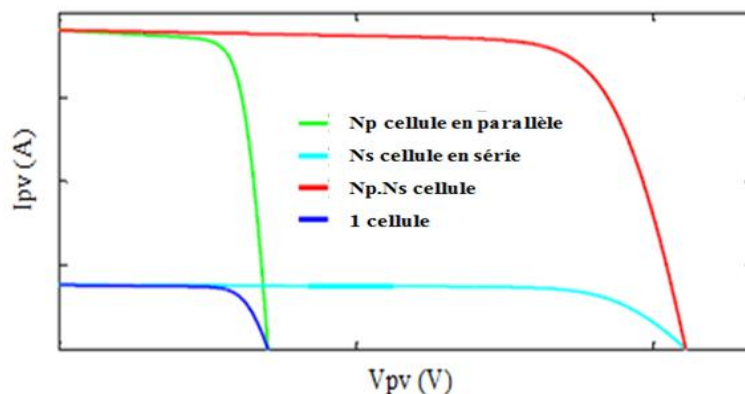
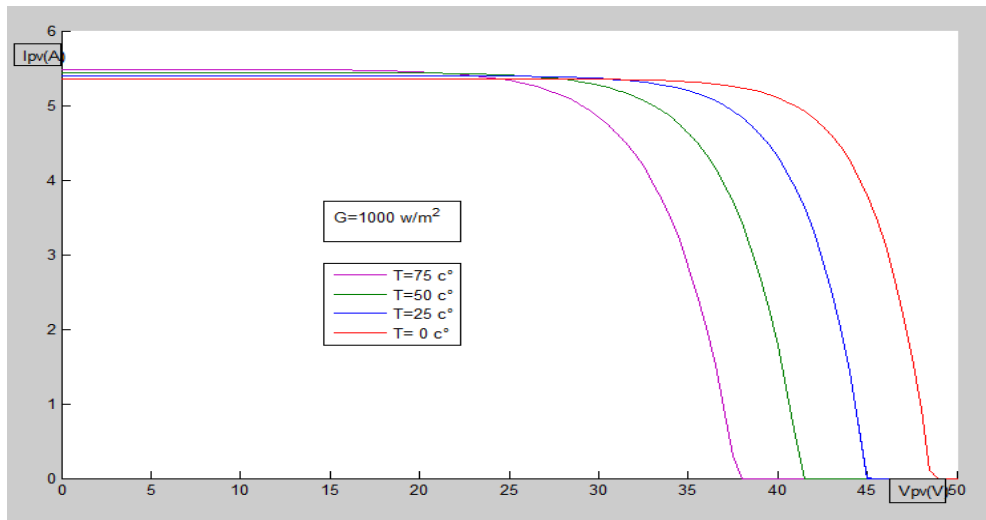


Figure 1.11. Caractéristiques courant-tension pour différents assemblage de modules PV.

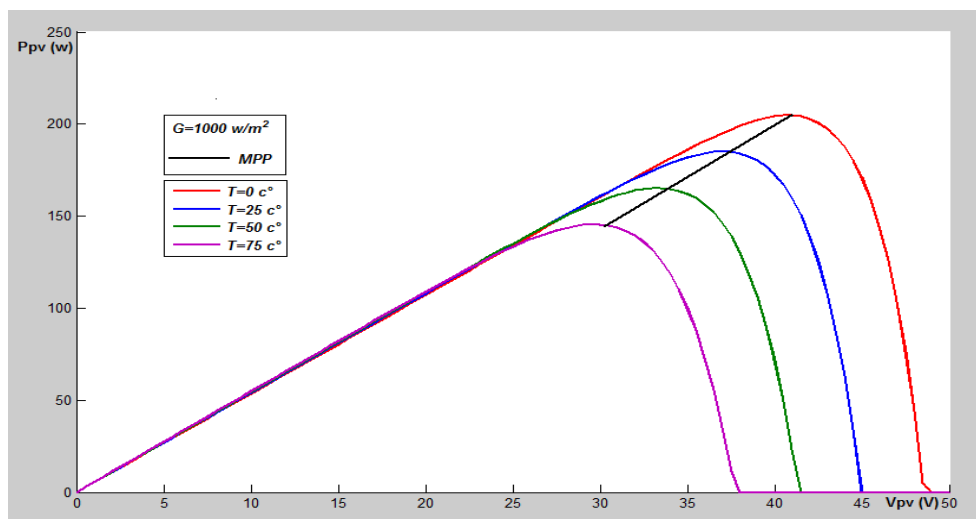
#### 1.4.5 Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne:  $I_{sc} = I_o \cdot \exp\left(q \cdot \frac{V_o}{KT}\right)$ , l'expérience montre que la tension de circuit-ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [14].

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques ( $I-V$ ) et ( $P-V$ ) Figure (1.12 et 1.13) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures : Pour la figure (1.12), nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit-ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (1.13).



**Figure 1.12.** La caractéristique de  $I=f(V)$  en fonction de température



**Figure 1.13.** La caractéristique de  $P=f(V)$  en fonction de température

#### 1.4.6 Influence de l'éclairement

En fixant la température pour différents éclairagements figure 1.14 et 1.15, on remarque pour la figure 1.14 que pour l'éclairement de  $1000 \text{ w/m}^2$  et un courant  $I_{cc}=5.4\text{A}$ , et pour  $G=800\text{w/m}^2$  avec un courant  $I_{cc} = 4.3\text{A}$ , on peut voir que le courant subit une variation importante. L'éclairement augmente le courant de court-circuit, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure 1.15.

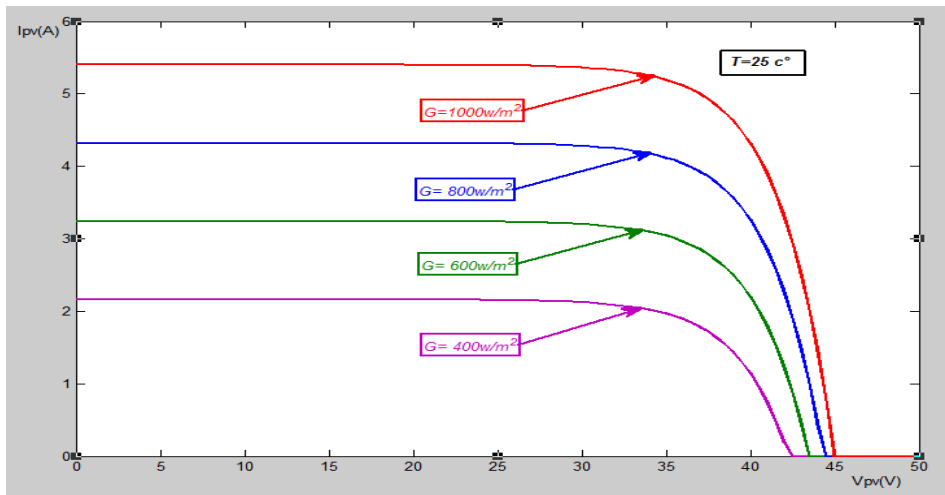


Figure 1.14. La caractéristique  $I=f(v)$  en fonction de l'éclairement

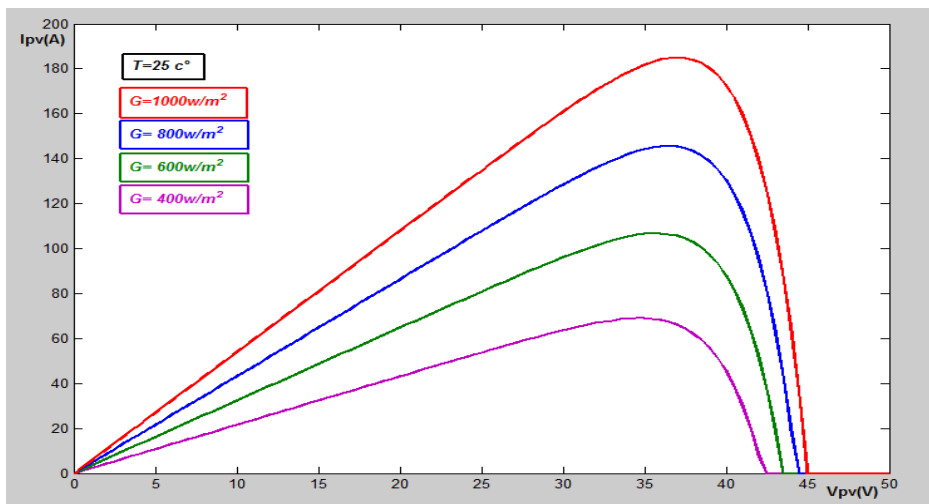


Figure 1.15. La caractéristique  $P=f(v)$  en fonction de l'éclairement

## 1.5 Champ PV

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW avec une tension convenable, il est nécessaire de regrouper les modules en série et en parallèle. Ce groupement forme un champ photovoltaïque. Il existe plusieurs configurations possibles pour interconnecter les modules dans un champ photovoltaïque : connexion série parallèle simple, connexion Total Cross Tied, connexion Bridge Linked [15].



### 1.5.1 Protections classiques d'un GPV

Dans cette partie nous intéressons qu'aux composants servant à la protection du générateur PV.

#### a Diode de by-pass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules (voir-Figure 1.16), Cette diode sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement dans le régime inverse, plusieurs architectures de connexion des diodes de by-pass dans le module ont été proposées [15].

#### b Diode anti-retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string .

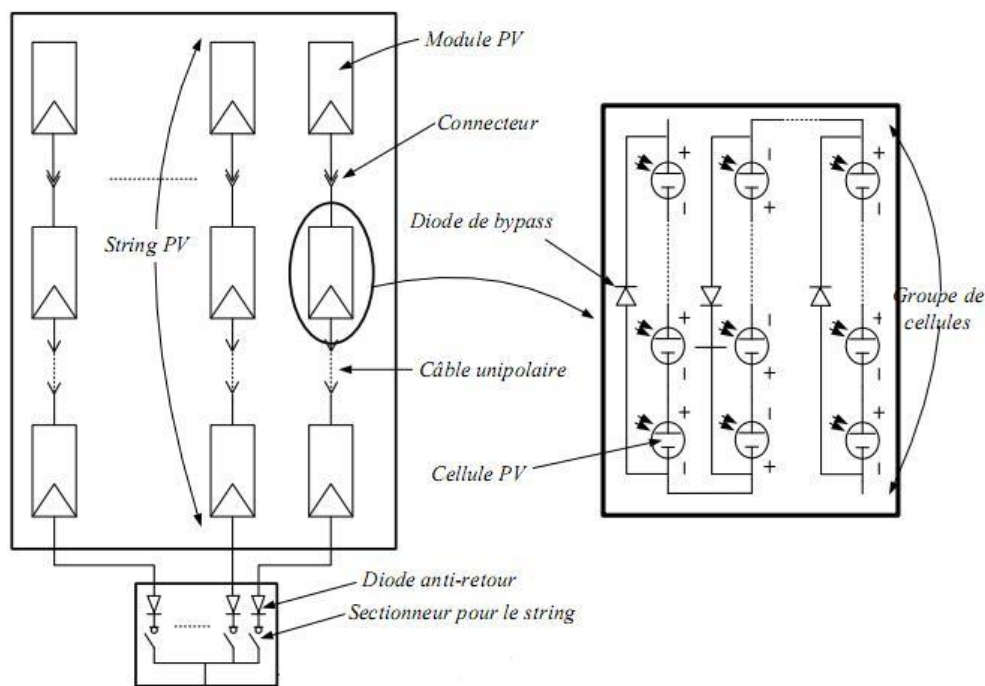


Figure 1.16. Protection d'un GPV avec diode by-pass et diode anti-retour.

## 1.6 Application des systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type que nous avons choisis dépendra de nos besoins, de nos emplacements et de nos budgets.

### 1.6.1 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie

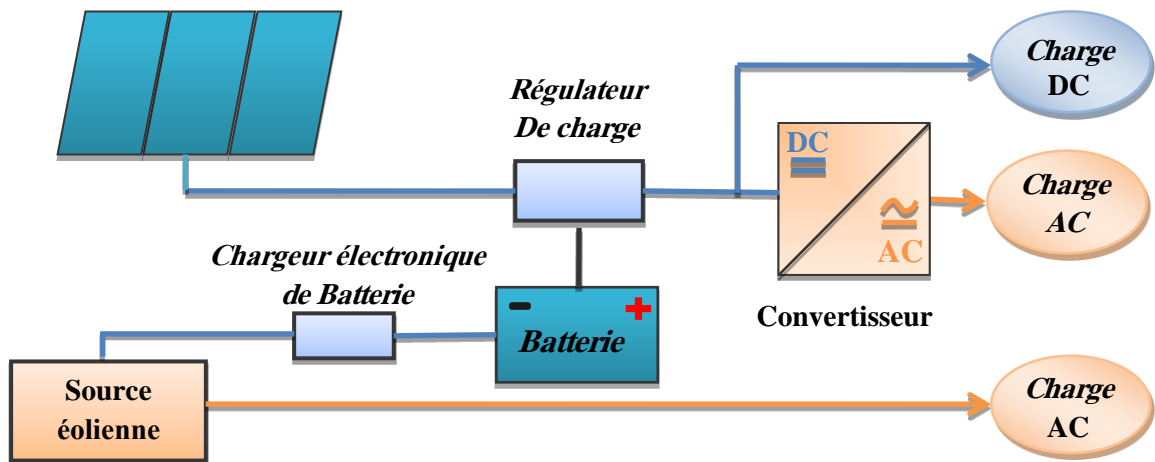


Figure 1.17. Système hybrides PV éoliens.

### 1.6.2 Systèmes raccordés au réseau

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts. Ces installations se composent de modules solaires interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordé au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les cellules solaires en un courant alternatif conforme au réseau électrique (220V, 50Hz). Il gère également des fonctions de commande et de réglage afin d'optimiser l'apport énergétique.

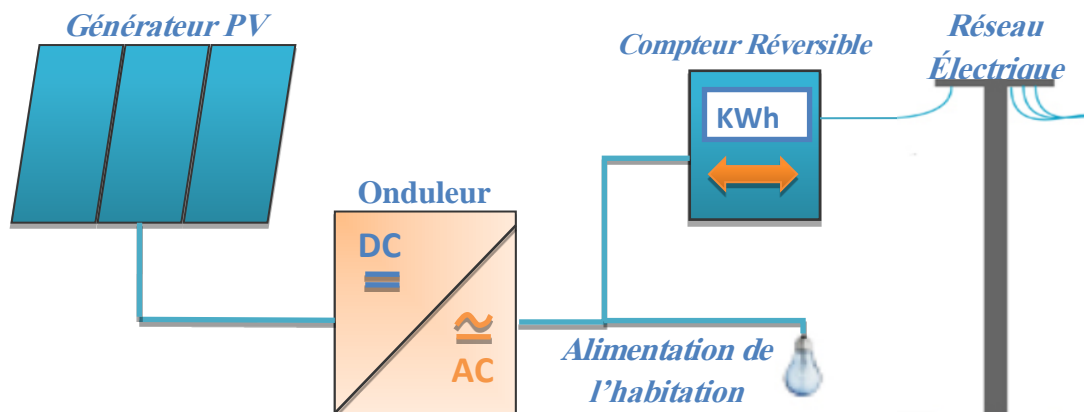


Figure 1.18. Système PV raccordé au réseau.

### 1.6.3 Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie.

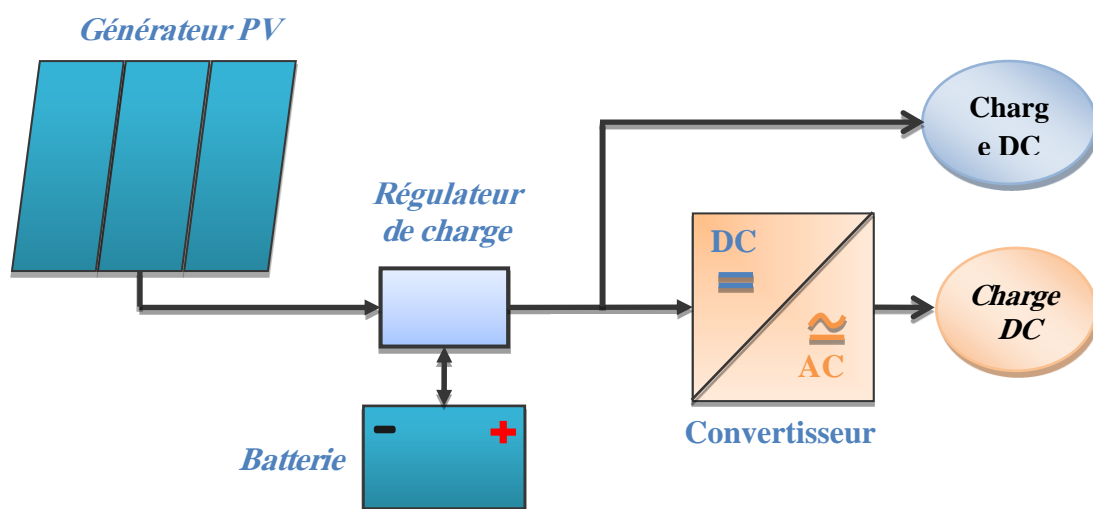


Figure 1.19. Système PV autonome avec ou sans conversion DC/AC.

## **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV. Par la suite on a expliqué brièvement comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque ainsi nous avons montré l'influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement du module donc sur la puissance.

# Chapitre 2 Convertisseur DC-DC

---

## 2.1 Introduction

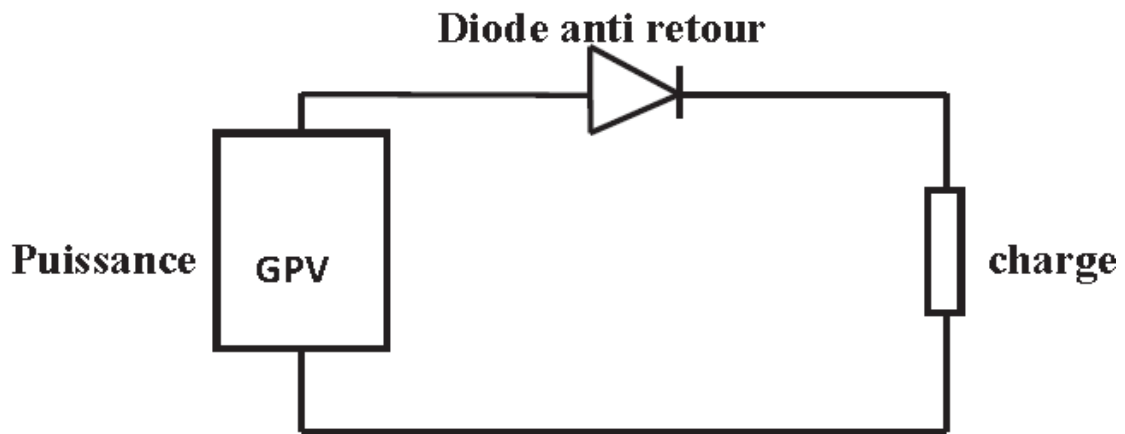
Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements.

Dans ce chapitre, nous étudierons le problème de connexion GPV-charge et la nécessité d'un étage d'adaptation. En effet, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge, cet étage peut être un convertisseur DC-DC, abaisseur ou élévateur de tension.

Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, une étude détaillée est faite sur les convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continu. L'analyse porte sur le gain en courant et en tension du convertisseur ainsi que sur les contraintes sur les semi-conducteurs. Le convertisseur Boost est choisi dans cette étude en raison de sa structure simple et son rapport de transformation en tension le plus élevé par rapport aux autres topologies

## 2.2 Connexion directe générateur photovoltaïque-charge

Pour ce type de connexion, une diode est insérée entre le GPV et la charge (Figure 2.1). Cette diode permet d'éviter que le GPV devienne récepteur lorsqu'il n'est plus éclairé et ne soit détruit s'il atteint ses limites de fonctionnement en récepteur (emballement thermique, avalanche). C'est la méthode la plus couramment utilisée aujourd'hui, qui a pour avantage un faible coût ainsi qu'une grande fiabilité.



**Figure 2.1.** Connexion directe d'un GPV à sa charge.

### 2.2.1 Limite de la connexion directe

Cependant cette connexion n'est pas idéale pour autant. Il n'est pas possible de régler ou limiter la tension ou le courant de charge. De plus, dans le cas où la charge est une batterie, c'est la tension de celle-ci qui fixe le point de fonctionnement du système, et qui risque donc de ne pas se situer sur le PPM du GPV et donc de ne pas utiliser toute sa puissance disponible. Si par chance, la charge se retrouvait sur le PPM du module, cela ne durerait que quelques instants, la moindre variation d'ensoleillement, de température de la cellule ou du niveau de charge de la batterie faisant varier le PPM. Différents types de charges peuvent être utilisées. Elles peuvent être résistives ou s'apparenter à une source de courant continue ou bien encore une source de tension continue. La Figure 2.2 montre les points de fonctionnement sur la courbe de puissance (points A, B, C) pour chacune d'entre elles. Ces points peuvent se retrouver éloignés du PPM, le GPV est alors mal exploité et une partie de la puissance maximale potentielle n'est pas transférée à la charge.

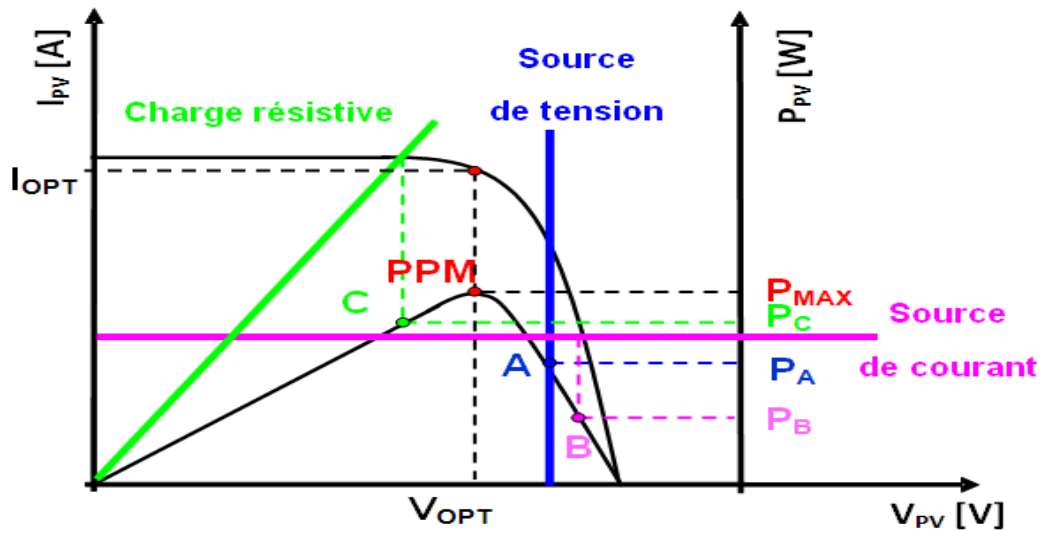


Figure 2.2. Points de fonctionnement pour différentes charges [16]

### 2.2.2 Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation

Pour pallier aux défauts précédemment cités, un convertisseur statique est ajouté entre le GPV et la charge dans le but d'optimiser les niveaux des tensions et/ou des courants entre les deux éléments (Figure 2.3). Suivant les niveaux de tensions, la structure du convertisseur sera différente (convertisseur abaisseur « Buck », élévateur « Boost », abaisseur élévateur « Buck-Boost »).

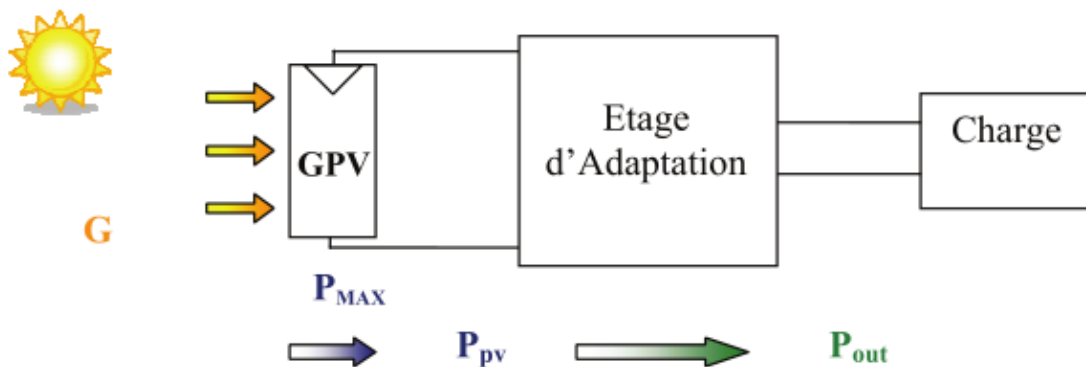


Figure 2.3. Etage d'adaptation entre le GPV et la charge

A ce convertisseur est associée une loi de commande lui permettant d'extraire la puissance maximale du GPV à tout instant. Nommée MPPT (Maximum Power Point

Tracker), elle effectue en permanence une recherche du PPM (point de puissance maximale) en modifiant l'impédance d'entrée du convertisseur.

## 2.3 Les types des convertisseurs de tension DC/DC

### « HACHEUR »

Elles permettent d'abaisser, élever et inverser une tension continue avec de très faibles pertes (Figure 2.4) [17]. Par conséquent ils ont un très bon rendement, peu d'énergie à dissiper par le transistor [18].

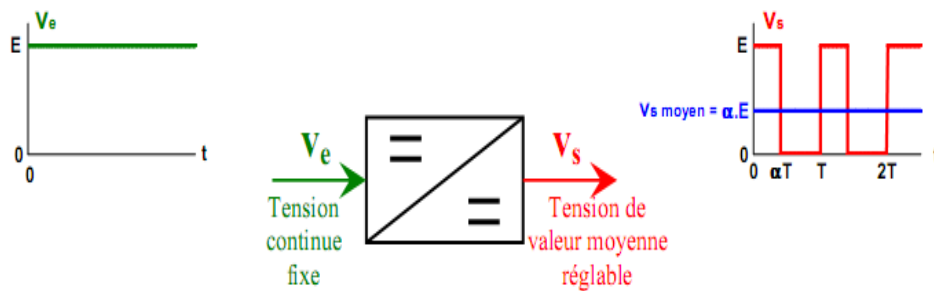


Figure 2.4. Symbole et signaux du convertisseur DC/DC [17].

### 2.3.1 Convertisseur Boost

#### a Schéma de convertisseur

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte. La figure 2.5 représente le schéma de base d'un convertisseur Boost.

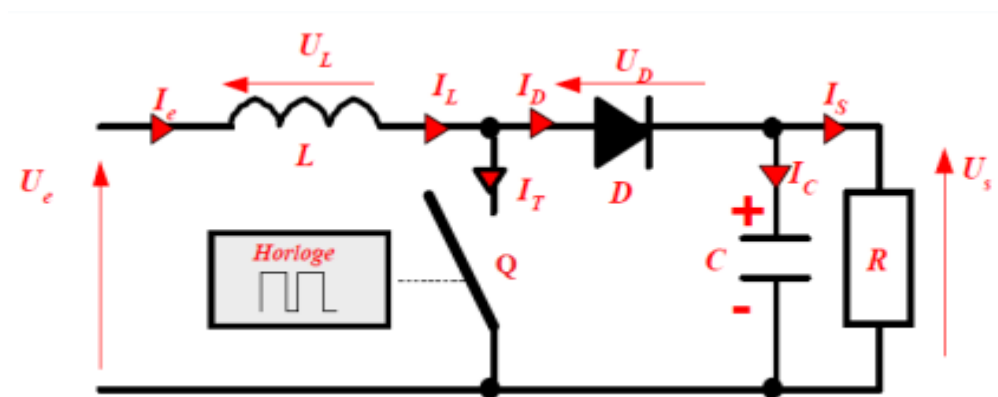


Figure 2.5. Schéma de principe d'un convertisseur élévateur du type Boost [18]



### ***b Principe de fonctionnement***

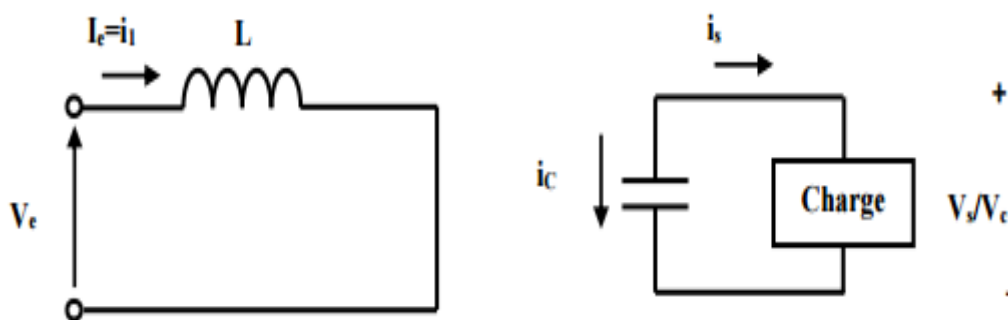
Le convertisseur peut alors travailler suivant deux modes de fonctionnement dépendant de sa capacité de stockage d'énergie et de la période  $T$  de commutation. Ces deux modes de fonctionnement sont :

**Mode continu** : dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée partiellement et donc le courant dans celle-ci ne s'annule pas.

**Mode discontinu** : dans ce cas, au contraire, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée totalement et donc le courant dans celle-ci s'annule.

Dans notre travail, l'étude de fonctionnement est basé sur le mode de conduction continu, le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux selon l'intervalle de commutation ( $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$ ).

L'intervalle  $T_{ON}$  commence quand on ferme le transistor  $Q$  à  $t = 0$ . Le courant d'entrée, qui s'élève, traverse l'inductance  $L$  et le transistor (figure 2.6).



**Figure 2.6.** Circuit équivalent pour  $T_{ON}$

L'intervalle  $T_{OFF}$  commence quand on ouvre le transistor  $Q$  à  $t = t_1$ . Le courant de l'inductance diminue car l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée à la charge (figure 2.7).

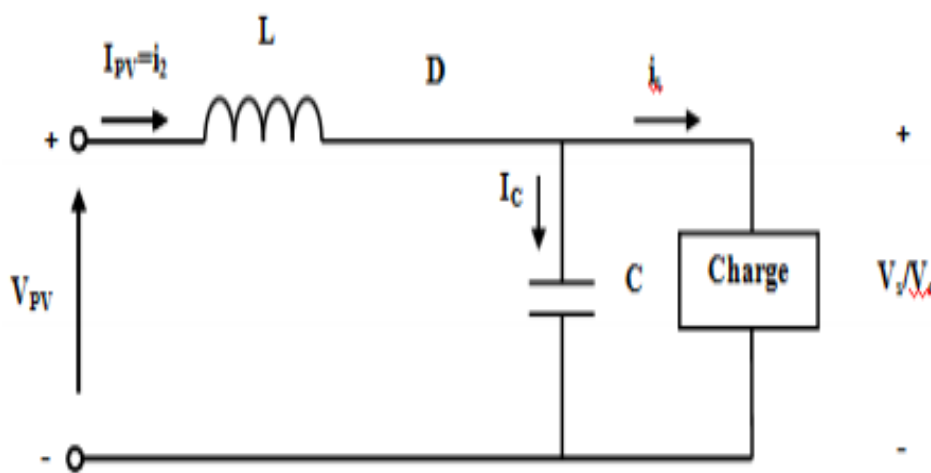


Figure 2.7. Circuit équivalent pour  $T_{OFF}$

Dans l'intervalle  $T_{ON}$  le courant de l'inductance vaut :  $V_e = V_{PV}$

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

$$i_1 = \frac{V_e}{L} t + I_m \quad (2.2)$$

La figure 2.8 représenté la courbe de courant qui traverse par l'inductance dans l'intervalle  $T_{ON}$  et  $T_{OFF}$

Où  $i_1$  est le courant à l'instant initial. Pendant cet intervalle le courant traversant l'inductance augmente.

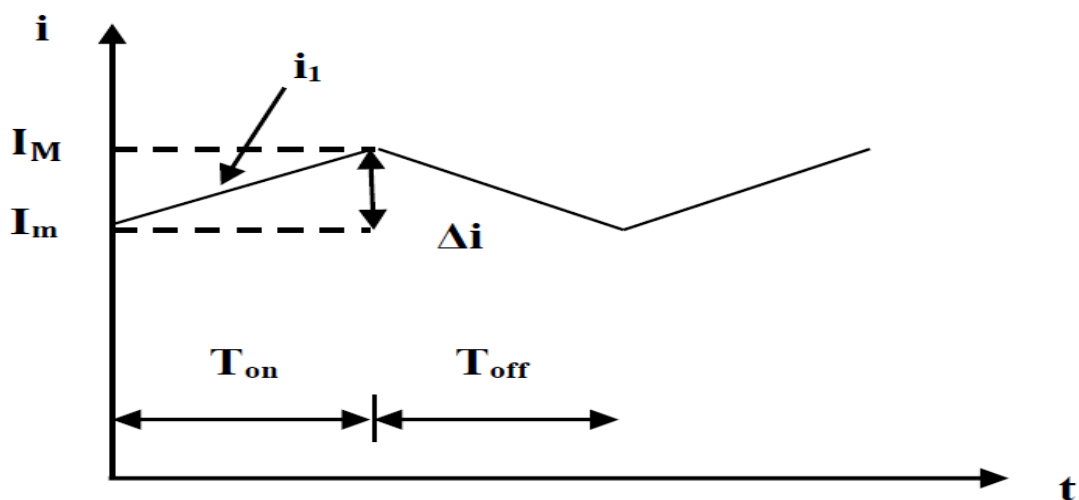


Figure 2.8. Forme du courant  $i_1$

En mode de conduction continue la période de commutation est  $T = T_{ON} + T_{OFF}$  et le rapport cyclique :

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} \quad (2.3)$$

D'un autre côté, nous pouvons exprimer la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique selon :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (2.4)$$

Pour le convertisseur Boost :

$$V_s > V_{PV} \quad \forall \alpha \text{ et } 0 < \alpha < 1 \quad (2.5)$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ .

La tension de sortie est minimale quand  $\alpha=0$ . On ne peut pas avoir  $\alpha=1$  qui correspondrait à un **Q** toujours fermé, pour  $\alpha$  proche de **1**, la tension de sortie devient très grande et très sensible au changement du rapport cyclique  $\alpha$ . De plus l'influence des pertes dans le circuit limite la tension maximale de sortie du convertisseur.

Le gain en tension tend théoriquement vers l'infini pour un rapport cyclique unitaire si nous considérons le circuit sans pertes. Ainsi, en résumé nous pouvons exprimer la tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_s = \frac{V_{pv}}{1-\alpha} \quad (2.6)$$

$$i_{s=(1-\alpha)} i_{pv} \quad (2.7)$$

Le figure (2.9) situé sous représenter les différentes courbes des grandeurs électriques ( $U_L$ ,  $I_L$ ,  $I_D$ )

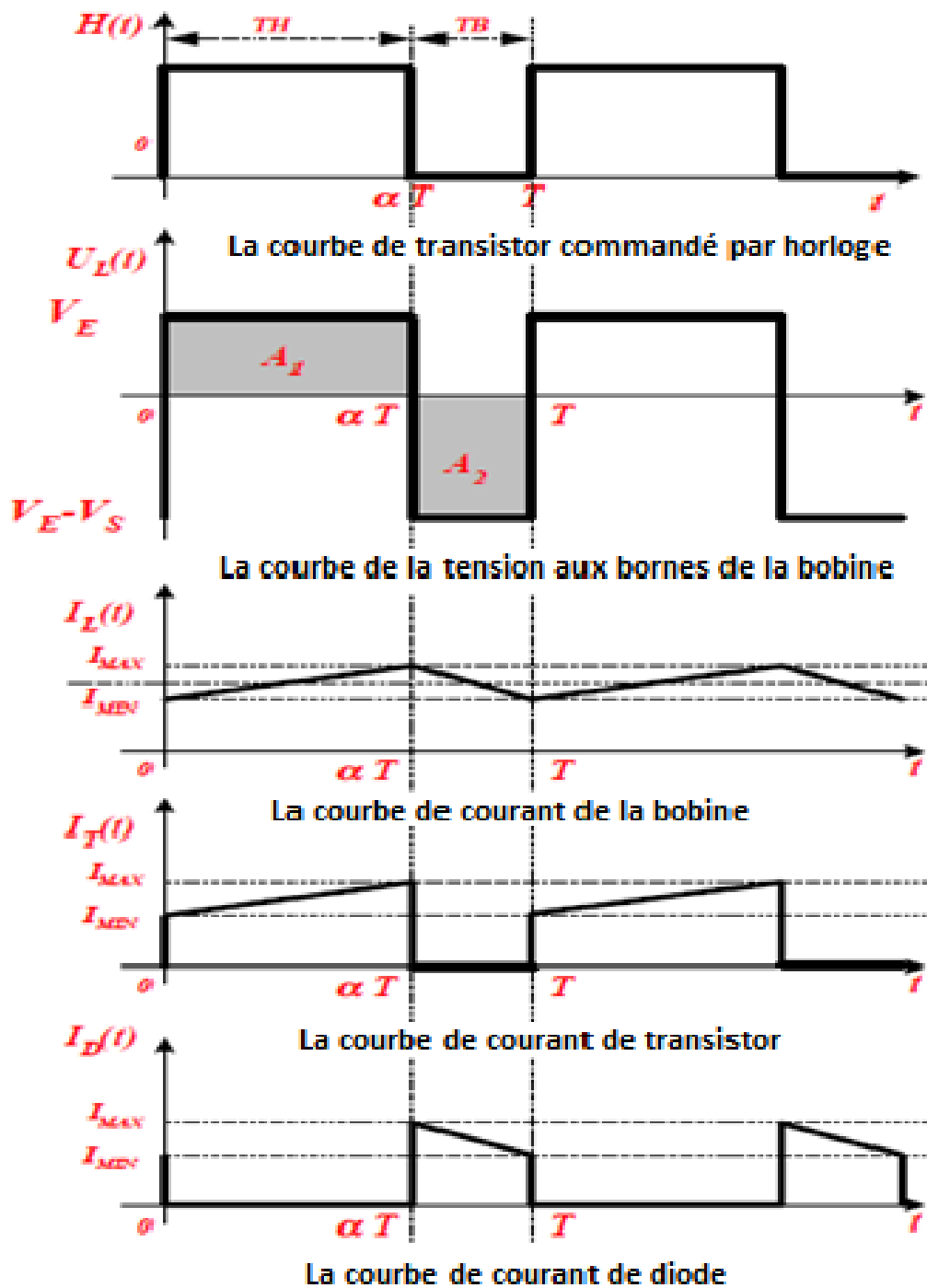


Figure 2.9. Chronogrammes du convertisseur élévateur « Boost » [18].

### 2.3.2 Convertisseur abaisseur « BUCK »

#### a Schéma de convertisseur

La figure 2.10 représente le schéma de base d'un convertisseur Buck :

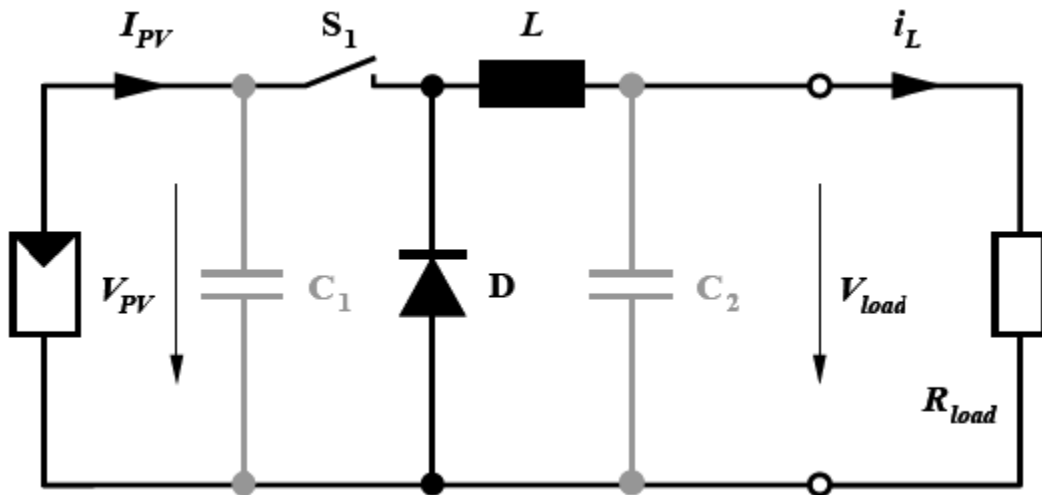


Figure 2.10. Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck » [19].

### b Principe de fonctionnement

Convertisseur dévolteur (Buck converter), un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP.

Si le commutateur  $S_1$  est activé à  $t_0$ , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode  $D$  puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant  $i_L$  n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance  $L$  [20,19].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV} - V_{Load}}{L} \quad (2.8)$$

$$i_L = \left( \frac{V_{PV} - V_{Load}}{L} \right) t + I_m \quad (2.9)$$

Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Si  $S_1$  est désactivé après  $t = t_1$ , la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  et circule à travers la diode  $D$  appelée « diode de roue libre ». Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension. Selon l'équation (2.8), le courant décroît, puisque :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_{Load}}{L} \quad (2.10)$$

$$I_L = -\frac{V_{Load}}{L} t + I_m \quad (2.11)$$

Les figures (2.11) et (2.12) considère le circuit de convertisseur Buck a l'état on et off.

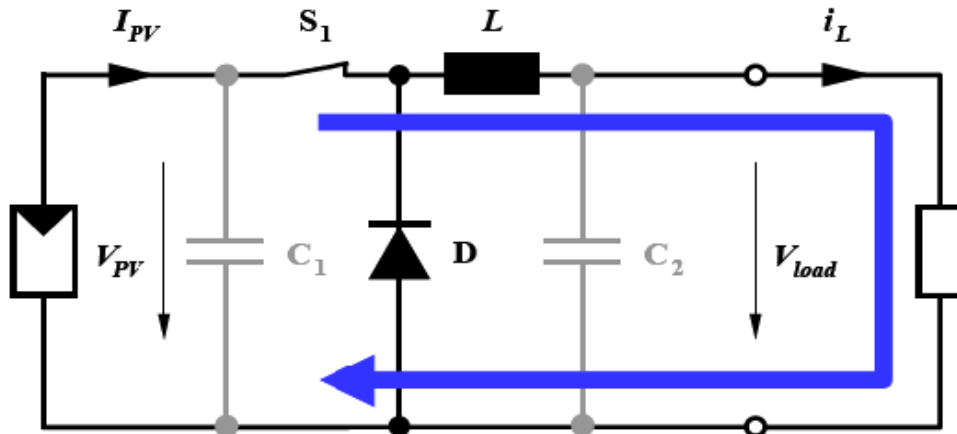


Figure 2.11. Convertisseur Buck Durant l'état on

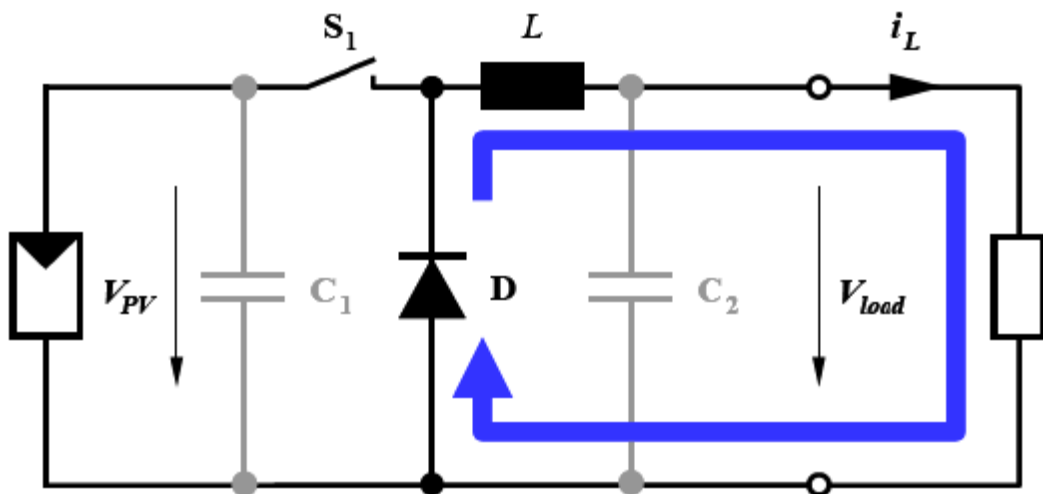


Figure 2.12. Convertisseur Buck Durant l'état off

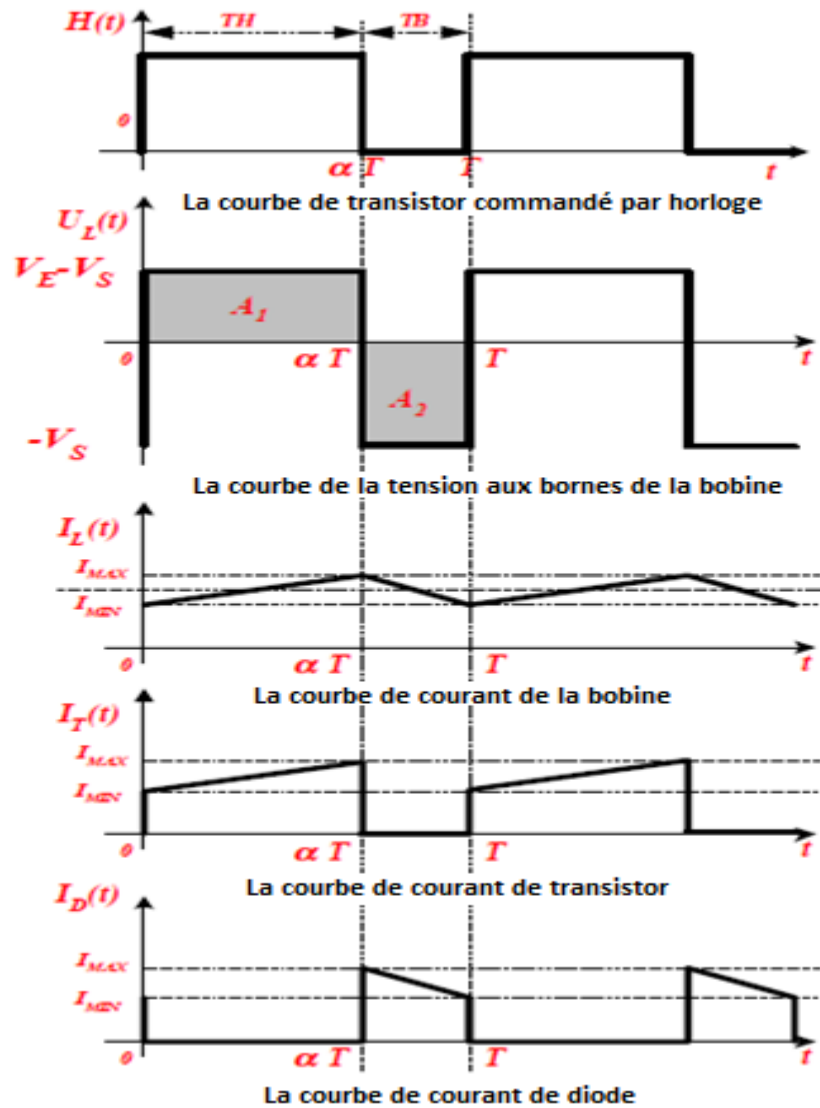


Figure 2.13. Chronogramme du convertisseur abaisseur « Buck ». [17]

Le condensateur  $C_1$  permet de réduire les pics du courant tiré du GPV, de soutenir la tension d'alimentation  $V_{PV}$  et d'atténuer les bruits. Le commutateur  $S_1$  est activé et désactivé avec une fréquence de commutation  $f = 1/T$ . Comme l'illustre les figures 2.13, la tension aux bornes de la charge présente une ondulation qui peut être lissée par l'ajout d'un condensateur  $C_2$ . Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne  $V_{Load}$  est inférieure à  $V_{pv}$ . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'à plusieurs kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_{Load} = \frac{T_{ON}}{T} = \alpha \cdot V_{PV} \quad (2.12)$$

Avec  $T = T_{ON} + T_{OFF}$  : est la période de commutation.

$\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$  : est le rapport cyclique ( $0 < \alpha < 1$ )

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique.

On considère ici uniquement le comportement du circuit en mode de conduction continue (MCC). Il est à noter que l'interrupteur utilisé est un dispositif à semi-conducteur en commutation. Généralement, un transistor MOSFET est utilisé pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance.

### 2.3.3 Convertisseur inverseur « BUCK - BOOST »

#### a Schéma de convertisseur

La figure 2.14 représente le schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost :

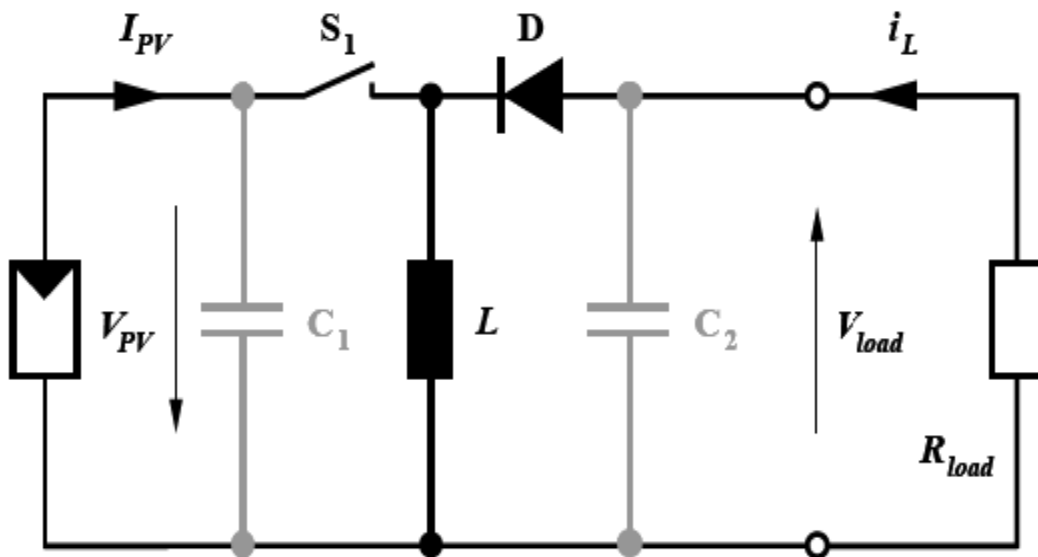


Figure 2.14. Schéma du convertisseur inverseur « Buck-Boost » [19].

#### b Principe de fonctionnement

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Durant l'état «ON», l'énergie apportée par la source



(générateur PV) est stockée dans l'inductance  $L$  (figure 2.15). L'énergie stockée dans l'inductance  $L$  est livrée ensuite à la charge pendant l'état «OFF» (Figure 2.16). En raison de la présence de la diode  $D$ , le courant circule à travers l'inductance  $L$  seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent,  $V_1$  a une polarité opposée à  $V_{PV}$ . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent. Comme indiqué précédemment, le condensateur  $C_1$  soutient la tension d'alimentation  $V_{PV}$ ,  $C_2$  lisse la tension de la charge. En conclusion, l'amplitude de  $V_{Load}$  peut être inférieure ou supérieure à  $V_{PV}$  suivant la valeur de  $T_{ON}$  et  $T_{OFF}$  [15] :

$$V_{Load} = -\frac{T_{ON}}{T_{OFF}} V_{PV} = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{PV} \quad (2.13)$$

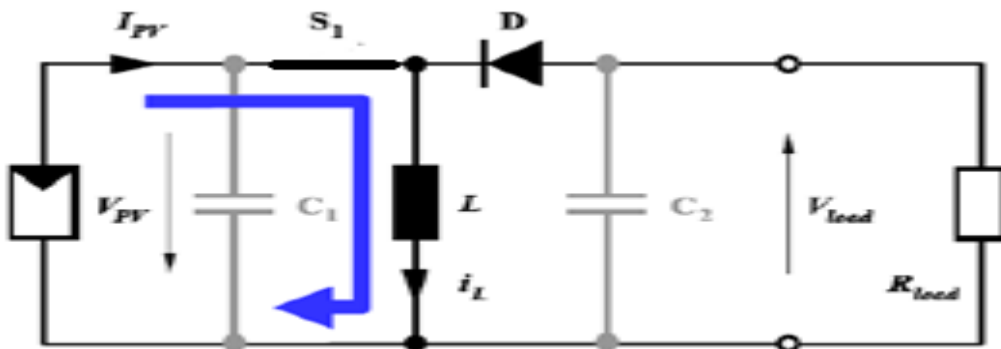


Figure 2.15. Convertisseur Buck-Boost Durant l'état ON

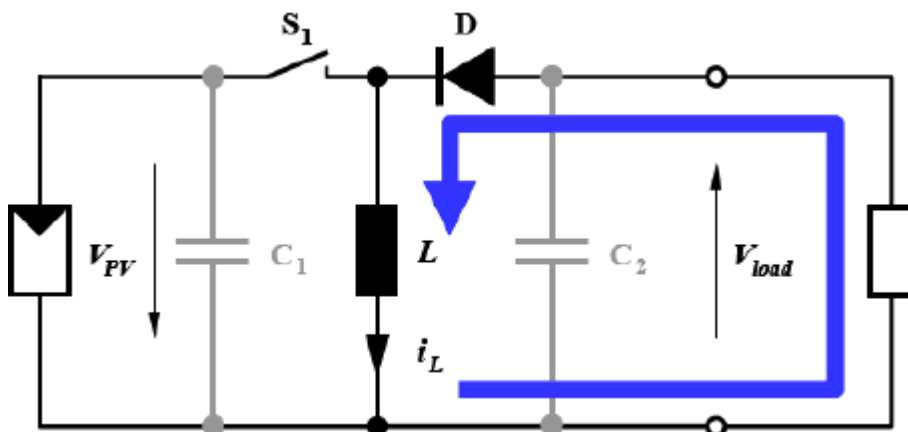


Figure 2.16. Convertisseur Buck-Boost Durant l'état OFF

Dans les trois cas cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique. Généralement, pour les

convertisseurs DC/DC, l'interrupteur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Un signal PWM est un signal rectangulaire de fréquence fixe, mais dont le rapport cyclique  $\alpha$  est variable. La valeur du rapport cyclique permet de contrôler la quantité

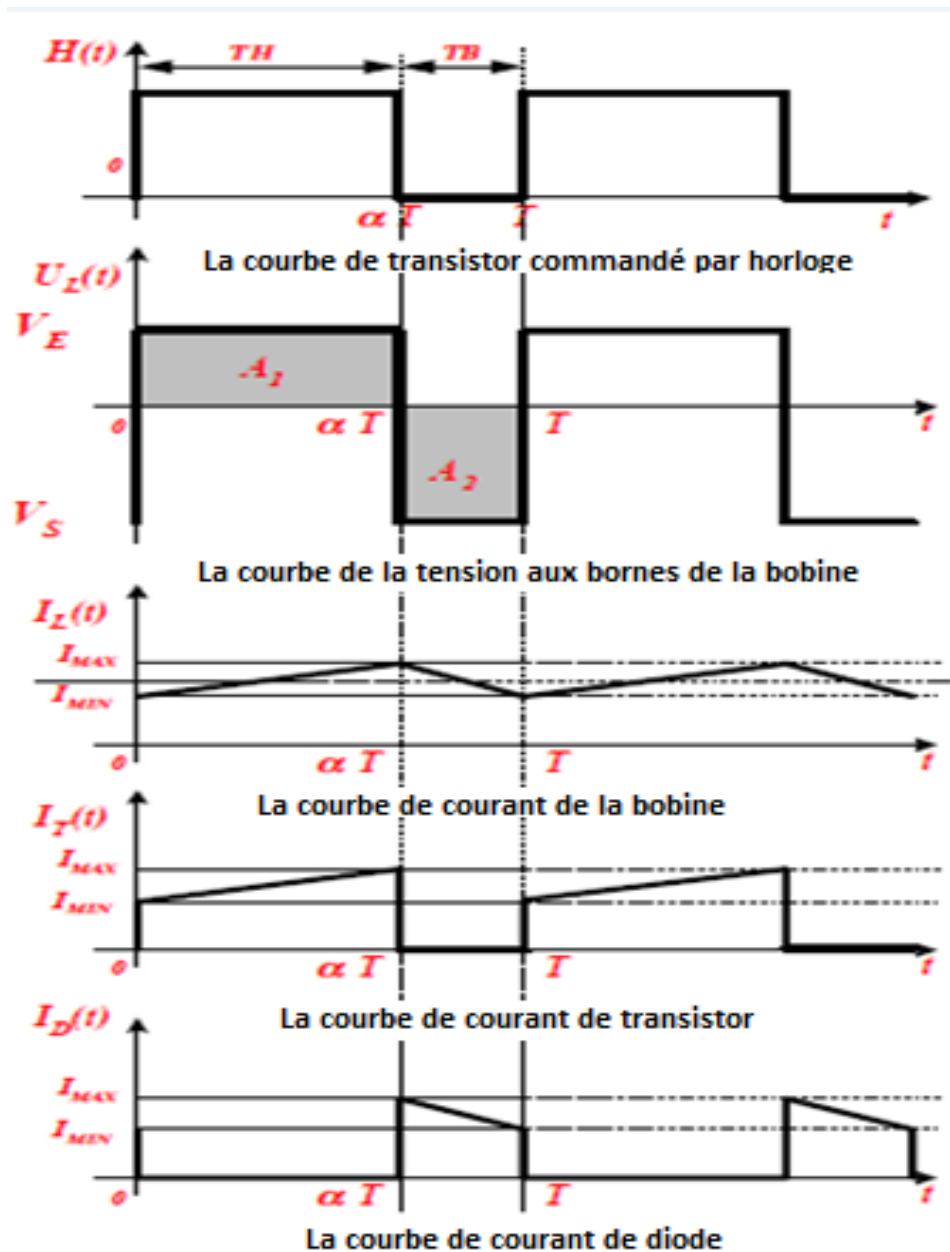
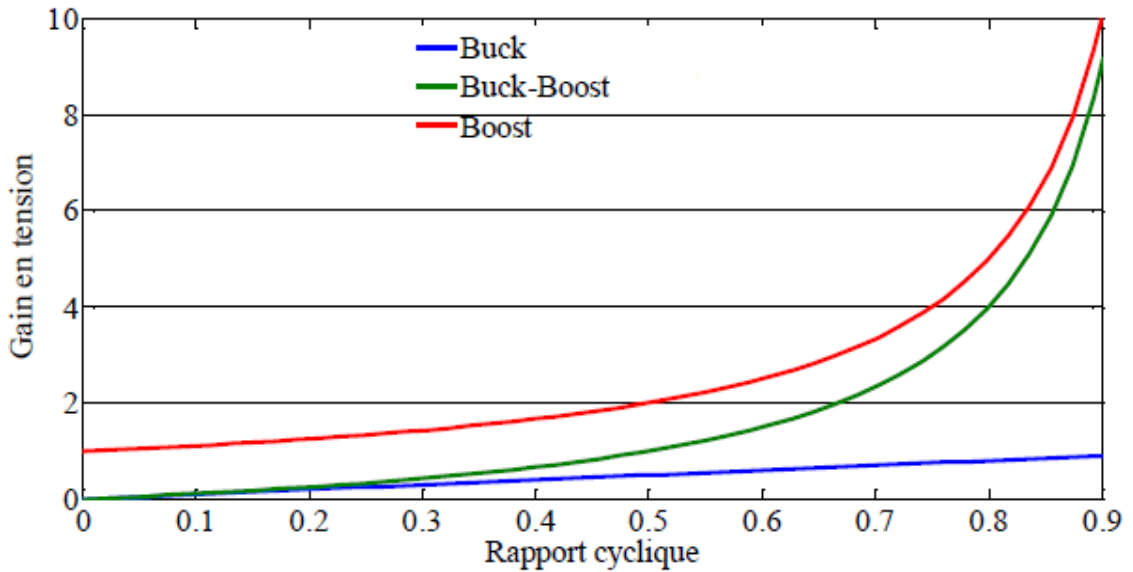


Figure 2.17. Chronogrammes du convertisseur inverseur « Buck-Boost » [21]

## 2.4 Analyse et choix du convertisseur

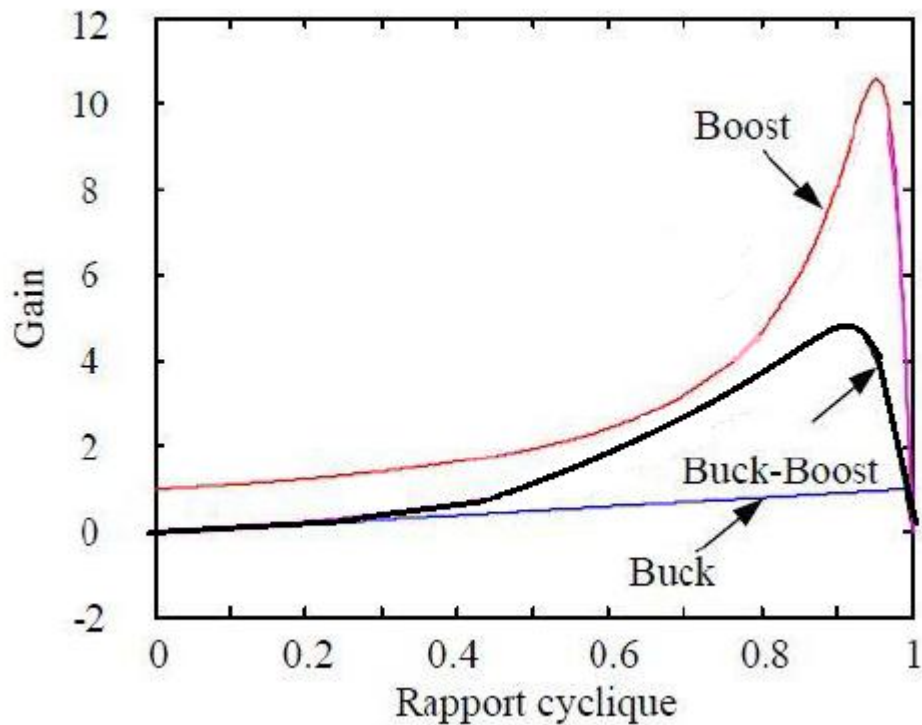
Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continu basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur

d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élevateur de tension. D'ailleurs, la structure Buck-Boost et élévatrice pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices.



**Figure 2.18.** Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure 2.16 qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique. Enfin on peut remarquer aussi que la diode D présente dans le convertisseur Boost peut jouer le rôle de protection du GPV ce qui permet de dispenser de la diode anti-retour et de faire des économies par rapport aux autres topologies. Pour mieux différencier entre les convertisseurs, a tracé le gain en tension en fonction du rapport cyclique figure 2.17 en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs [22].



**Figure 2.19.** Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs

## 2.5 Avantage de convertisseur BOOST

Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur Boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur Buck. Le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie [23].

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé brièvement quelques topologies des convertisseurs à découpage (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.

Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. Chaque topologie on a étudiés contient les avantages et les inconvénients mes L'importance du choix d'un convertisseur soyez par a l'application ou le système qui étudie, cette travaille le Boost et le meilleur choix car l'élévateur du gain et le rendement ainsi la simplicité du circuit.

## Chapitre 3 Les méthodes d'optimisation

---

### 3.1 Introduction

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courant. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairage). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Alors, une commande pour la poursuite du PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT, peut être plus ou moins compliquée. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM.

Dans ce chapitre on va étudier les différentes techniques pour suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, nous présentons les différentes méthodes (directes et indirectes) pour optimiser la puissance et on terminera par une conclusion.

### 3.2 Principe de fonctionnement de MPPT

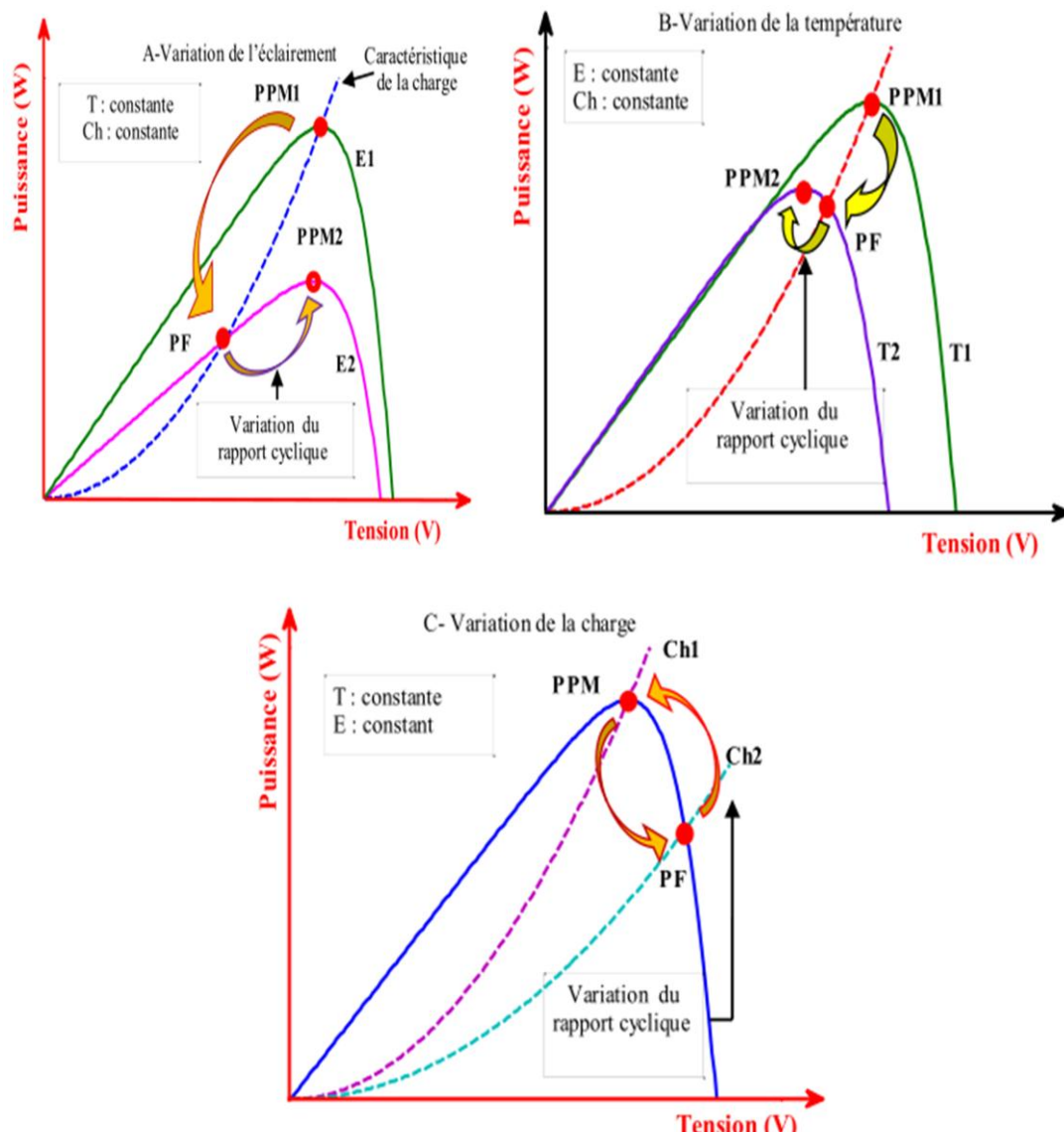
Un MPPT (Maximum Power Point Tracker), est une commande associée à un étage d'adaptation (convertisseur continu-continu) permettant de faire fonctionner le générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. La technique de contrôle permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge, donc consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient

les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure 3.1 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM vers un nouveau point PF de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Comme la montre la figure 3.1, pour une puissance incidente (E1), la puissance optimale transférée à la charge est le point PPM1. Si la puissance incidente change (E2), alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point PF. Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

Dans une moindre mesure, un cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas B). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande. Il en sera de même que lorsque la charge change (cas C), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV [24].



**Figure 3.1.** Variation du Point de Puissance Maximale avec l'éclairément, la température et la charge

### 3.3 Classification de l'algorithme de suivi la puissance maximale

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

#### 3.3.1 Les méthodes indirectes



Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum.

Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser: la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

#### ***a Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert***

Cette méthode se base sur l'utilisation d'une cellule PV comme consigne étalon. Cette cellule étalon, non chargée, placée à côté des modules PV, mesure en temps réel la valeur de la tension en circuit ouvert qui permettra de déterminer la tension de référence.

Pour déterminer le point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale en fonction de la tension, on trace le graphe  $V_{opt} = f(V_{oc})$ . Cette fonction obtenue n'est pas linéaire. Pour faciliter le calcul, on doit la rendre linéaire. Ce qui donne [25].

$$V_{opt} = 0.7V_{oc} + 0.328 \quad (3.1)$$

Avec  $V_{opt}$  la tension PV correspondant au PPM.

Malgré que le point de fonctionnement soit proche de la puissance maximale, quelques reproches à cette méthode sont soulevés:

- ❖ Dépendance totale de la cellule étalon qui peut subir des modifications et des anomalies.
- ❖ Non prise en compte des dérives de caractéristiques des modules photovoltaïques.
- ❖ La tension  $V_{opt}$  représente 75 à 95 % de la tension  $V_{oc}$ , donc la linéarisation réduit la précision.

### ***b Méthode basée sur la mesure du courant en court-circuit***

Cette méthode se base sur le calcul d'un courant de référence  $I_{opt}$  en fonction du courant de court-circuit par une relation de proportionnalité donnée comme suit [26].

$$I_{opt} = kI_{sc} \quad (3.2)$$

Le courant  $I_{sc}$  est mesuré périodiquement en effectuant des court-circuits du GPV.

Cette méthode, ayant besoin que d'un seul capteur, s'avère plus facile à mettre en œuvre et un peu moins coûteuse. Cependant, elle présente les inconvénients suivants:

- ❖ En réalité, le courant optimal vaut de 85 à 95 % du courant de court-circuit, donc ce n'est pas vraiment linéaire ce qui implique le manque de précision.
- ❖ Non prise en compte des caractéristiques du GPV dues aux paramètres extérieurs.
- ❖ Perte d'énergie pendant le temps de court-circuit nécessaires pour la mesure de la référence.

### **3.3.2 Les méthodes directes**

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrémentation de conductance...

#### ***a Premières commandes MPPT***

BOEHRINGER a appliqué la première commande MPPT au PV en 1968 [27]. C'est un algorithme simple pouvant être implanté numériquement (Figure III.2). Il est destiné aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

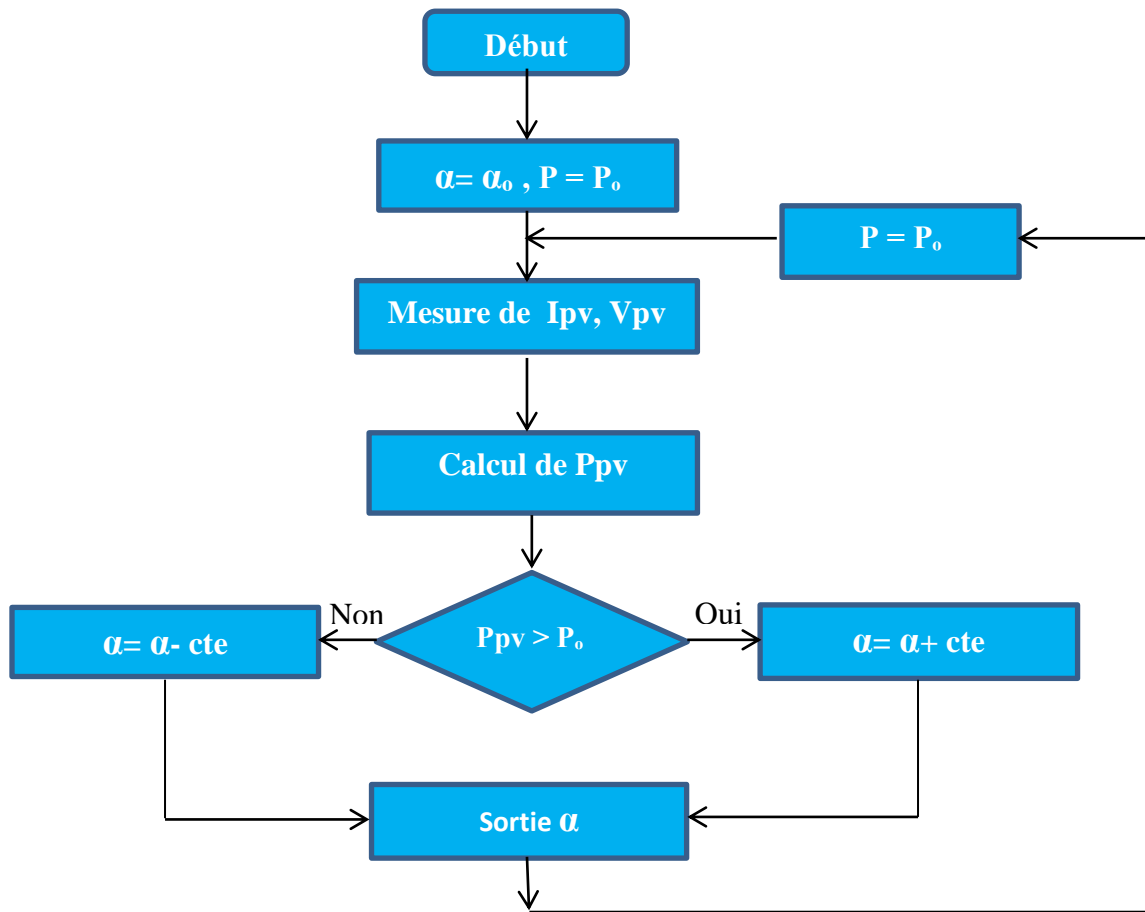


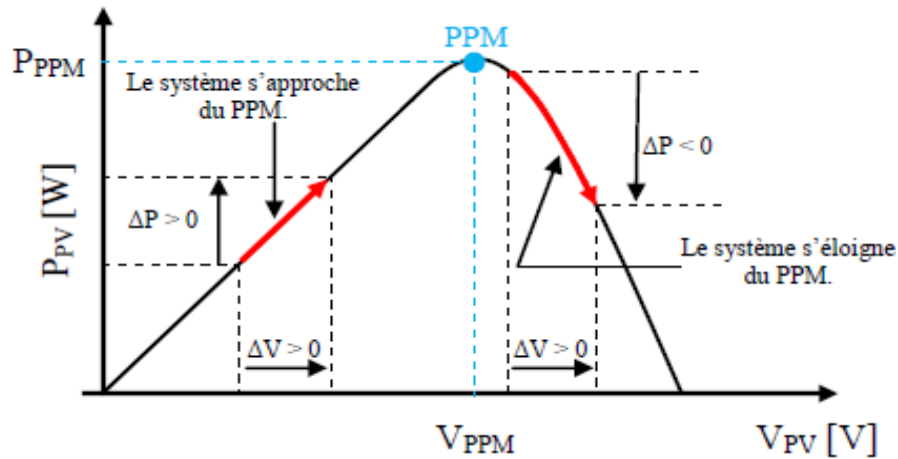
Figure 3.2. Organigramme de la première commande MPPT

**b Algorithme de perturbation et observation**

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV

augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [28].



**Figure 3.3.** Caractéristique  $P_{PV}$  ( $V_{PV}$ ) d'un panneau solaire.

Cas n°	$\Delta V$	$\Delta P$	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

**Tableau 3.1.** Principe de l'algorithme P&O

L'algorithme P&O (Figure 3.4) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est:

- ❖ l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- ❖ la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentation mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.

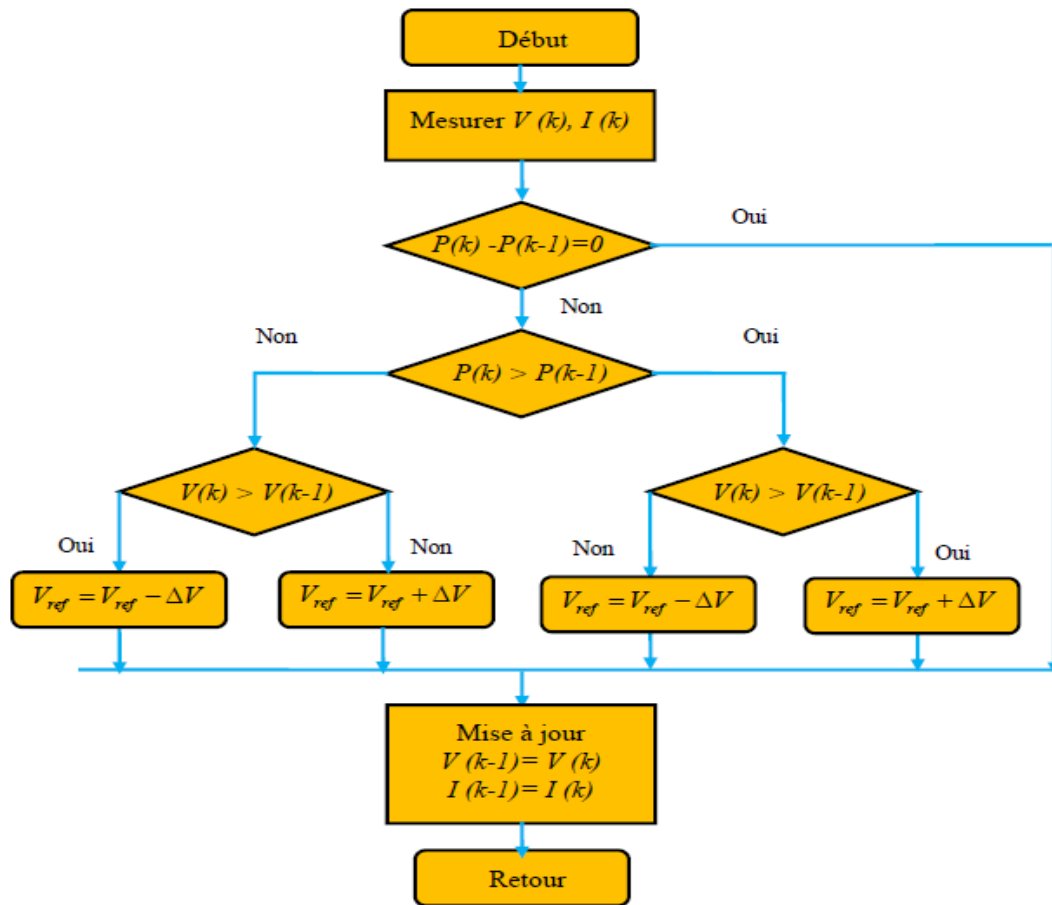


Figure 3.4 : Organigramme de la méthode P&O

### c Algorithme Hill Climbing

La technique Hill Climbing (HC) [29, 30] est une méthode mathématique d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur  $\alpha$  (Figure 3.5). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre  $\alpha$  en l'incrémentant ou en le

décroissant  $\Delta\alpha$  de jusqu'à avoir la dérivée  $dP/d\alpha$  nulle. La figure 3.6 présente l'algorithme d'exécution de cette technique. La méthode HC est plus simple à mettre en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, elle présente des oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques.

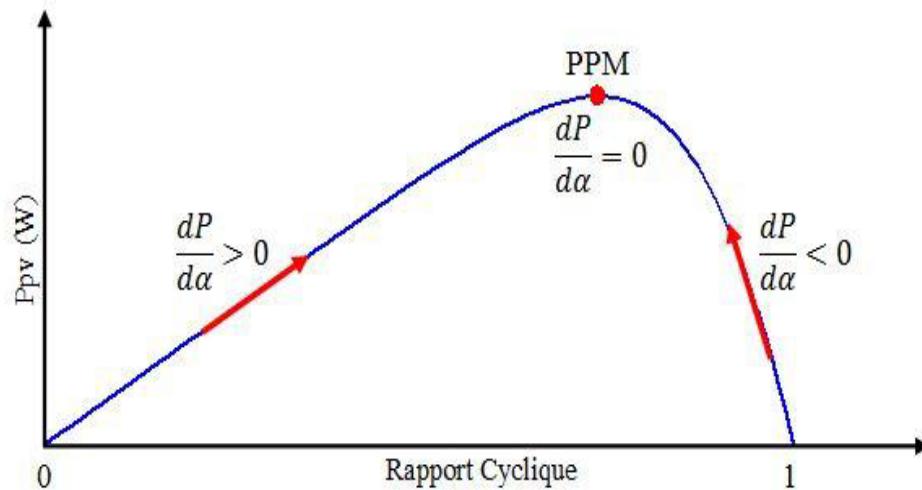


Figure 3.5. Principe de la méthode HC

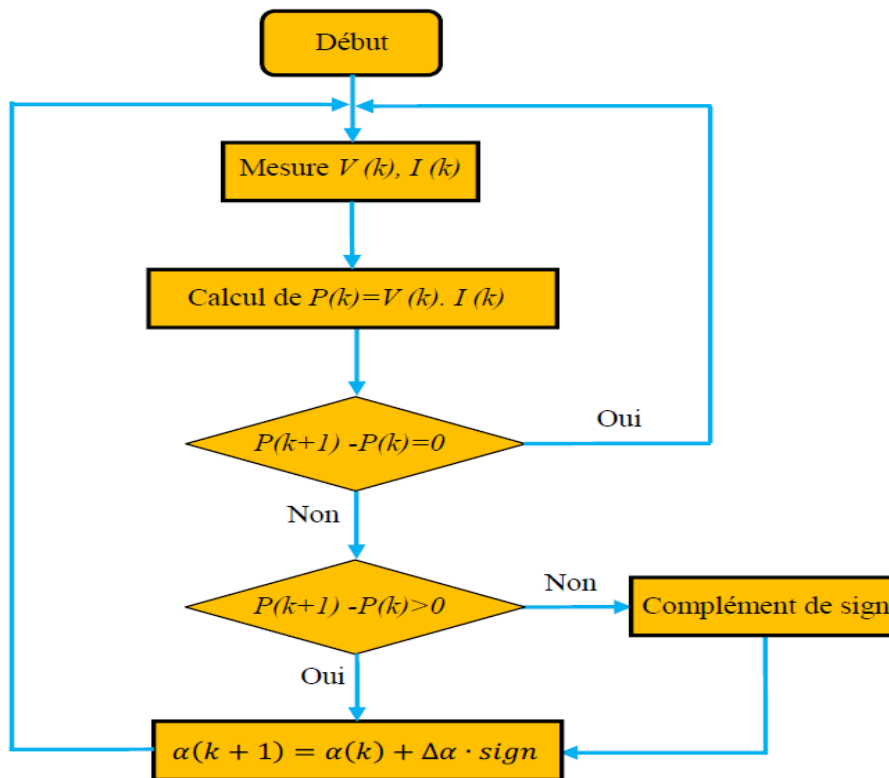


Figure 3.6. Algorithme de la méthode HC

#### d Algorithme d'incrémentation de la conductance

L'algorithme d'incrémentation de conductance (IncCond), appelée dans la littérature anglo-saxonne « Incremental Conductance », est aussi l'une des techniques de « HC » où la commande MPPT essaye de faire monter le point de fonctionnement (PF) du GPV le long de la caractéristique P-V jusqu'à atteindre le PPM. Elle permet la recherche du PPM en se basant sur l'égalité de la conductance ( $G= I/V$ ) et de l'incrément de la conductance ( $\Delta G=\Delta I/\Delta V$ ) (voir la figure 3.7). Cet algorithme nécessite la connaissance de la valeur initiale du PF ( $V_{ref}$ ) et le pas de mise à jour de la tension de référence ( $\Delta V$ ) (Figure 3.8).

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance du GPV par rapport à la tension s'annule :

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \cong V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (3.3)$$

En comparant la conductance et l'incrément de la conductance, trois positions du PF peuvent être distinguées :

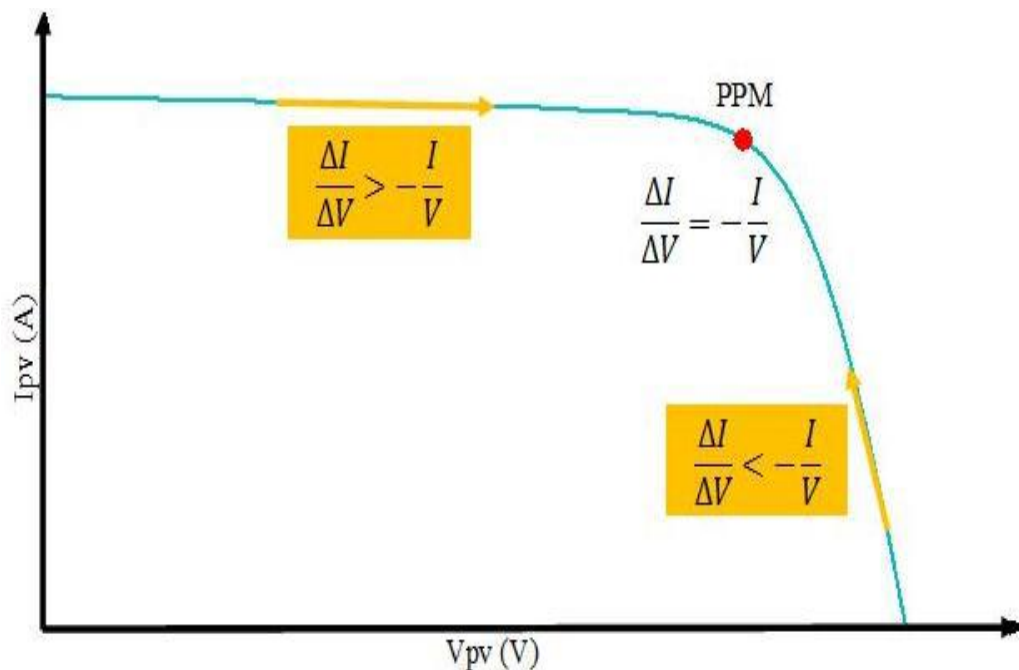


Figure 3.7. Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \frac{dP}{dV} = 0 & \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ , le PF est sur le PPM} \\
 \text{Si } \frac{dP}{dV} > 0 & \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ , le PF est à gauche du PPM} \\
 \text{Si } \frac{dP}{dV} < 0 & \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ , le PF est à droite du PPM}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

L'avantage de cet algorithme est la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Ceci peut être un remède au problème de l'algorithme P&O [31]. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide [31]. Autrement dit, l'exécution de la commande IncCond nécessite plus de temps par rapport P&O. Pratiquement, même IncCond présente des oscillations autour du PPM. Une comparaison sur le rendement MPPT entre les deux techniques les plus utilisées P&O et IncCond est faite par la référence [32]. Le résultat trouvé est de 89,9% pour IncCond contre 81,5% pour P&O.

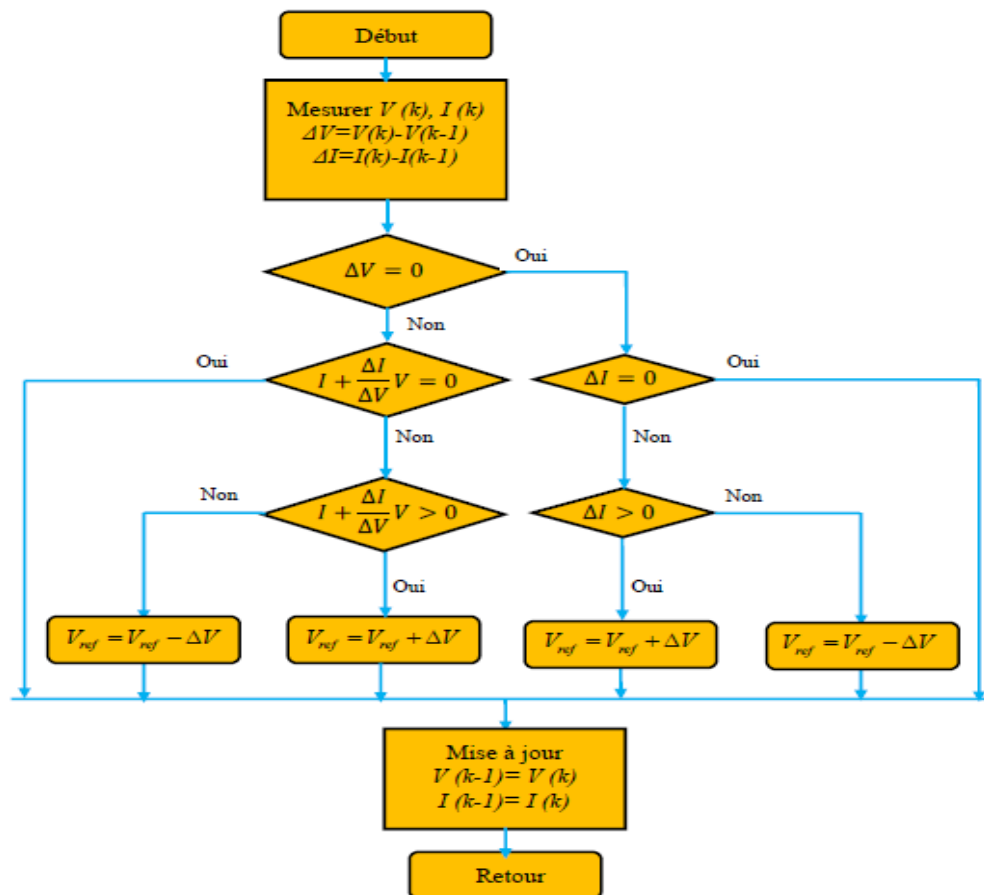


Figure 3.8. Organigramme de la méthode IncCond



### e Commande MPPT par la logique floue

La mise en œuvre de la commande logique floue (Fuzzy-Logic Control) se fait en trois étapes: la fuzzification, la lecture de la table de vérité et la défuzzification. Les variables d'entrées sont généralement l'erreur  $E$  et le changement d'erreur  $\Delta E$  et la variable de sortie est la variation du rapport cyclique  $\Delta\alpha$ . En particulier, dans le cas de la poursuite du PPM, l'erreur  $E$  et le changement d'erreur  $\Delta E$  sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et de la tension comme suit [33] :

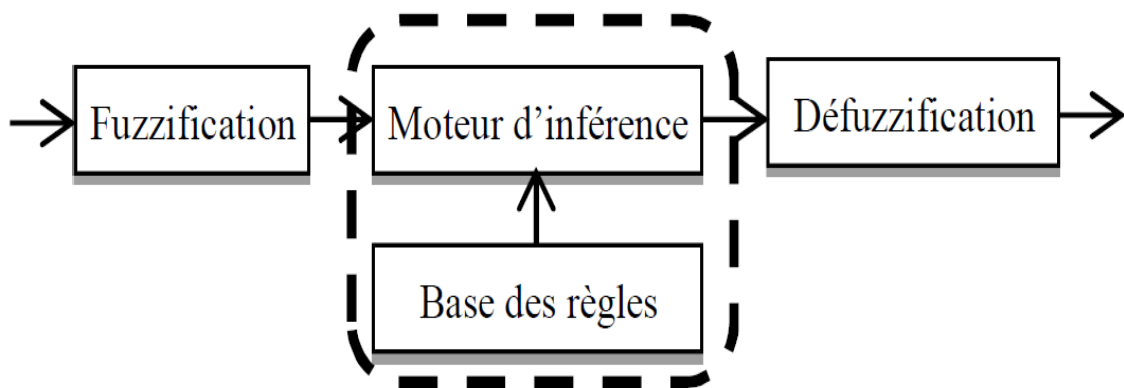


Figure 3.9. Schéma de principe de la régulation floue

La figure 3.9 montre la configuration du contrôleur flou qui se compose des entrées- sortie d'échelle, fuzzification, décision floue, et la déffuzzification. Les facteurs d'échelle : SE, SCE et SdD font changer les valeurs des entrées et de sorties du contrôleur proportionnellement. La sortie dD est déduite par les deux variables  $E$  et  $CE$ , ou cette dernière est dérivée du signal actuel par la division avec le facteur d'échelle correspondant [34]

#### 1) Fuzzification

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément par un convertisseur A/N, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(n)=V(n).I(n) \quad (3.5)$$

On suppose que le contrôle se fait par la satisfaction de deux critères relative à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont: L'erreur ( $E$ ) et le changement de l'erreur ( $CE$ ) à des instants échantillonnés ( $n$ ).

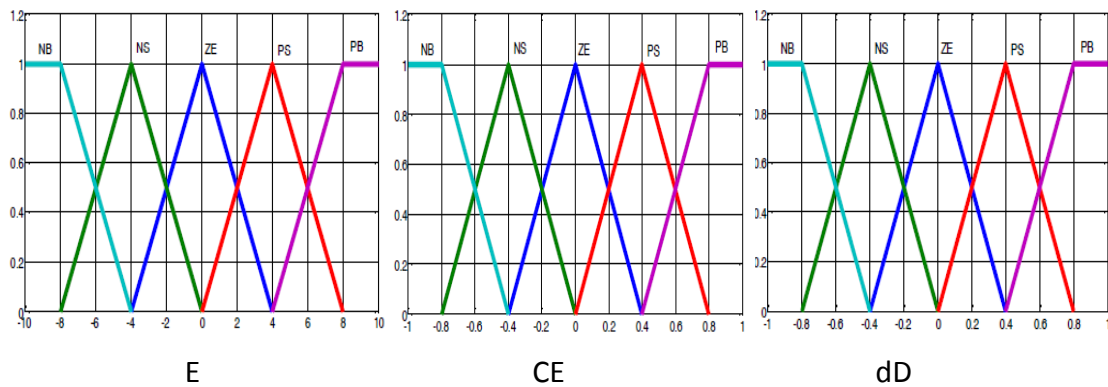
Les variables  $E$  et  $CE$  sont exprimées comme suit:

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (3.6)$$

$$CE(n) = E(n) - E(n-1) \quad (3.7)$$

Où  $P(n)$  et  $V(n)$  sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque [34].

La figure 3.10 montre les fonctions d'appartenances des cinq sous-ensembles flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie.



**Figure 3.10.** Fonctions d'appartenances de : L'entrée  $E$  ; L'entrée  $CE$  et La sortie  $dD$ .

Où  $E$  et  $CE$  et  $dD$  sont respectivement : L'erreur, Changement de l'erreur et rapport cyclique.

## 2) L'inférence

La table 3.2 montre la table de règles du contrôleur flou où toutes les entrées de la matrice sont [34]:

$E \backslash CE$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PB	PB
NS	PB	PS	PS	PS	PB
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NB	NS	NS	NS	NB
PB	NB	NB	NS	NB	NB

**Tableau 3.2.** Table de règles floues

On prend comme exemple de règles de contrôle de la table 3.2:

Si E est PB et CE est ZE Alors dD est NS.

Ce qui veut dire que :

Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (PPM) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe  $P=f(V)$  est environ Zéro; Alors diminuer le rapport cyclique dD largement.

### 3) Déffuzification

Pour une représentation de données échantillonnées, le centre de gravité est calculé par :

$$dD_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (3.8)$$

Les valeurs de sorties sont déffuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de contrôle, actuel (figure 3.9). Son rôle est de régler le contrôleur flou pour obtenir la poursuite du PPM [34].

## 3.4 Conclusion

A travers de ce chapitre, Nous avons vu également les algorithmes MPPT qui ont été couverts en détail. Il y a beaucoup de manières de distinguer et de grouper les techniques pour suivre le MPP du générateur PV. Cependant, dans ce chapitre, les techniques directes et indirectes ont été étudiées.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par deux commandes MPPT numérique « perturbation et observation » et « logique flou ».

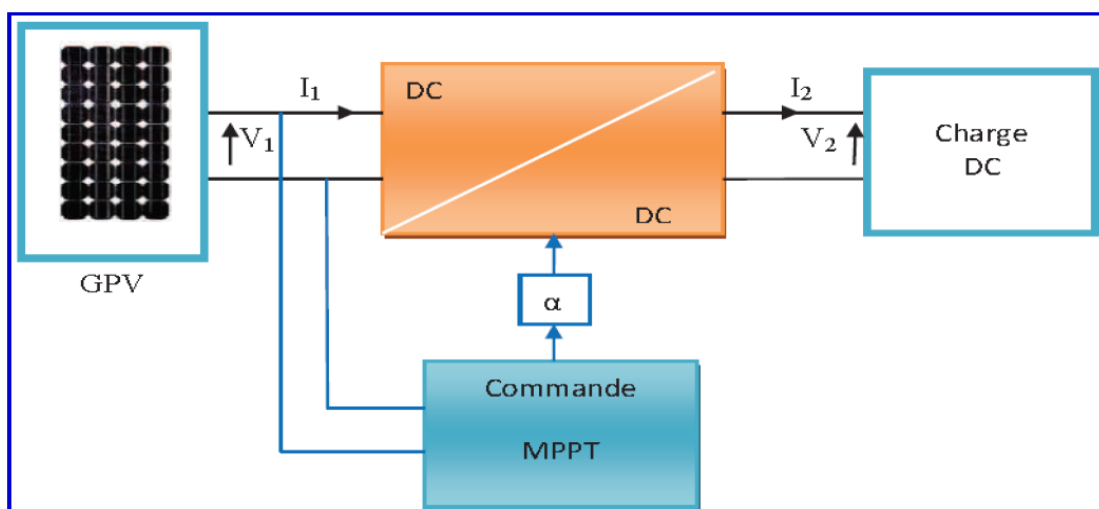
## Chapitre 4 Simulation et évaluation des résultats

---

### 4.1 Introduction

Le point de fonctionnement du module PV est l'intersection de sa caractéristique  $I=f(V)$  de module PV et la caractéristique  $I=f(V)$  de la charge, quand un module PV est directement couplé à une charge. En d'autres termes, l'impédance de la charge dicte la condition de fonctionnement du module de PV. Pour cela nous sommes obligés d'utiliser un étage d'adaptation (convertisseur DC-DC), cette étage est contrôlée par certaines commandes MPPT.

Dans ce chapitre, on verra la modélisation et la simulation du module PV (RISEN SYP185-M) dans l'environnement MATLAB/SIMULINK ainsi que le convertisseur élévateur DC-DC (Boost) avec la charge résistive, par la suite nous proposons un contrôleur flou de type MAMDANI pour la recherche et la suivre de point de puissance maximale et à la fin on fera une comparaison avec l'algorithme Perturb and observe (perturbation et observation).



**Figure 4.1.** Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT

## 4.2 L'outil Matlab/Simulink

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

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).

**SIMULINK** est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal

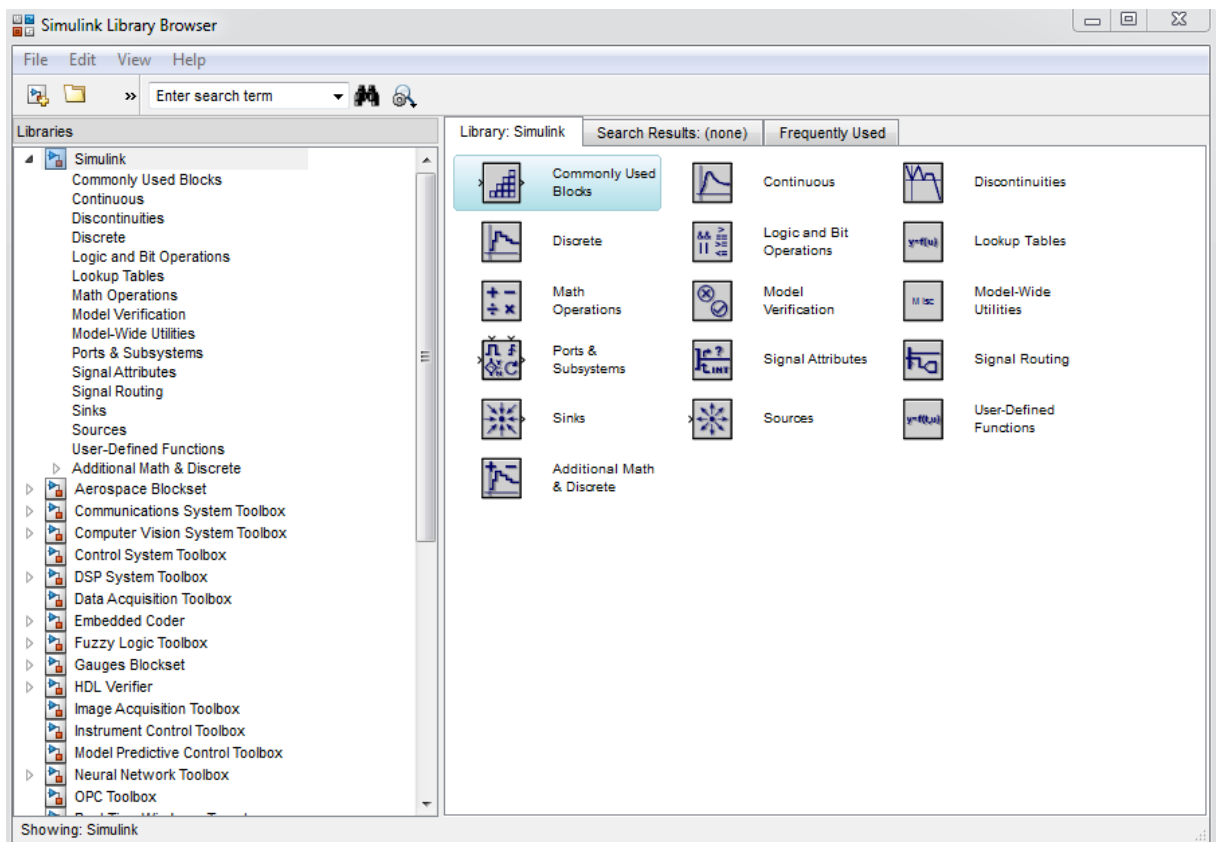


Figure 4.2. Bibliothèque SIMULINK

### 4.3 Simulation d'un panneau photovoltaïque

Pour faire cette simulation, nous avons utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK comme outil de simulation et de test.

Le choix du panneau s'est fixé sur le RISEN SYP185-M qui est un module photovoltaïque de haute puissance composé de 72 cellules en Silicium monocristallin connectées en série pour produire une puissance maximale de 185 Watt.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

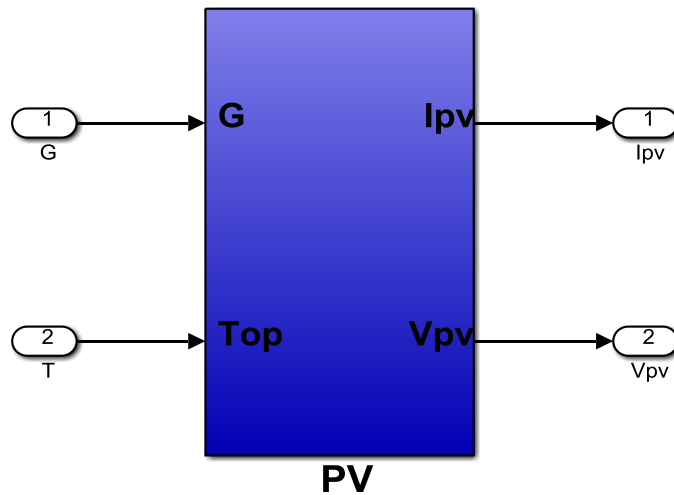
Puissance Maximale ( $P_{max}$ )	185 W
Tension à $P_{max}$ ( $V_{PPM}$ )	36.2 V
Courant à $P_{max}$ ( $I_{PPM}$ )	5.11 A
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	5.4 A
Tension à circuit-ouvert ( $V_{oc}$ )	45 V
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	72
Nombre de cellules en parallèle ( $N_p$ )	1
Coefficient de température de $I_{sc}$	+0.1 A / °C
Coefficient de température de $V_{oc}$	-0.38 V / °C
Coefficient de température de la puissance	-0.47 W/°C
Variation de température	-40°C ~ +85°C

**Tableau 4.1.** Caractéristiques électriques du module PV RISEN SYP185-M.

On peut présenter le module PV par un schéma bloc illustré dans la Figure 4.3, ce bloc comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont

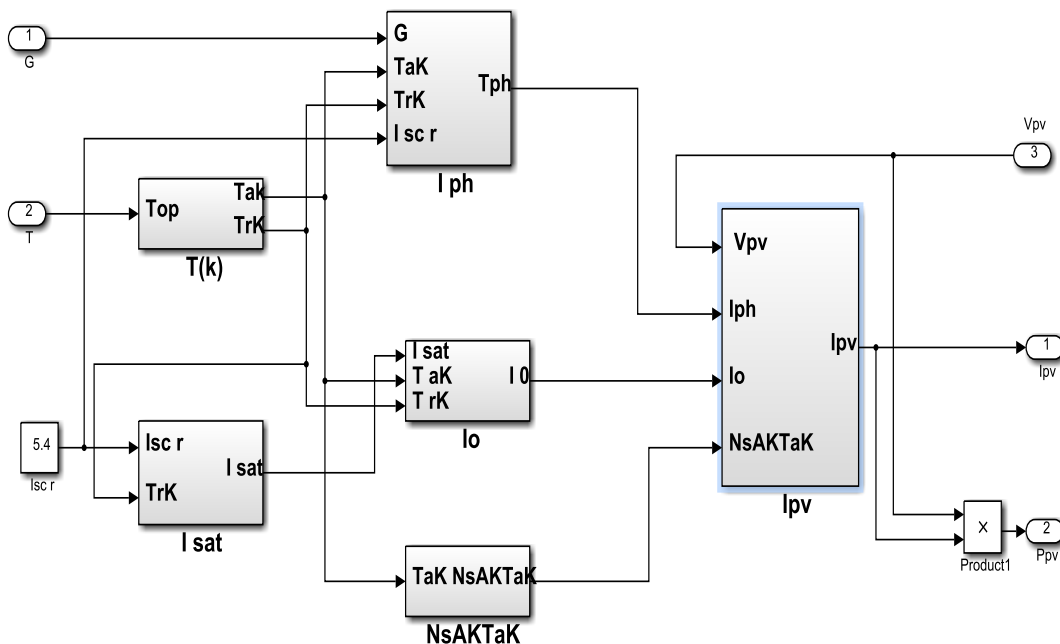
l'ensoleillement  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) et la température ambiante  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) et deux variables de sortie qui sont le courant  $I_{pv}$  (A) et la tension  $V_{pv}$  (V) du module PV.

La simulation est fait dans les conditions climatique standard pour mesurer la réponse de panneau solaire, Les conditions sont définies comme suit - l'ensoleillement (irradiation):  $G=1000 \text{ W} / \text{m}^2$  et la température:  $T=25 ^{\circ} \text{C}$ .



**Figure 4.3.** Schéma bloc du module PV en MATLAB-SIMULINK

Le schéma de la simulation du module PV est composé par les sous-systèmes suivants :



**Figure 4.4.** Sous-systèmes du module PV en MATLAB-SIMULINK

Les paramètres de module PV sont bien précisés selon les caractéristiques électriques et mathématiques du module photovoltaïque RISEN SYP185-M et ils ont été spécifiées et présentée dans les sous-systèmes suivant[35] :

**Sous-Système T(k) :** transférer la température de °C à K

Les équations:

$$T_{rk} = 273 + T_{op} \quad (4.1)$$

$$T_{ak} = 273 + T_{op} \quad (4.2)$$

Bloc Matlab

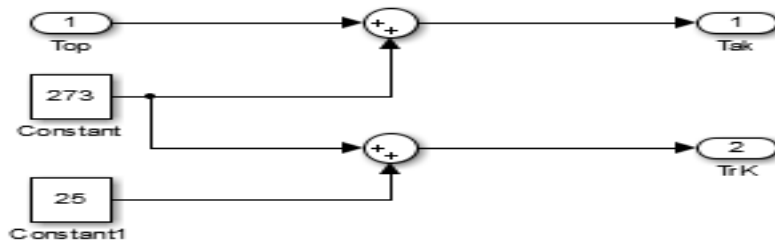


Figure .4.5. Bloc de conversion T(k)

**Sous-Système I<sub>sat</sub> :** Le courant de saturation inverse de la diode

L'équation :

$$I_{sat} = \frac{I_{scr}}{\left[ \exp\left(\frac{q V_{OC}}{N_s A K T}\right) - 1 \right]} \quad (4.3)$$

Bloc Matlab :

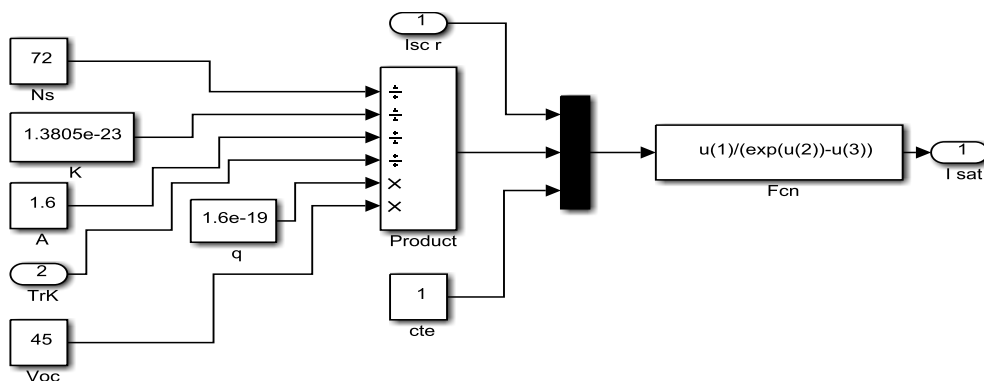


Figure .4.6. Bloc de I<sub>sat</sub>

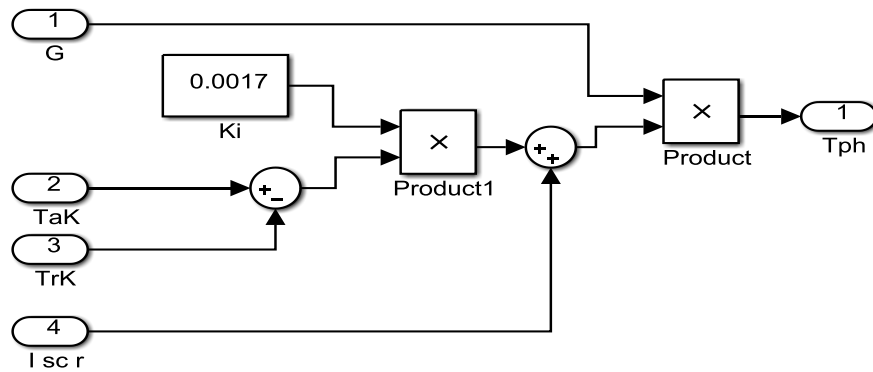


**Sous-Système  $I_{ph}$  : Courant de photon de module PV**

L'équation :

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T_{ak} - T_{rk})] G / 1000 \quad (4.4)$$

Bloc matlab :



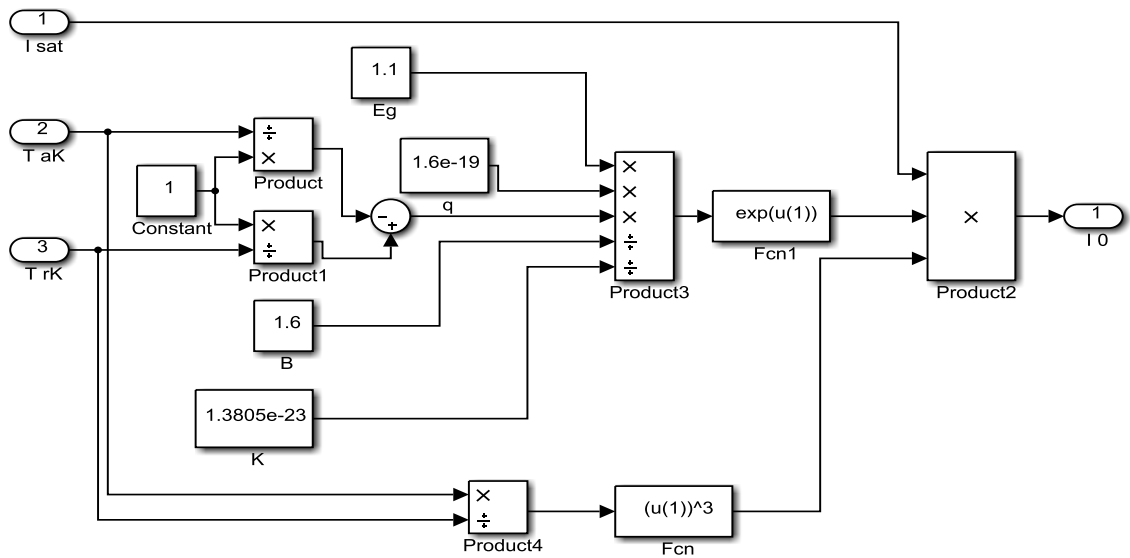
**Figure .4.7.** Bloc de  $I_{ph}$

**Sous-Système  $I_0$  : Courant de saturation du module PV**

L'équation :

$$I_0 = I_{rs} * \left[ \frac{T}{T_3} \right]^3 \exp \left[ \frac{q * E_{g0}}{BK} \left\{ \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right\} \right] \quad (4.5)$$

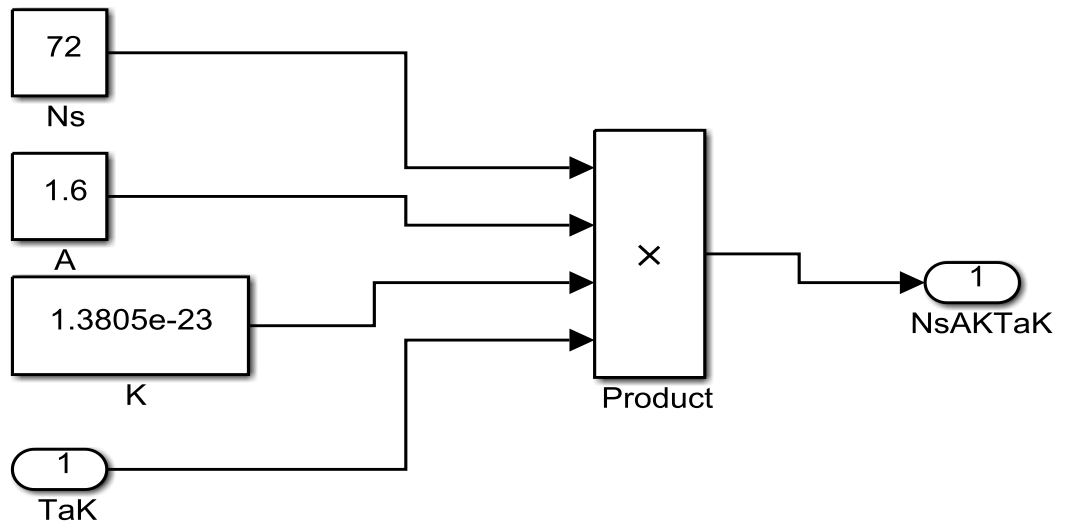
Bloc matlab :



**Figure .4.8.** Bloc de  $I_0$

**Sous-Système  $N_sAKT$ :** c'est le produit de tous ces paramètr ( $N_s, A, K, T$ )

Bloc matlab :



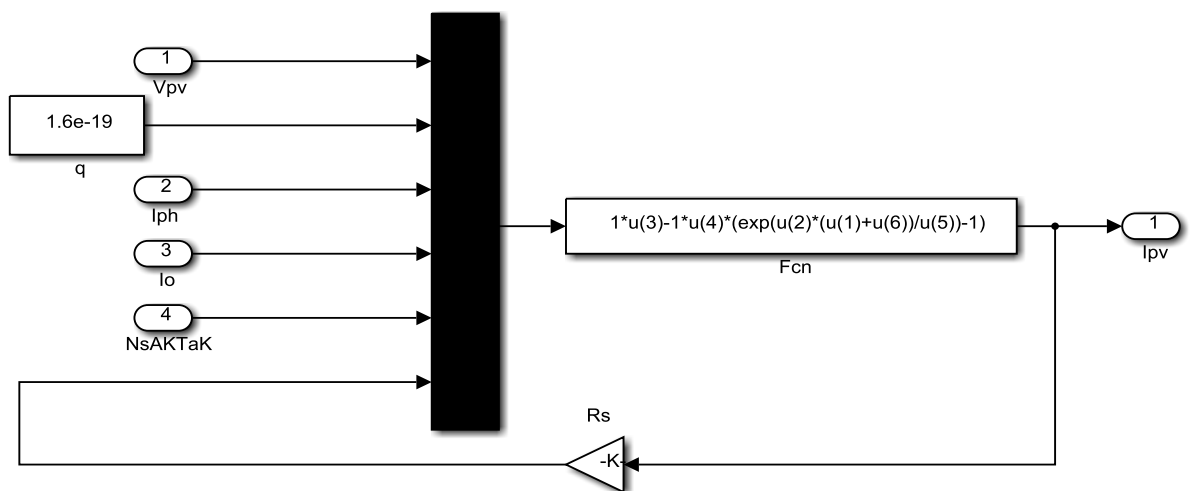
**Figure .4.9.** Sous-système  $N_sAKT$

**Sous-Système  $I_{PV}$ :** Courant de sortie actuelle du module PV

L'equation :

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left\{ \frac{q (V_{PV} + I_{PV})}{N_s A K T} \right\} - 1 \right] \quad (4.6)$$

Bloc Matlab:



**Figure .4.10.** Sous-système  $I_{PV}$

## 4.4 Connexion directe PV-charge

Le module PV a été connecté directement avec une résistance variable (Voire la Figure 4.11) dont la valeur est changée manuellement. Ceci a permis de tracer l'intersection de la caractéristique  $I=f(V)$  du module PV et la droite de charge, (Figure 4.12). Ainsi que le tableau 4.2.

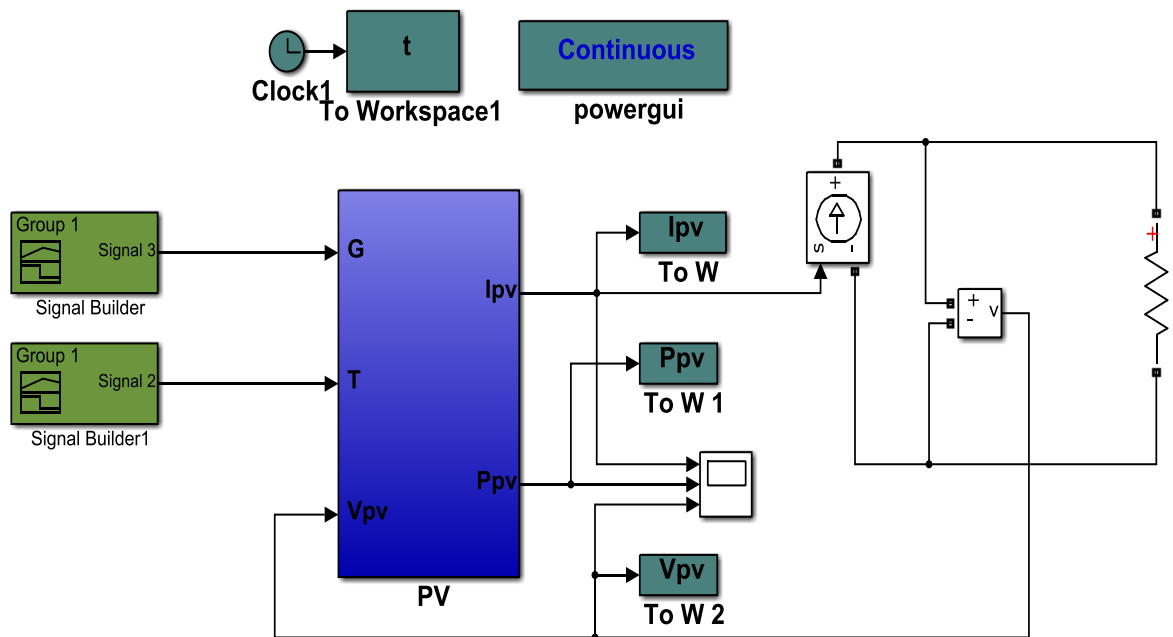


Figure 4.11. Connexion directe module PV-charge.

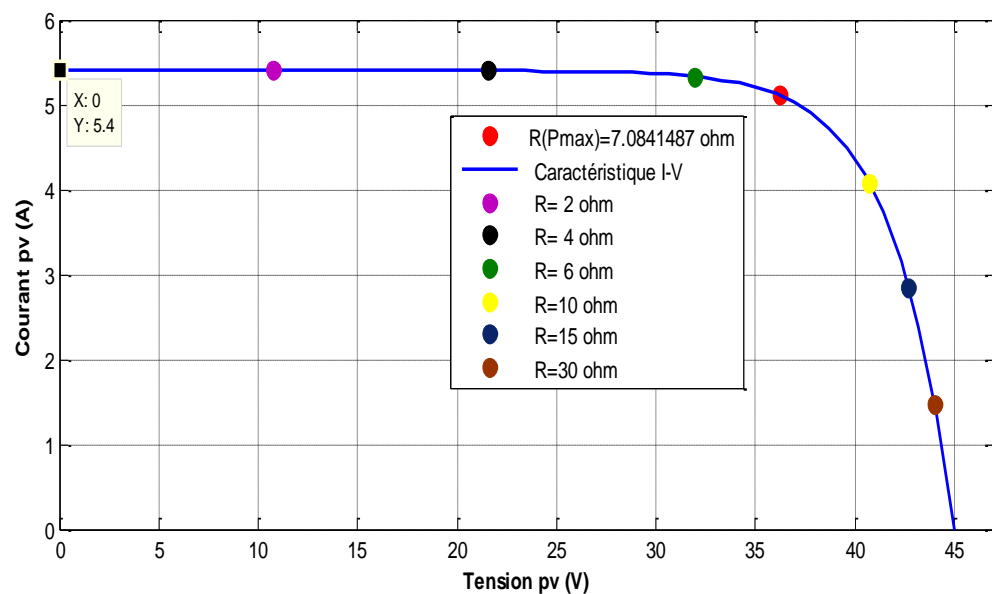


Figure 4.12. L'intersection de la caractéristique  $I=f(V)$  du module PV et la droite de charge.

La Figure 4.12 montre les points de fonctionnement sur la courbe de caractéristique  $I=f(V)$  de module PV pour différentes valeurs de la charge. Ces points peuvent se retrouver éloignés du PPM, le module PV est alors mal exploité et une partie de la puissance maximale potentielle n'est pas transférée à la charge.

Résistance de charge $R (\Omega)$	Tension au point de fonctionnement $V_{PF} (V)$	Courant au point de fonctionnement $I_{PF} (A)$	Puissance au point de fonctionnement $V_{PF} * I_{PF} (Watt)$ .
2	10.8	5.4	58.32
4	21.59	5.39	116.54
7.0841487	36.2	5.11	185
15	42.7	2.84	121.56
30	44.02	1.46	64.57

**Tableau 4.2.** Résultats de la connexion directe PV-Charge.

À partir des résultats de ce tableau, nous constatons que :

Lorsque la résistance  $R_c$  augmente, le courant est presque constant juste que on a approche de  $P_{max}$  le courant est tend vers la valeur '0', et la tension augment et s'approche de  $V_{co}$  et la puissance  $P_{PV}$  augmente est atteint son maximum pour  $R_c=7.0841\Omega$ . Et après la valeur optimale de charge  $R_c=7.0841 \Omega$  la puissance et encore diminue.

Les résultats obtenus, confirme le fait que la caractéristique  $I=f(V)$  du panneau PV est non linéaire, et il existe une valeur unique de la charge dans lequel le module PV fonctionne à sa puissance maximale.

Une charge résistive a une caractéristique droite avec une pente  $1/R$  ce qui conclut que l'impédance de la charge dicte la condition de fonctionnement du module de PV.

## 4.5 Modélisation et simulation d'un hacheur élévateur (Boost)

### 4.5.1 Dimensionnement des paramètres du le convertisseur DC-

#### DC Boost

La structure d'un hacheur Boost est constituée d'une inductance, un transistor MOSFET, une diode, un condensateur d'entrée et un de sortie et une charge à la sortie.

Ce Boost peut être modélisé à partir de la bibliothèque Sim-Power qui contient tous les éléments électriques nécessaires, le modèle Sim-Power du hacheur est donné sur la figure 4.13.

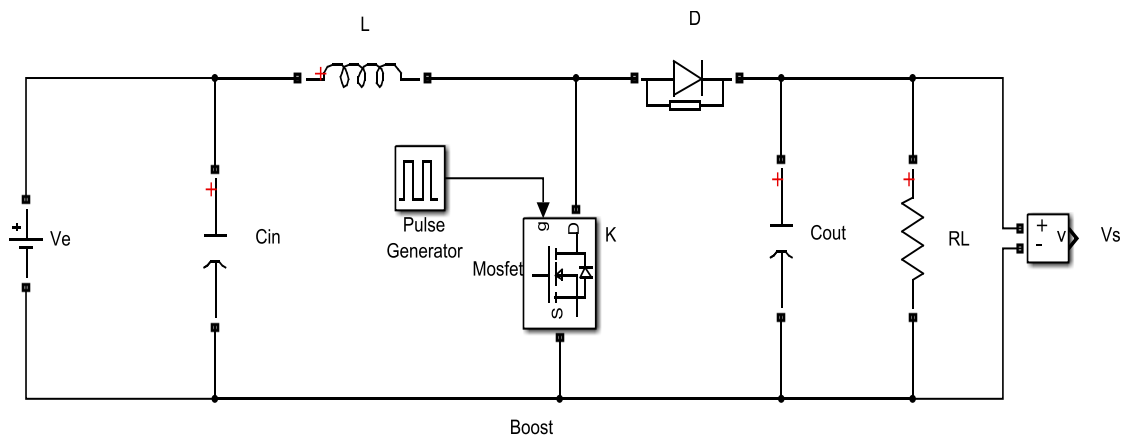


Figure 4.13. Modèle SimPower du hacheur Boost.

#### a La charge DC :

Dans le but de maintenir la tension de sortie  $V_{out}$  dans un état constant, la charge DC (la résistance  $R_{Load}$ ) qu'on a l'intention de connecter à la sortie du convertisseur doit être capable de consommer toute la puissance générée par le panneau photovoltaïque. Ceci est équivalent à dire que sa valeur (en Ohms) doit impérativement satisfaire l'inégalité suivante [36]:

$$(V_{out})^2/R_{Load} > P_{max} \quad (4.7)$$

Ce qui est équivalent à :

$$R_{Load} < (V_{out}^2/P_{max}) \quad (4.8)$$

Avec  $P_{max}$  : Puissance maximale que peut fournir le panneau photovoltaïque utilisé  $\approx$  185 W.

Données électriques et tolérances admissibles pour le convertisseur:

$\Delta V_{in} = 2\% \times V_{in\_max} \approx 1V$  (Ondulation sur la tension d'entrée).

$V_{out} = [0, V_{out\_max}]$ , ( $V_{out\_max}$  peut varier selon la valeur instantanée de  $D$ ).

Deux variables interdépendants  $R_{Load}$  et  $D$  apparaissent à chaque fois qu'on essaie de fixer les données requises à l'abord du problème de dimensionnement de notre convertisseur DC/DC. Suite à cela, On a procédé à un tâtonnement pour fixer  $R_{load}$ , et  $D$ .

Nous avons opté pour le choix suivant :

$R_{Load} = 15 \Omega$ . choix en concordance avec l'inégalité (4.7)

#### ***b Limites du rapport cyclique :***

Afin de trouver le MPP dans différentes situations, un grand espace de recherche est nécessaire [36].

Ainsi, les limites choisies du rapport cyclique sont:

$D = [D_{min}, D_{max}] = [0.05 ; 0.95]$

Pour le reste des constantes, nous avons également comme données requises [36]:

$$V_{out\_MAX} = \sqrt{P_{PV\_MAX} R_{Load}} = \sqrt{185 * 15} = 52.67 V \quad (4.9)$$

$\Delta V_{out} = 5\% = 2.63V$  (Ondulation sur la tension de sortie).

$f_s = 20$  kHz.

$\Delta I_L = 10\% * I_{cc} \approx 0.54$  A (Ondulation du courant inducteur, caractérisant la limite d'ensoleillement pour un mode de fonctionnement en mode continue CCM)

$\Delta V_{in} = \Delta V_{PVCO} = 2\% = 0.9$  V

$I_{out\_max} = V_{out\_max} / R_{Load} = R_c \approx 3.51$  A

La valeur limite du courant d'entrée du convertisseur est celle dictée par le courant du court-circuit du panneau sous un ensoleillement maximal :

$$I_{CC} = 5.4 \text{ A.}$$

Le courant nominal d'entrée, dans des conditions d'ensoleillement maximal (1000W/m<sup>2</sup>) est:

$$I_{MPP} = 5.11 \text{ A.}$$

La fréquence de découpage des convertisseurs DC/DC, joue un rôle important dans la détermination des performances globales de ce type de convertisseurs. La fixation de cette fréquence de commutation est généralement déterminée par les exigences d'efficacité et de rendement du fait que les pertes de commutation peuvent être minimisées en opérant à des fréquences de commutation relativement faible.

Des fréquences typiques de commutation se situent dans la gamme de 1kHz à 1 MHz, en fonction de la vitesse des dispositifs semi-conducteurs (transistor et diode) [36].

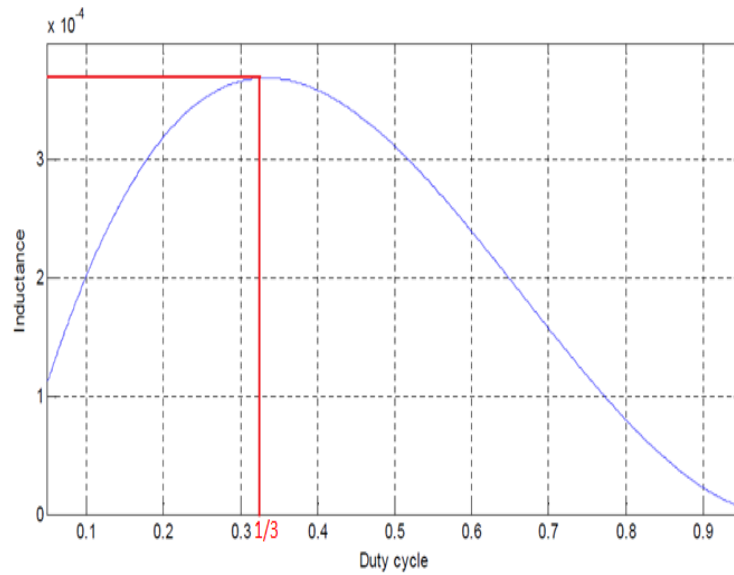
Pour ce qui est de notre application nous avons choisi d'opéré avec la fréquence de 20Khz.

### ***c Inductance du Boost :***

Quand le générateur photovoltaïque alimente une charge résistive par l'intermédiaire d'un convertisseur Boost, l'inductance de ce dernier est indiquée en suivant les deux conditions complémentaires données ci-dessous [36]:

$$L \geq \max\left(\frac{(1-D)^2 \cdot D \cdot R_{Load}}{2 \cdot f_s}\right) \quad (4.10)$$

$$L \geq L_{min} = \frac{V_{PV} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (4.11)$$



**Figure 4.14.** Variation de la valeur L en fonction de D présentée dans (4.10)

Prenant la valeur du rapport cyclique dans lequel la première condition est à sa valeur maximale et est  $D=1/3$ , et la remplacer en deuxième condition par  $V_{pv}=V_{pv\_max}$ , la valeur de l'inductance minimum est :

$$L_{min} = \frac{45 \times 1/3}{0.5 \times 20000} = 1.5mH$$

Nous avons fini par opter pour une valeur de :  $L= 2mH$ .

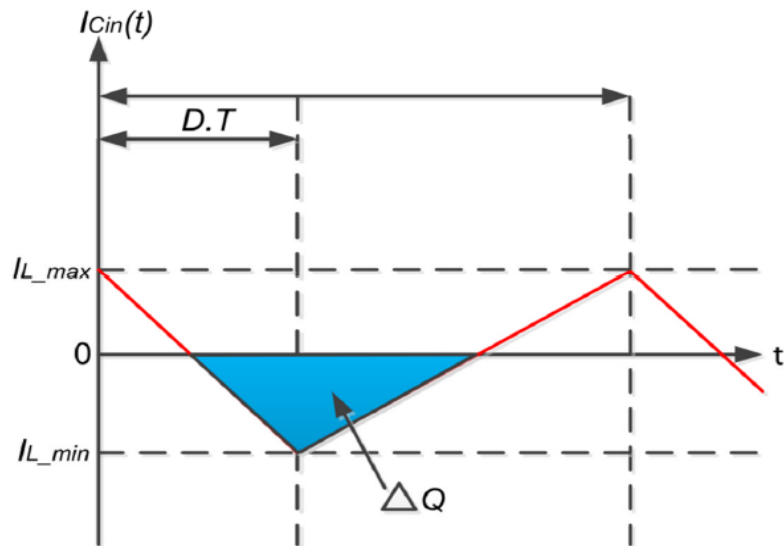
#### **d Condensateur d'entre $C_{in}$**

La charge  $Q$  du condensateur évolue au cours du temps. Lors de l'opération de charge,  $Q$  augmente. Ce débit de charge correspond à l'intensité de courant  $i$ .

$$i_C = \frac{dQ}{dt} \quad (4.12)$$

Et conformément au principe d'équilibre de charge, l'intégrale du courant du condensateur au cours d'une période de commutation est nulle.





**Figure 4.15.** Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur  $C_{in}$  durant une période de commutation  $T$ .

$\Delta Q$  est la zone triangulaire, simple calcul d'aire qui est donnée par :

$$\Delta Q = \frac{1}{2} T \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{\Delta I_L}{8 F_s} \quad (4.13)$$

En plus, la relation charge-tension est donnée par :

$$\Delta Q = C \Delta V \quad (4.14)$$

Ceci nous conduira enfin à :

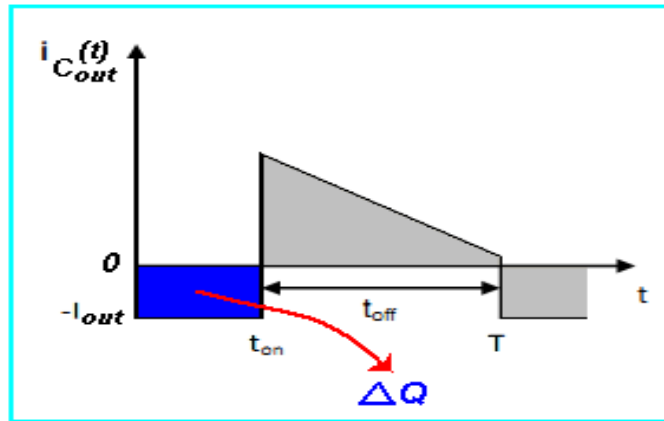
$$C_{in} \frac{\Delta I_L}{8 \Delta V_{in} F_s} = \frac{0.54}{8 * 0.9 * 20000} = 3.5 \mu F$$

Nous avons fini par opter pour la valeur de :  $C_{in} = 110 \mu F$

#### **e Condensateur de sorti $C_{out}$**

Pour dimensionner le condensateur de sortie, nous suivons le même raisonnement que celui utilisé pour condensateur d'entrée

Et puisque l'intégrale représente l'aire dans ce cas le secteur carré, qui est indiqué dans la figure 4.16 est la charge  $\Delta Q$  pour l'équation (4.12) [36].



**Figure 4.16.** Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur  $C_{out}$  durant une période de commutation  $T$ .

Donc un simple calcul d'aire ( $\Delta Q$  le secteur carré) nous donnera :

$$\Delta Q = D \cdot T \cdot I_{out} \quad (4.15)$$

En plus, la relation charge-tension est donnée par :

$$\Delta Q = C \Delta V \quad (4.16)$$

Ceci nous conduira enfin à :

$$C_{out} \geq \frac{D \cdot I_{out}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (4.17)$$

D'après les données numériques du problème, nous avons :

$D_{max}=0.95$ ,  $I_{out\_max} = 3.51A$  et  $\Delta V_{out} = 2.63 V$  ce qui donne :

$$C_{out} \geq 61.38 \mu F$$

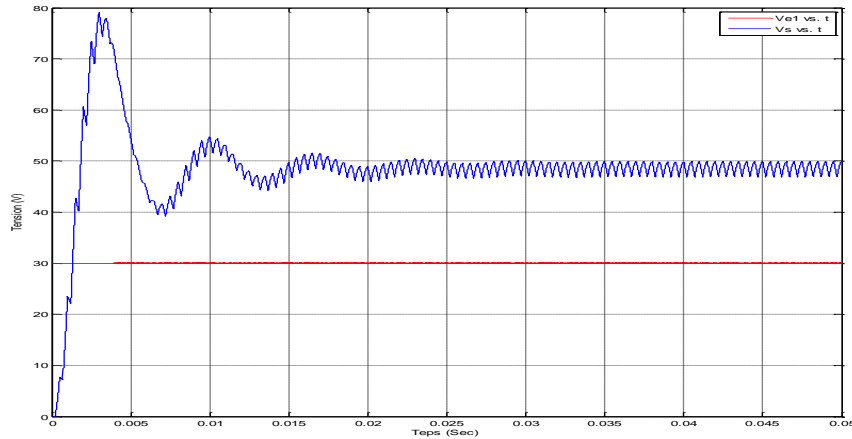
Nous avons fini par opter pour la valeur de :  $C_{out} = 220 \mu F$

#### 4.5.2 Simulation du convertisseur DC-DC Boost

Le convertisseur Boost est simulé par les valeurs suivantes :

$C_{in} = 110 \mu F$ ,  $C_{out} = 220 \mu F$ ,  $L = 2 mH$ ,  $R_c = 15 \text{ ohm}$ ,  $F_s = 2 \text{ kHz}$  et  $D = 0.4$

Les résultats de simulation du fonctionnement du Boost en conduction continue sont montrés dans la figure 4.17. Elles représentent l'évolution des tensions d'entrée et de sortie boost en fonction du temps.



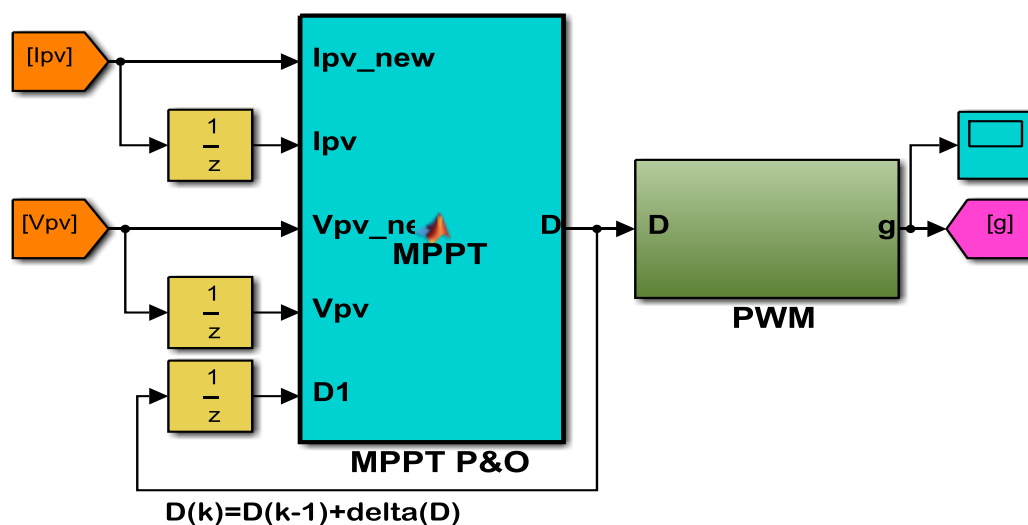
**Figure 4.17.** Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur DC-DC Boost.

On observe que la tension d'entrée constant  $V_e = 30V$  et la tension de sortie il réagit un temps de transitoire  $t = 0.05s$  après la stabilité de la tension à la valeur moyenne  $V_s = 49V$ .

## 4.6 Simulation de l'algorithme MPPT Perturb and Observe (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) le plus utilisé, Que nous avons présenté au chapitre 3. Et est présentée sur la figure 4.118.

### 4.6.1 Bloc MATLAB de l'algorithme P&O et signal PWM



**Figure 4.18.** Bloc MATLAB de de l'algorithme et signal PWM

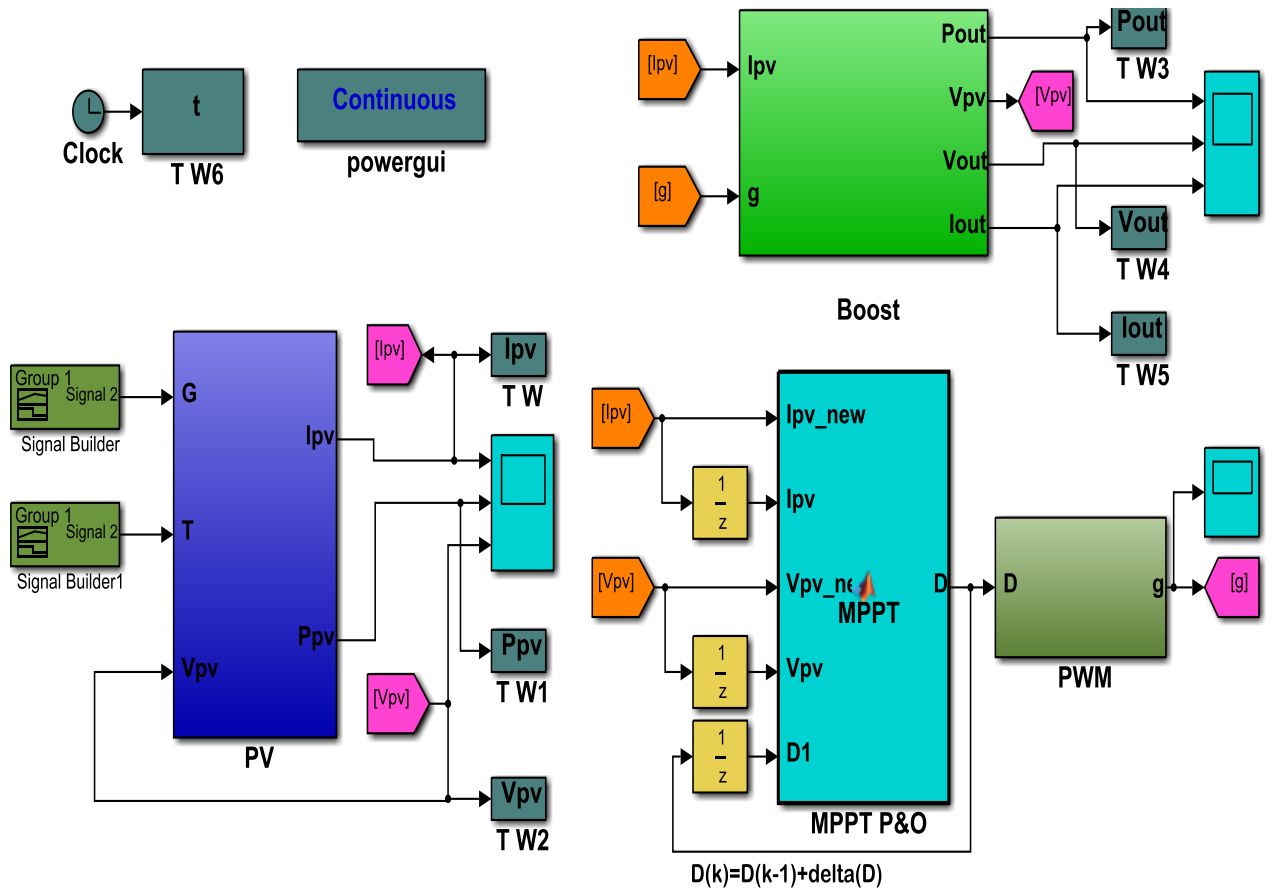
## 4.6.2 Le code MATLAB de l'algorithme P&O

Le code MATLAB suivant traduit l'algorithme de la figure 3.4

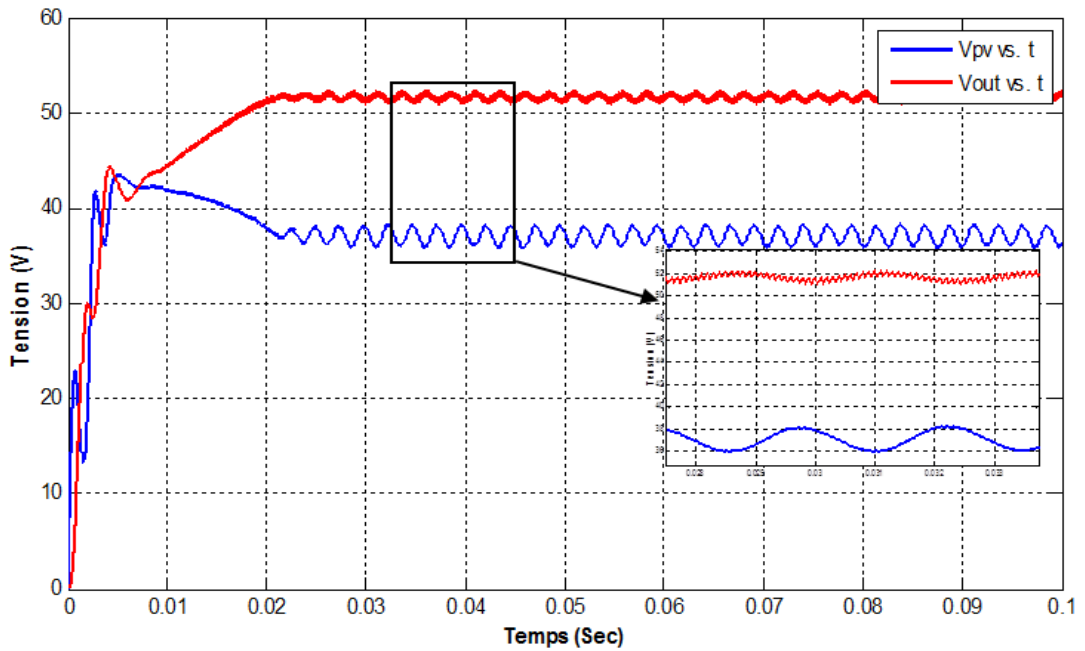
```
function D = MPPT(Ipv_new, Ipv, Vpv_new, Vpv, D1)
delta=0.002;
Ppv=Ipv*Vpv;
Ppv_new=Ipv_new*Vpv_new;
if Ppv_new>Ppv
if Ipv_new>Ipv
    D=D1+delta;
else
    D=D1-delta;
end
else
if Ipv_new>Ipv
    D=D1-delta;
else
    D=D1+delta;
end
end
```

## 4.6.3 Simulation de système globale (Module PV, convertisseur, MPPT, charge)

La figure 4.19 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système PV adapté par la commande MPPT « perturbation et observation », Nous permis de tracer les graphes dans les conditions standard comme il est illustré dans les figures 4.20, 4.21 et 4.22 qui est respectivement la tension, le courant et la puissance de la sortie de panneau et sortie de Boost en fonctionne de temps, et on présent aussi la variation de la valeur de le rendement  $\eta$  fonctionne de temps sur la figure 4.23.



**Figure 4.19.** Schéma MATLAB SIMULINK d'un système PV avec la Commande MPPT (P&O).



**Figure 4.20.** Tension sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme P&O

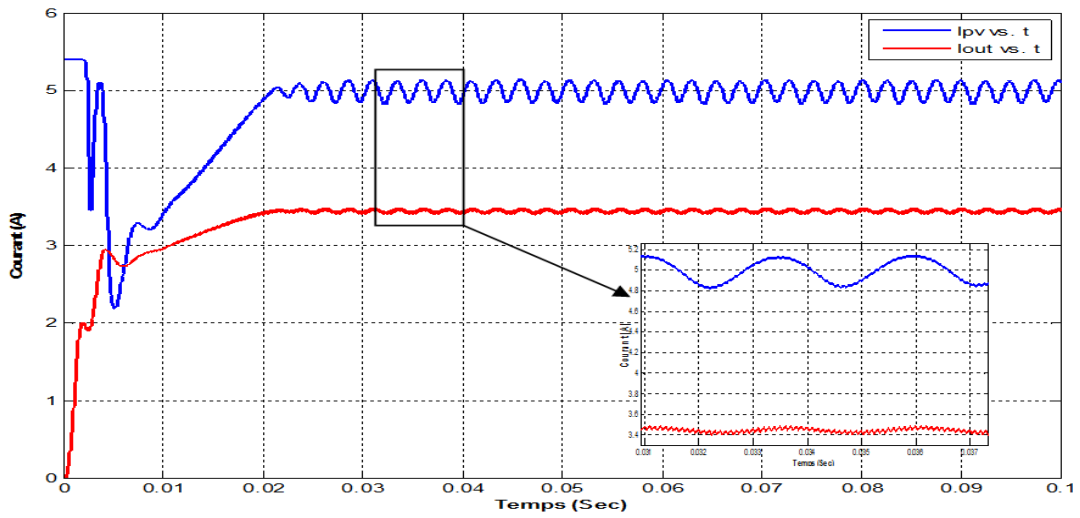


Figure 4.21. Courant sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme P&O

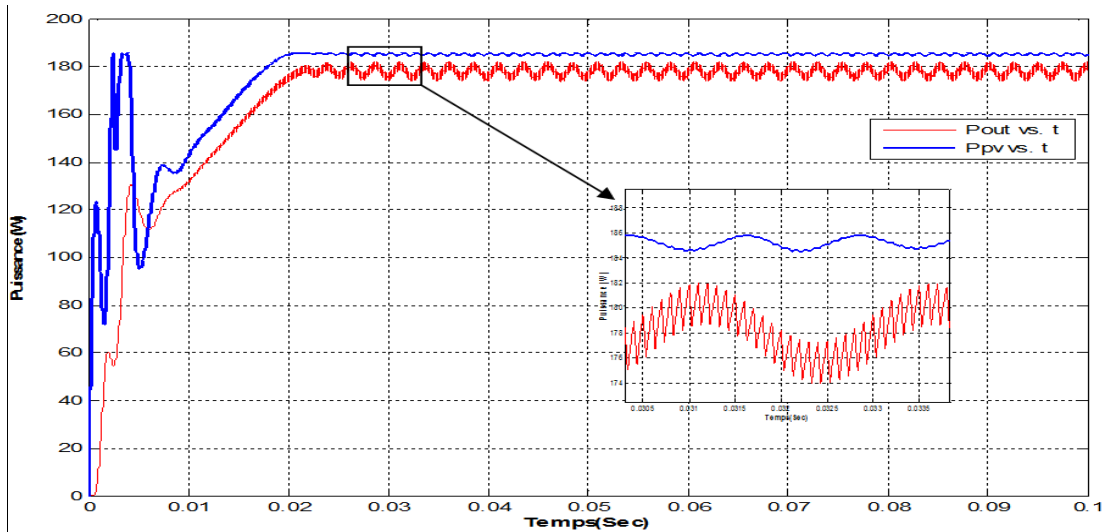


Figure 4.22. Puissance sortie panneau et de Boost contrôle par algorithme P&O

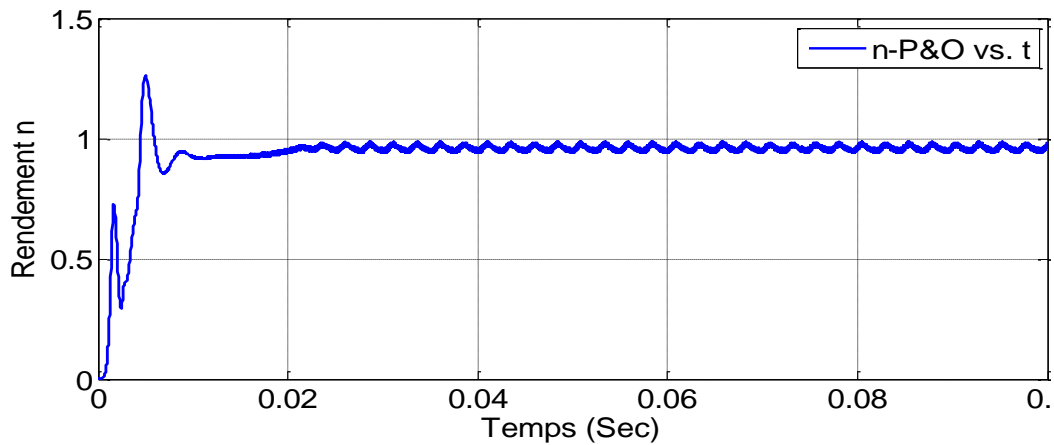


Figure 4.23. Le rendement avec l'algorithme P&O.

#### 4.6.4 Discussion des résultats obtenus

On remarque le temps de montée pour les trois grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) est de valeur égale à  $t_s = 0.021s$  pour atteindre la valeur de la puissance maximale qui égale à  $P = 184.5 W$  et remarque que la sortie oscille autour de point de puissance maximale quand on utilise La commande (P&O).

La valeur de la puissance fournie par le générateur PV se stabilise à  $184.5W$  et celle fournie à la charge atteint une valeur de  $178W$ .

À la sortie du panneau, la tension atteint la valeur  $V_{mpp} = 36.15V$  et le courant se stabilise à la valeur  $I_{mpp} = 5.1A$ . Au niveau de la charge, la tension générée est de  $V_s = 52V$  et le courant égal à  $I_s = 3.3A$

Nous notons que la différence entre la puissance de sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de 7 Watts. Ces pertes causées par la commutation et par la conduction dans le transistor MOSFET et aussi dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

Le rendement dans cette algorithmme est égal à  $\eta = 0.96$ .

#### 4.7 Simulation de l'algorithme logique floue

Le contrôleur flou qui est basé sur les variables floues est aussi applicable pour la poursuite du point de puissance maximal. Nous voulons appliquer cet algorithme pour voir quel est ses avantages ou ses inconvénients par rapport à la commande P&O.

Comme nous avons vu dans le chapitre précédant le régulateur floue composé par trois parties Fuzzification, L'inférence flou et Déffuzification pour cela on va programmer notre contrôleur comme ce de suite [37] :

##### 1) Fuzzification

Cette étape consiste à convertir les variables numériques à des variables linguistiques (flou), ces variables d'entrés sont calculés par les équations 4.19 et 4.20.

$$P(n) = V(n) \cdot I(n) \quad (4.18)$$

Les variables  $E$  et  $CE$  sont exprimées comme suit:

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (4.19)$$

$$CE(n) = E(n) - E(n-1) \quad (4.20)$$

Ces équations est programmées dans code MATLAB par :

```
function [E,CE] = E_CE( lpv,lpv_new,Vpv,Vpv_new,E_new)
```

```
Ppv_new=lpv_new*Vpv_new;
```

```
Ppv=lpv*Vpv;
```

```
DVpv=Vpv-Vpv_new;
```

```
DPpv=Ppv-Ppv_new;
```

```
E=DPpv/DVpv;
```

```
CE=E-E_new;
```

Et les fonctions d'appartenance sont programmées comme ci-dessous :

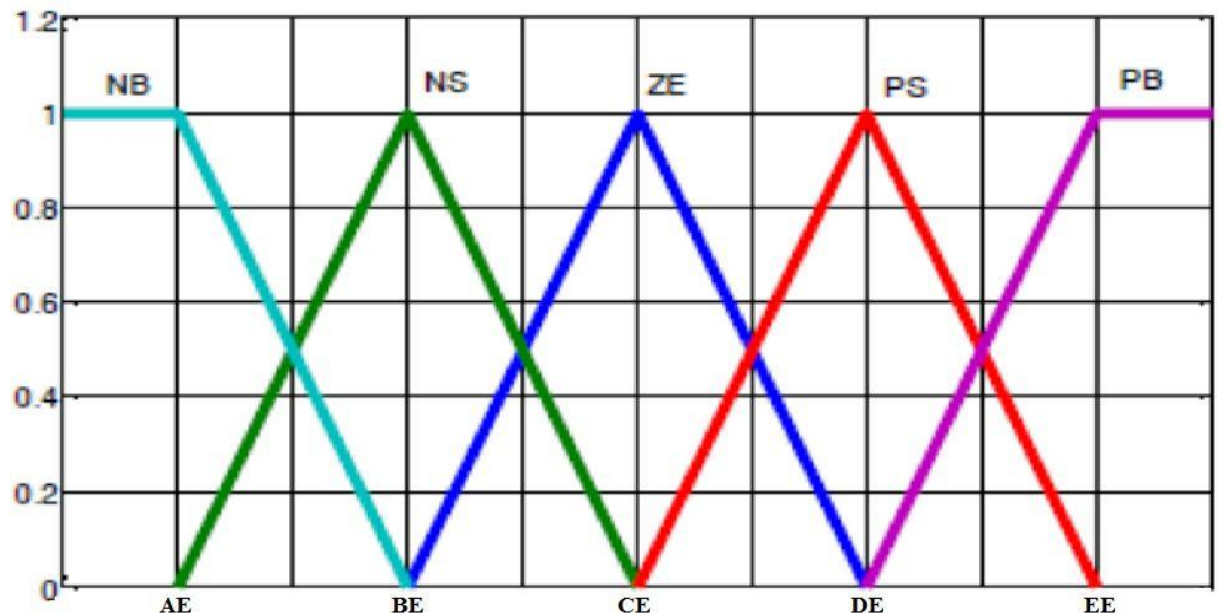


Figure 4.24. Fonction d'appartenance de l'entrée E



Ces fonction est programmées dans code MATLAB par :

Exemple de NB :

```
if E < AE
    NB=1;
elseif E>=AE && E< BE
    NB= - (1/ (BE-AE) ) *E+ (BE/ (BE-AE) ) ;
else
    NB=0;
end
```

Exemple de NS:

```
if E < AE
    NS=0;
elseif E> AE && E<BE
    NS= (1/ (BE-AE) ) *E+ (AE/ (AE-BE) ) ;
elseif E>=BE && E< CE
    NS= - (1/ (CE-BE) ) *E- (CE/ (BE-CE) ) ;
else
    NS=0;
end
```

Et nous avons continué tous les fonctions d'appartenance par la méthode précédent.

Par la suite nous avons remplacés les valeurs numériques de E et CE dans les fonctions d'appartenance et on chosée la valeur minimale pour permettre de traduit à des valeurs linguistiques.

## **2) L'inférence**

La deuxième étape est basée sur la table d'inférence qui est utilisée pour construire les règles floues.

## **3) Diffuzification**

C'est la dernière étape dans notre qui est la conversation de les valeurs linguistiques à des valeurs numériques utilisent les centre de gravité de les fonctions d'appartenances de la sortie

#### 4.7.1 Bloc MATLAB de l'algorithme logique flou complet

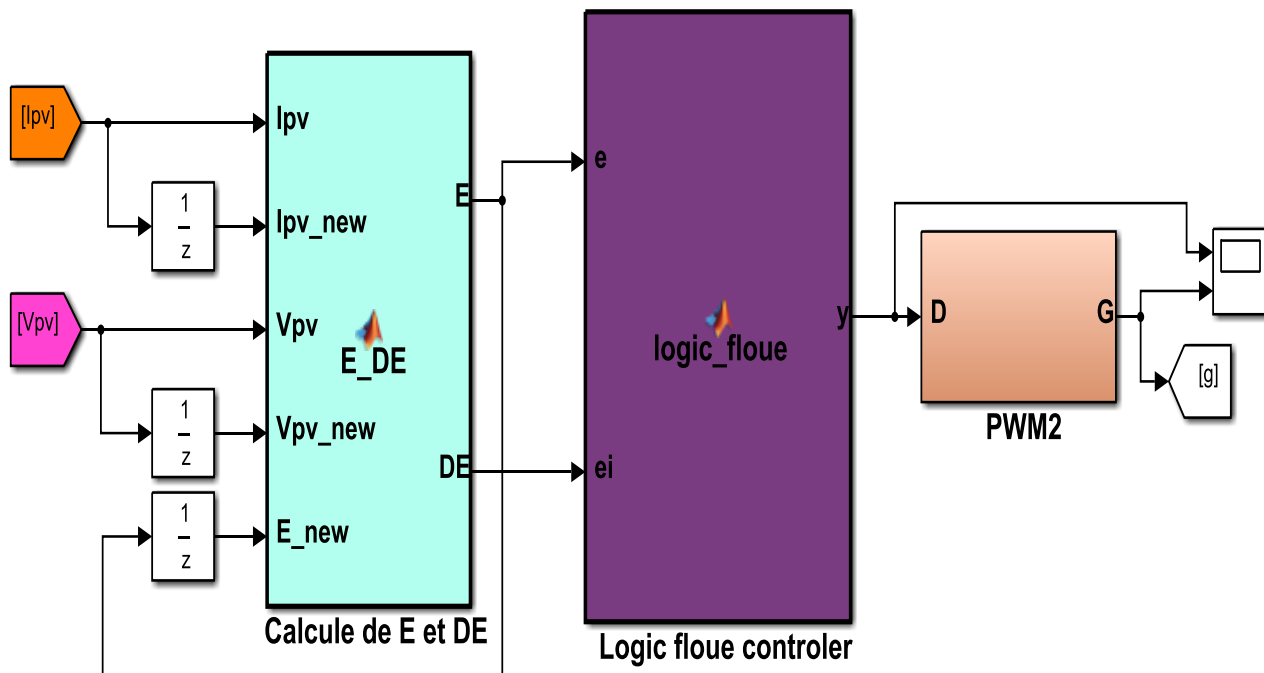


Figure 4.25. Block MATLAB de de l'algorithme et signale PWM

#### 4.7.2 Simulation de système globale (Module PV, convertisseur, MPPT, charge)

La figure 4.26 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système PV adapté par la commande MPPT « logique floue », Nous permis de tracer les graphes dans les conditions standard comme il est illustré dans les figures 4.27, 4.28 et 4.29 qui est respectivement la tension, le courant et la puissance de la sortie de panneau et sortie de Boost en fonctionne de temps, et on présent aussi la variation de la valeur de le rendement  $\eta$  fonctionne de temps sur la figure 4.30.

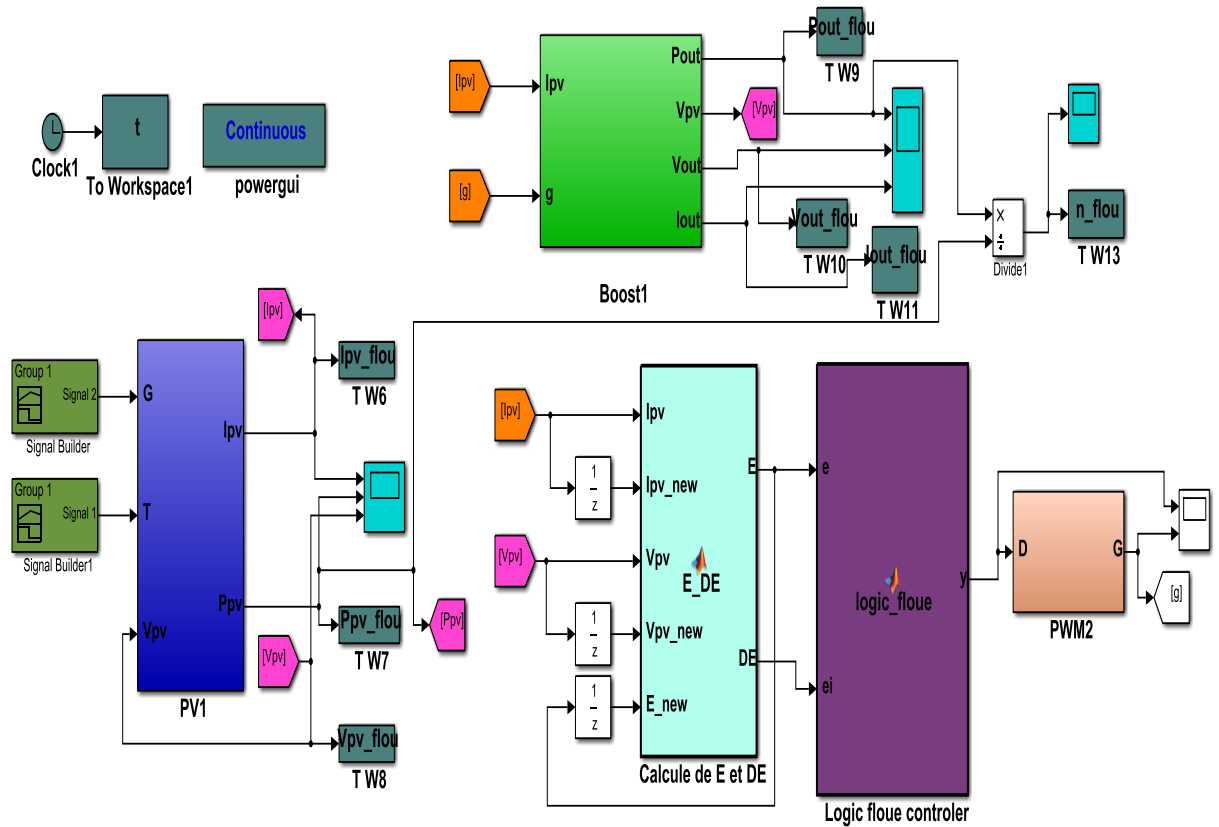


Figure 4.26. Schéma global d'un système PV avec commande MPPT logique flou

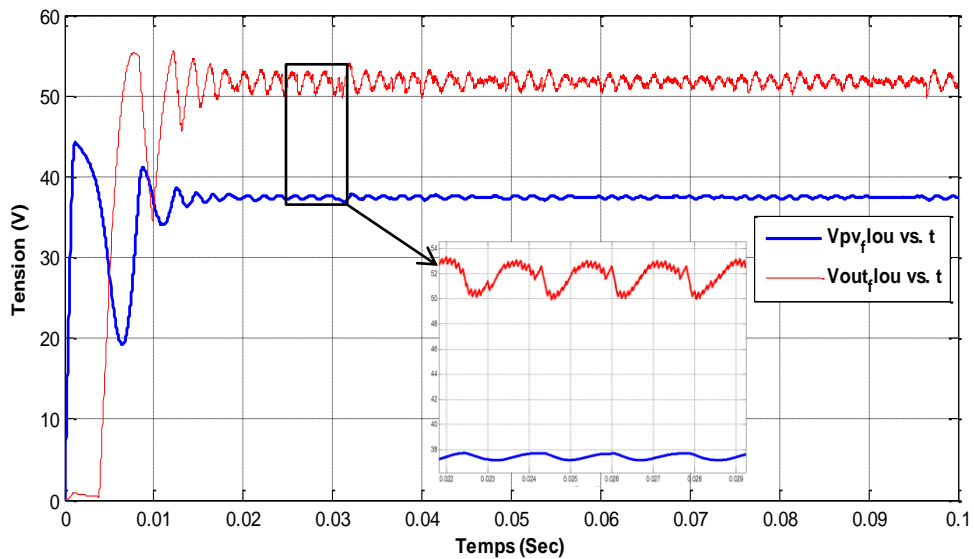
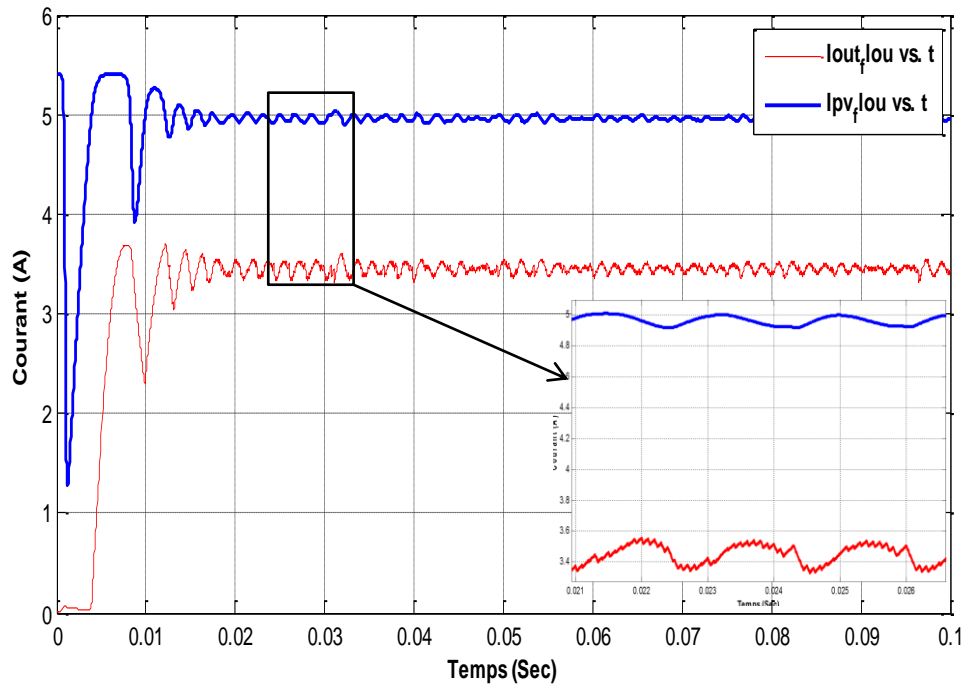
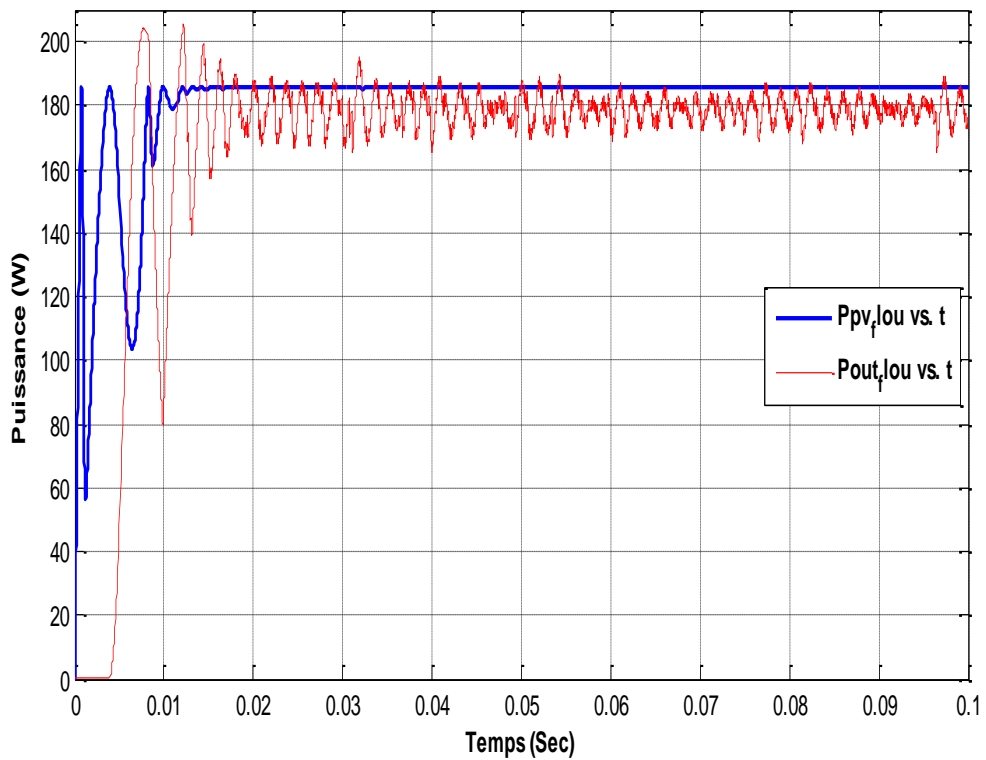


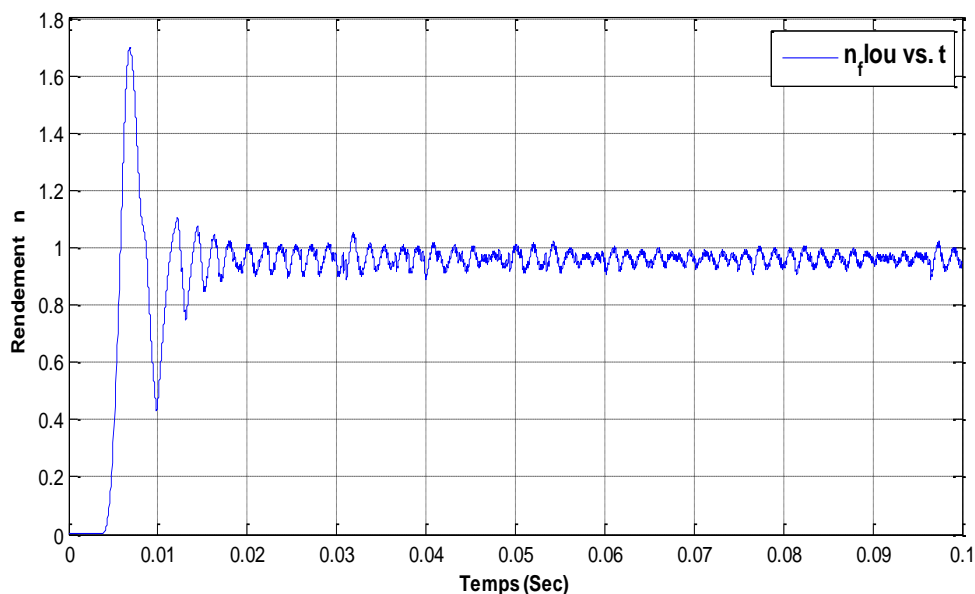
Figure 4.27. Tension sortie panneau et de Boost contrôlé par algorithme flou



**Figure 4.28.** Courant sortie panneau et de Boost contrôlé par algorithme floue



**Figure 4.29.** Courant sortie panneau et de Boost contrôlé par algorithme floue



**Figure 4.30.** Le rendement avec l’algorithme logique flou

### 4.7.3 Discussion des résultats obtenus

On remarque que le temps de montée pour les trois grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) est de valeur égale à  $t_s = 0.012s$  pour atteindre la valeur de la puissance maximale qui égale à  $P = 185\text{ W}$  et remarque que la sortie oscille autour de point de puissance maximale quand on utilise La commande floue.

La valeur de la puissance fournie par le générateur PV se stabilise à  $185\text{W}$  et celle fournie à la charge atteint une valeur de  $179\text{W}$ .

À la sortie du panneau, la tension atteint la valeur  $V_{mpp} = 36.2\text{V}$  et le courant se stabilise à la valeur  $I_{mpp} = 5.11\text{A}$ . Au niveau de la charge, la tension générée est de  $V_s = 52\text{V}$  et le courant égal à  $I_s = 3.4\text{A}$

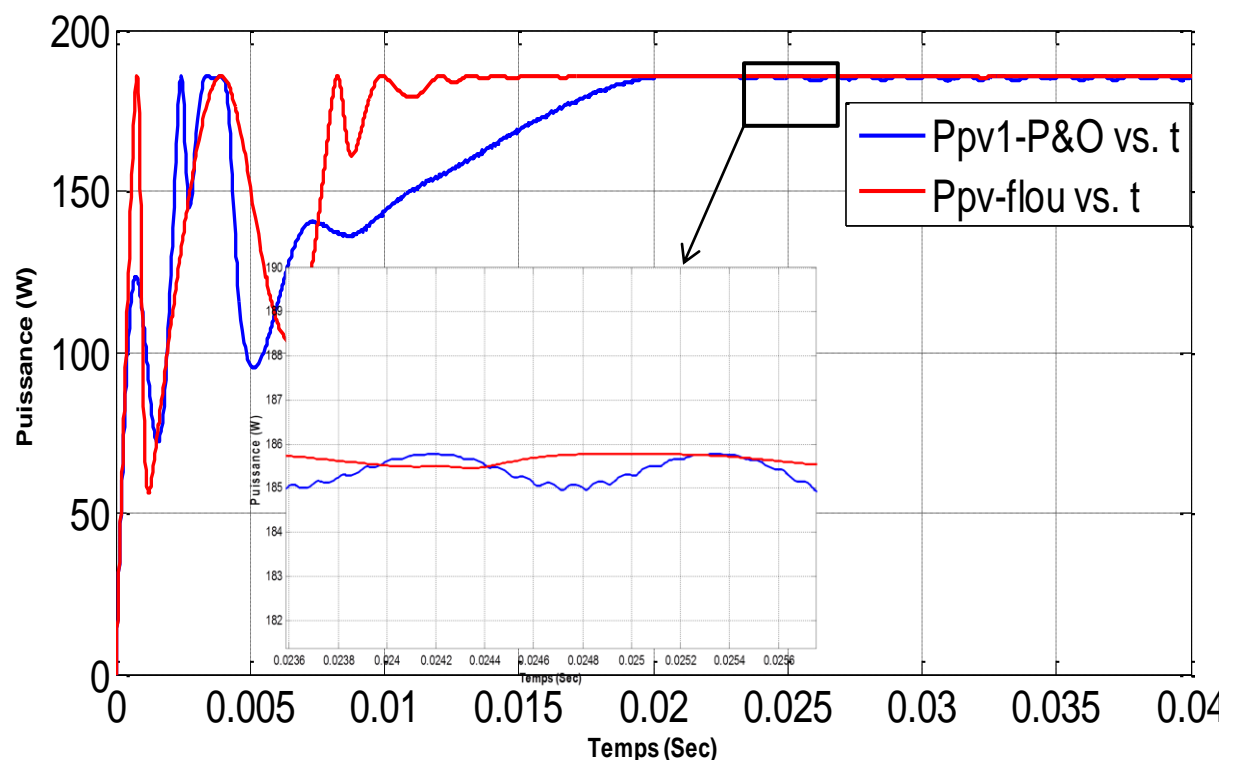
Nous notons que la différence entre la puissance de sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de  $6\text{ Watts}$ . Ces pertes causées par la commutation et par la conduction dans le transistor MOSFET et aussi dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

Le rendement dans cette algorithme est égal à  $\eta = 0.97$ .

## 4.8 Comparaison entre les commandes (P&O et la logique floue)

### 4.8.1 Comparaison dans les conditions standard ( $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{w/m}^2$ )

Pour faire une comparaison entre les deux commandes, nous avons pris des mesures de la puissance du module PV pour les deux commandes. La figure 4.31 montre le temps de réponse permettant d'atteindre les valeurs de puissance maximale



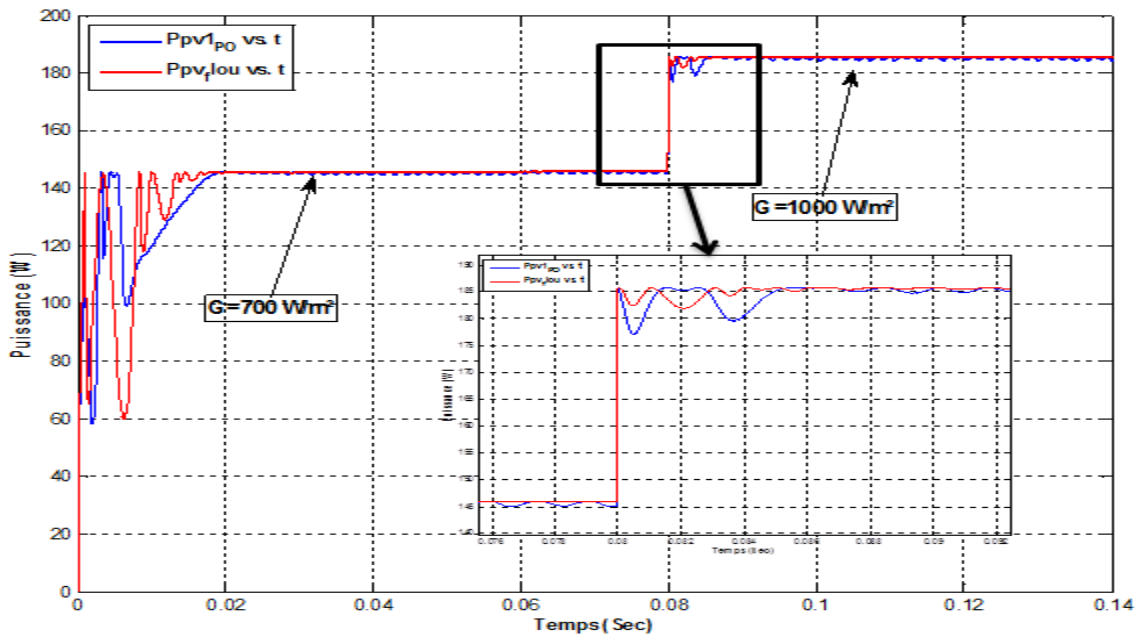
**Figure 4.31.** Puissance fournie à la sortie de panneau avec les deux commandes P&O) et logique floue.

#### *a Discussion des résultats obtenus*

On remarque que le temps de montée de puissance jusqu'à la valeur  $P_{\text{max}}$  est différent pour les deux commandes, pour P&O de valeur égale à  $t_s = 0.021\text{s}$  et une valeur de  $P_{\text{MAX}} = 184.5\text{W}$  et par contre la commande floue est repend plus rapide  $t_s = 0.012\text{s}$  et une valeur de  $P_{\text{MAX}} = 185$  et plus stable dans le régime permanent.

## 4.8.2 Comparaison entre les commandes (P&O et la logique floue) avec une variation d'ensoleillement

Une comparaison entre les deux commande P&O et floue avec une variation d'ensoleillement de  $700 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  est présenter dans la figure 4.32 est donne les résultats suivant :



**Figure 4.32.** Puissance en fonction de temps sous d'ensoleillement de  $700 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  pour les deux algorithmes

### a Discussion des résultats obtenus

$700 \text{ W/m}^2$  : La puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur  $145 \text{ W}$  en un temps de  $0.019 \text{ s}$  pour la commande P&O et  $0.18 \text{ s}$  pour la commande floue, une fois cette valeur atteinte le processus de suivi du PPM oscille autour de cette valeur. (Voir figure 4.32)

$1000 \text{ W/m}^2$  : La puissance passe de la valeur de  $145 \text{ W}$  à  $185 \text{ W}$  en un temps négligeable mais la puissance qui contrôlée par la commande floue est stabilisée plus rapide que ceux contrôlée par la commande P&O, (Voir figure 4.32).

Dans les deux cas d'ensoleillement de  $700 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  on constate que la puissance obtenue avec l'algorithme logique floue est légèrement plus élevée comparer à celle obtenue avec l'algorithme P&O.

## 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation d'un système PV avec et sans étage d'adaptation, et on a proposés deux commandes pour la recherche et la suivre de point de puissance maximale la premier est la commande Pertub and observe (perturbation et observation), et le deuxième est le contrôleur flou de type MAMDANI. Et à la fin on a fait une comparaison entre les deux.

Les résultats obtenues avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle perturbation et observation. Ainsi le contrôle par logique flou. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur a l'état permanent très faible, et qu'il est fonctionné aux différentes variations des conditions atmosphériques.



## Conclusion générale

---

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'Uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittente selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients. Ce travail s'agit d'une contribution à l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque.

Les travaux présentés concernent plus particulièrement la problématique du couplage entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du générateur photovoltaïque à la charge qui est souvent très loin des possibilités du générateur.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avère nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement MATLAB/SIMULINK permettant de tracer la caractéristique  $I-V$  pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé le problème de couplage, direct et indirect à travers un étage d'adaptation qui est les convertisseurs DC-DC, et on a expliqué le fonctionnement des convertisseurs DC\_DC.

Dans le troisième chapitre nous avons étudié les différentes techniques pour suivre le point de fonctionnement d'un module photovoltaïque, présentons les différentes méthodes (directes et indirectes) pour optimiser la puissance.

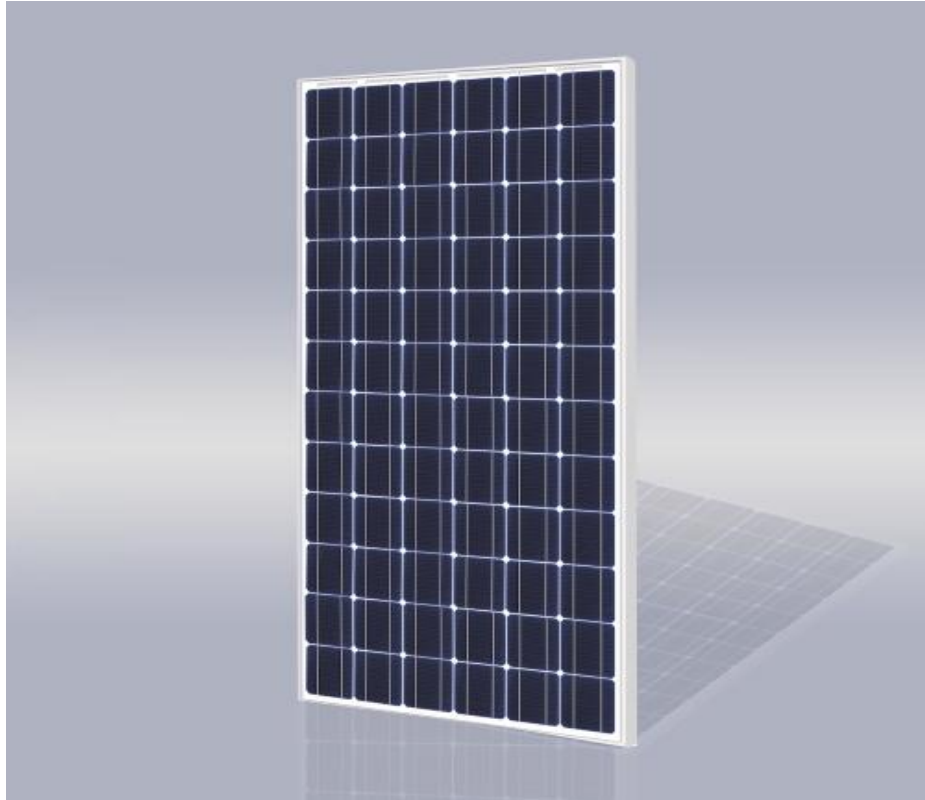
Dans le dernier chapitre, nous avons présente la simulation du panneau PV et le dimensionnement des différents paramètres du hacheur élévateur utilisé, le système étudié et les résultats de la simulation sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK) de l'ensemble générateur photovoltaïque– hacheur élévateur– charge– commande MPPT, pour un éclairage variable. Et une comparaison entre les deux techniques logique floue et (P&O).

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairage et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST)
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfère de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC BOOST et les faibles pertes de puissances fournies par ce module PV.

- Nous avons confirmé le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est fonctionné aux variations des conditions atmosphériques.

## **Annexes**



**Figure 1.** Risen Energy SYP185S-M 185 Watt Solar Panel Module

Désignation	SYP185S-M
Type de cellule	Monocristallin
Rendement Nominal	185Wp
Tension nominale (V)	36,2
Intensité nominale (A)	5,11
Tension à vide (V)	45
Intensité de court circuit (A)	5,4
Dimensions des cellules	125x125
Dimensions du panneau	1580x808x35mm
Nom du panneau	RISEN
Tension maximale	1000 V courant continu
Coefficient de température Isc (%)	+ 0.1/ °C
Coefficient de température Voc (%)	-0.38/ °C
Coefficient de température Pm (%)	-0.47/ °C
Coefficient de température Im (%)	+0.1/ °C
Coefficient de température Vm (%)	-0.38/ °C
Variation de température	-40°C ~ +85°C
Capacité maximale de charge	60m/s(200kg/sq.m)
Poids	15 kgs
Type de boîte de jonction	Boîte de jonction avec certification TÜV
Longueur de Câbles (mm)	900mm
Efficacité Cellulaire (%)	> 17.3%
Efficacité Module (%)	> 14.49%
Tolérance de Production (%)	+ 3%
Matière	Aluminium
Conditions Standard de Test	AM 1.5, 1000W/m2, 25°C
Garantie	Ce module est garanti pour fournir un minimum de 90% de sa puissance nominale pendant les 10 premières années, et un minimum de 80% pendant les 25 premières années. La garantie matérielle est de 5 ans.
FF (%)	76 %

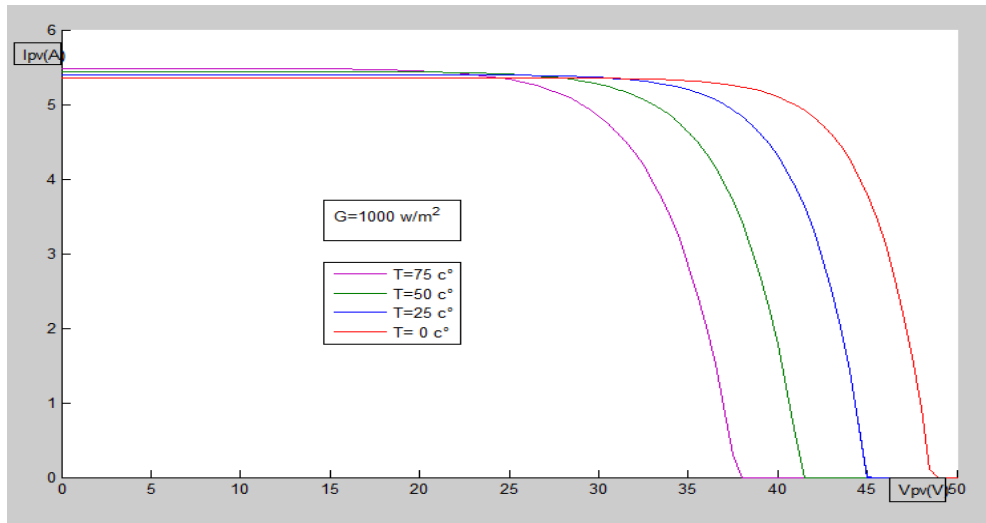
Figure 2. Datasheet de notre module PV

### Influence de la température sur notre module PV

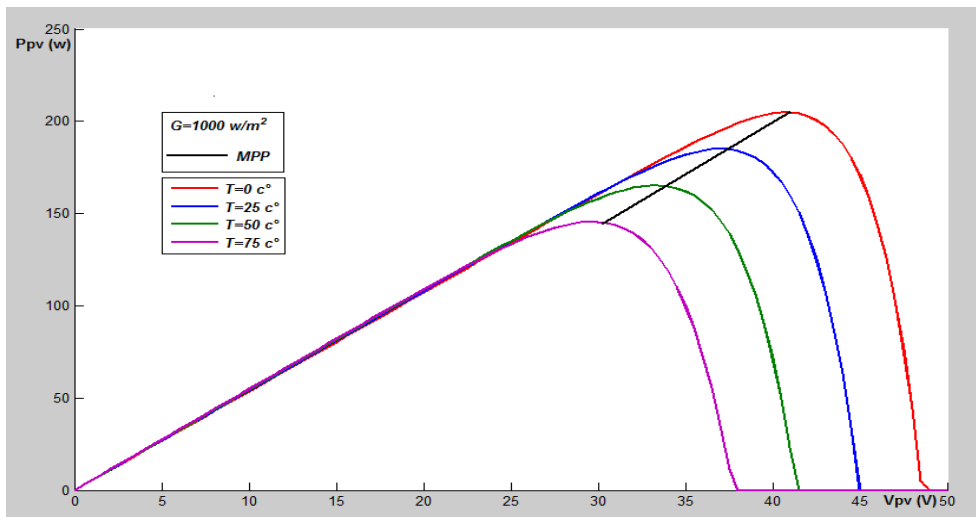
L'équation de Boltzmann donne:  $I_{sc} = I_o \cdot \exp\left(q \cdot \frac{V_o}{KT}\right)$ , l'expérience montre que la tension de circuit-ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [14].

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques ( $I-V$ ) et ( $P-V$ ) Figure (3 et 4) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures : Pour la figure (3), nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit-ouvert diminue. Et

par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (4).



**Figure 3.** La caractéristique de  $I=f(V)$  en fonction de température



**Figure 4.** La caractéristique de  $P= f(V)$  en fonction de température

### Influence de l'éclairement sur notre module PV

En fixant la température pour différents éclairagements figure 5 et 6, on remarque pour la figure 5 que pour l'éclairement de  $1000 \text{ w/m}^2$  et un courant  $I_{cc}=5.4\text{A}$ , et pour  $G=800\text{w/m}^2$  avec un courant  $I_{cc} = 4.3\text{A}$ , on peut voir que le courant subit une variation importante. L'éclairement augmente le courant de court-circuit, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure 6.

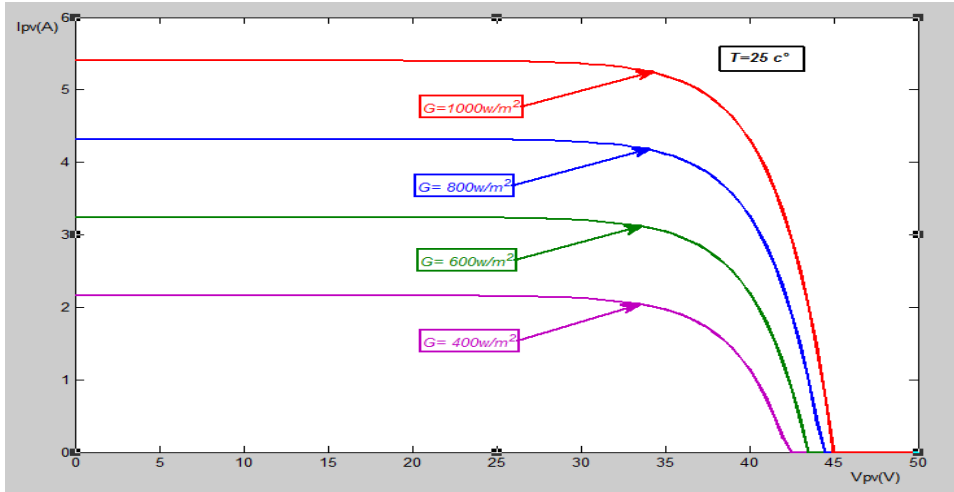


Figure 5. La caractéristique  $I=f(v)$  en fonction de l'éclairement

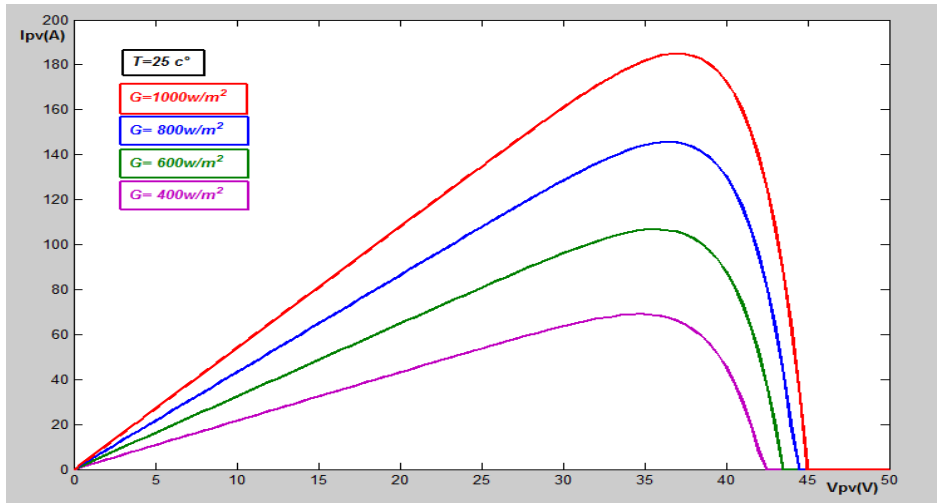
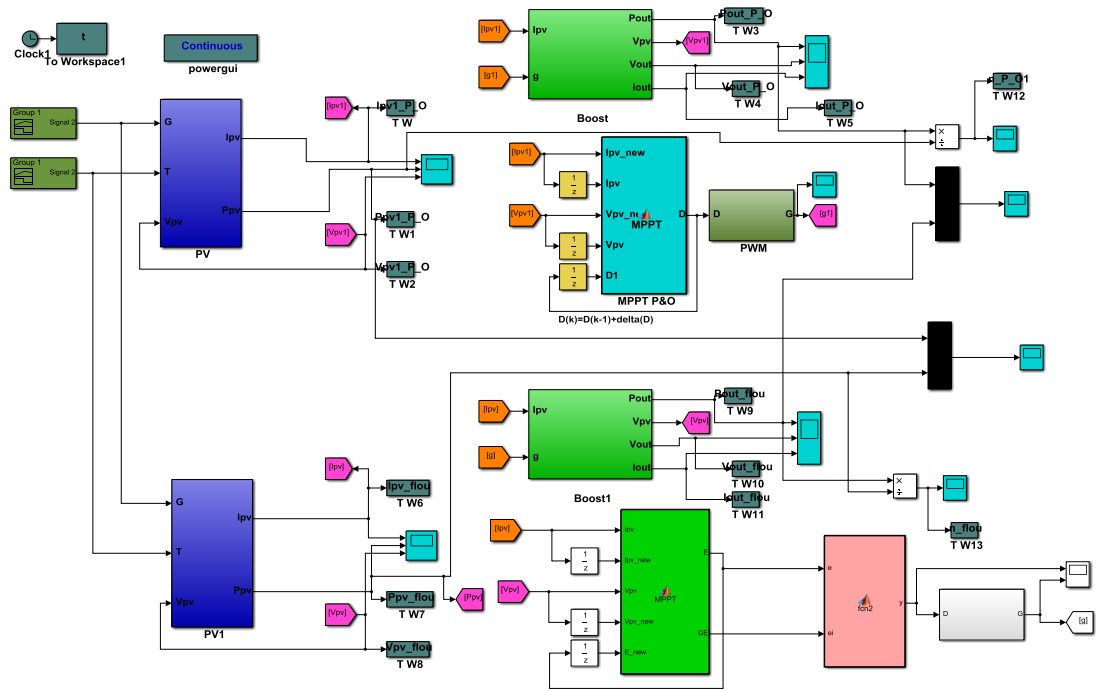


Figure 6. La caractéristique  $P=f(v)$  en fonction de l'éclairement



**Figure 7.** Bloc Matlab de schéma globale de comparaison entre la commande P&O et Floué



## Bibliographies

---

- [1] Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy - The history of solar - U.S.A., 2001
- [2] NECHE Kamel, Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER, 11, Juin 2008.
- [3] R. Lakehal « Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres » mémoire de master université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [4] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale.
- [5] Maouedj Rachid, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister, 2005.
- [6] BELKAID ABDELHAKIM, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome, thèse de doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1 UFAS (ALGERIE).
- [7] R. Andoulsi, "étude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph modélisation, analyse et commande ", Thèse de doctorat université des sciences et technologies de Lille, 2001.
- [8] F. Lasnier, T. G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.

- [9] M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Algérie, 2008.
- [10] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale.
- [11] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, Réf D3360 – Vol DAB, <http://ti.idm.fr>.
- [12] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », université de Toulouse, 2009.
- [13] L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [14] Z. Bendjellouli « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de magister université de bachar, 2009.
- [15] Sabri Nassim, Benkercha Rabah, Diagnostic et Détection des pannes dans le système photovoltaïque par les techniques intelligentes, Mémoire de Projet de Fin d'Études, Université SAAD DAHLAB 1 de BLIDA, 2013.
- [16] Cédric CABAL, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la Conversion photovoltaïque, université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.
- [17] Christian BISSIERES, « Conversion statiques des énergies, Physique Appliquée », <http://www.cbissprof.free.fr>.
- [18] Philippe LETENNEUR, « Les alimentations électrique », 2003-2004.
- [19] Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons Ltd, 2003.

- [20] W.Xiao, « A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems», université de Columbia, 2003.
- [21]. Mr. BELKACEM Mourad, " Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT).", Mémoire de master UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID, TLEMCEM, Algérie, 2015
- [22] H. Bin, " Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible", Thèse Doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, France, 2009.
- [23] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.
- [24] A\_Mohamed, Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, Thèse DOCTORAT.UNIVERSITE CONSTANTINE 1.
- [25] J.B.R. Enslin, M.S. Wolf, D.B. Snyman, W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44 (6), Dec. 1997, pp.769 -773.
- [26] T. Noguchi, S. Togachi, R. Nakamoto, "Short-current pulse-based maximum-powerpoint tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system", IEEE Trans on Industrial Electronics, vol. 49, Feb. 2002, pp. 217-223
- [27] A. F. Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, pp. 102-111
- [28] C. CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 2008
- [29] H. Al-Atrash, I. Batarseh, K. Rustom, "Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments", *Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC 2005*, vol. 3, pp. 1773–1777.

- [30] W. Xiao, W. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems", *IEEE 35th annual Conference in Power electronics specialists, PESC 04*. 2004, vol. 3, pp. 1957–1963.
- [31] T. Tafticht, "Analyse Et Commande D'un Système Hybride Photovoltaïque Eolien", Thèse de Doctorat de L'université Du Québec A Trois-Rivières (Canada), décembre 2006.
- [32] W. Perruquetti and J. P. Barbot, "*Sliding mode control in engineering*", Marcekdijker, Ed. New York, USA, 2002.
- [33] Algazar Mohamed M, AL-monier Hamdy, EL-halim Hamdy Abd, Salem Mohamed Ezzat El Kotb, "Maximum power point tracking using fuzzy logic control", *Electr Power Energy Syst*, vol. 39, 2012, pp. 21–28.
- [34] N. Ould Cherchali, A. Morsli, M. S. Boucherit, L.Barazane, A. Tlemçani\_Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque\_ Université de Médéa Algérie.
- [35] N. Pandiarajan, Ranganath MuthuMathematical\_Modeling of Photovoltaic Module with Simulink\_ Kalavakkam -603110, TamilNadu, India\_ 3-5 Jan 2011 .
- [36] Abou soufyane BENYOUCEF\_ THESE DE DOCTORAT\_CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF REAL-TIME CONTROL OF PHOTOVOLTAIC GRID CONNECTED INVERTER\_Blida, Le 16 décembre 2015.
- [37] R. Boukenoui, Mellit \_A new intelligent MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under fast transient variations of shading patterns\_Blida, 2016.