

**République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

**Université Ahmed Draia Adrar  
Faculté Des Sciences et de Technologies  
Département Des Sciences et Technologie**



**Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme:  
Master En Electrotechnique  
Option : Commande Electrique**

## **THEME**

**Contribution et L'étude de la commande adéquate  
d'un système photovoltaïque**

**Présenté Par :**

**« HARI ABDESSADEK**

**« MOKADEM MABROUK**

**Dr. GUENFOUD MED**

**Président**

**MCB**

**Dr. YAICHI**

**Examineur**

**MCA**

**Dr. BARBAOUI IBRAHIM**

**Encadreur**

**MCA**

**Année Universitaire 2021-2022**

## Remerciement

Après les salutations et la paix, tous les remerciements et la louange à Dieu seul et aucun partenaire n'a la grâce et la louange. Et de la part de ceux qui ne remercient pas les gens de ne pas remercier Dieu, je tiens d'abord à remercier ceux qui ont préféré les honorables parents, que Dieu les garde, ainsi qu'à tous ceux qui se tiennent à mes côtés dans cette vie, en particulier la chère épouse, ses frères et sœurs ... et à tous les professeurs distingués et bons collègues. Je voudrais également remercier le professeur estimé IBRAHIM pour toutes les informations et instructions Et les Membres du jury ,pour leur présence et leurs gentillesse et tous les professeurs qui nous aident à accomplir ce travail.

# Sommaire

Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des symboles	
Liste des abréviations	
Introduction Générale .....	03

## **Chapitre I:**

### **Etat de l'art des énergies renouvelables.**

<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>L'énergie hydraulique .....</b>	<b>6</b>
<b>Fonctionnement d'une centrale hydraulique.....</b>	<b>6</b>
<b>L'énergie de la Géothermie .....</b>	<b>7</b>
<b>Principe de Fonctionnement de la Géothermie .....</b>	<b>8</b>
<b>L'énergie de la Biomasse .....</b>	<b>8</b>
<b>Principe de Fonctionnement.....</b>	<b>9</b>
<b>L'énergie de la Marine .....</b>	<b>9</b>
<b>Principe de Fonctionnement d'une centrale hydrolienne .....</b>	<b>9</b>
<b>L'énergie éolienne.....</b>	<b>10</b>
<b>Principe du fonctionnement .....</b>	<b>10</b>
<b>L'énergie solaire .....</b>	<b>11</b>
<b>Fonctionnement d'une installation solaire.....</b>	<b>11</b>
<b>L'effet photovoltaïque .....</b>	<b>12</b>

## **Chapitre II**

### **Modélisation D'un System Photovoltaïques**

<b>II .1. Introduction .....</b>	<b>15</b>
<b>Générateur Photovoltaïque GPV .....</b>	<b>15</b>
<b>Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque .....</b>	<b>16</b>
<b>Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque .....</b>	<b>22</b>
<b>Groupement de Cellules Photovoltaïques.....</b>	<b>23</b>
<b>Association De Cellules Photovoltaïques En Série .....</b>	<b>23</b>
<b>Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....</b>	<b>23</b>
<b>Protections D'un Générateur .....</b>	<b>24</b>
<b>Modélisation D'un GPV .....</b>	<b>25</b>
<b>Caractéristique D'un Générateur PV .....</b>	<b>26</b>
<b>Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV.....</b>	<b>26</b>

<b>Influence De L'ensoleillement .....</b>	<b>27</b>
<b>Influence de la température .....</b>	<b>28</b>
<b>Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV .....</b>	<b>29</b>
<b>Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge.....</b>	<b>30</b>
<b>Convertisseur DC/DC.....</b>	<b>30</b>
<b>Étage d'Adaptation de Type BOOST .....</b>	<b>32</b>
<b>Modèle mathématique équivalent.....</b>	<b>32</b>
<b>Modèle approximé du convertisseur Boost.....</b>	<b>33</b>
<b>Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT).....</b>	<b>34</b>
<b>.CONCLUSION.....</b>	<b>35</b>

### **Chapitre III :**

#### **Technique de commande de MPPT**

<b>Introductio.....</b>	<b>36</b>
<b>Généralité.....</b>	<b>37</b>
<b>Définition et principe de la recherche.....</b>	<b>37</b>
<b>Les premiers types de commande MPPT .....</b>	<b>38</b>
<b>Evolution du point d'opération du GPV .....</b>	<b>39</b>
<b>Différents types de commandes MPPT .....</b>	<b>41</b>
<b>Les différents algorithmes de contrôle MPPT.....</b>	<b>42</b>
<b>Méthode de perturbation et observation (P&amp;O) .....</b>	<b>42</b>
<b>Algorithme d'incrémentation de l'inductance.....</b>	<b>44</b>
<b>Commande avec correcteur PI .....</b>	<b>45</b>
<b>Simulation des méthodes MPPT .....</b>	<b>45</b>
<b>Interprétation des résultats de simulation .....</b>	<b>45</b>

### **Chapitre IV**

#### **Simulation, résultat et discussions**

<b>Introduction .....</b>	<b>51</b>
<b>Simulation du système photovoltaïque .....</b>	<b>51</b>
Simulation d'un GPV .....	52
Simulation du MPPT flou .....	53
<b>Résultats et discussions.....</b>	<b>55</b>
Conclusion .....	56
Conclusion générale.....	58

# Liste des symboles

$\varphi$  : latitude

P : puissance[w]

$\alpha$  : Rapport cyclique.

$I_{RP}$  : Courant circulant dans la résistance  $RP$ .

$R_P$ : Résistance shunt de la cellule PV.

$R_S$  : Résistance série de la cellule PV.

$I_{PV}/I_{cell}$  : Courant généré par la cellule (générateur) photovoltaïque.

$V_{PV}/V_{cell}$  : tension généré par la cellule (générateur) photovoltaïque.

$I_{PH}$  : Courant de la cellule PV (Photo-Courant).

$I_D$  : Courant circulant dans la diode.

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode.

D : diode

$V_{th}$ : Tension thermique

q : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

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

n : facteur de non idéalité de la jonction

T : température effective de la cellule en Kelvin  
STC : Standard Test Conditions

G : Éclairement absorbé par la cellule.

$T_a$  : Température ambiante

$T^C$  : Température de fonctionnement de la cellule  
 $I_{sc}$  : le courant de court-circuit

$V_{oc}$  : la tension de circuit ouvert

$V_g$  : Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev].

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].

$V_{CO}$  : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

$k_0$  : coefficient de température de  $I_{ph}$

$k_3$  : coefficient de température de la résistance série.

$I_{CS}$  : courant de cellules en série.

$V_{CS}$  : tension de cellules en série.

$N_S$  : Nombre de cellules en série.

$N_P$ : Nombre de cellules en parallèle.  $I_{CP}$ : courant de cellules en parallèle.

$V_{CP}$  : tension de cellules en parallèle.

$I_C$  : courant d'une seule cellule

$V_C$  : tension d'une seule cellule

$P_{MAX}$  : Puissance maximale

$S$  : le transistor de convertisseur statique

$L$  : l'inductance de filtre de convertisseur statique

$I_L$  : Courant moyen passant à travers l'inductance

$R_L$  : Résistance de filtre.

$V_{PPM}/V_{OPT}$  : Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

$I_{PPM}/I_{OPT}$  : Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

$k_1$  : est une constante de proportionnalité

$V_{ref}$  : tension de référence

$I_{ref}$  : courant de référence

$k_2$  : constante de proportionnalité  $E$  : L'erreur

$\Delta E$  : changement d'erreur

## Notations

$W_c$  : watt-crête Labo : Laboratoire

PV : Photovoltaïque.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'.

GPV Générateur Photovoltaïque.

NOCT : Nominal Operating Cell Temperature

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu. CS : convertisseur statique

PPM : Point de Puissance Maximale.

IncCond : Incremental Conductance (Conductance Incrémentale).

CV : Constant Voltage

P&O :Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

PI : Proportionnel Integral

DSP: digital signal processor

MOSFET : Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

IGBT : insulated-gate bipolar transistor

# ***Introduction générale***



# Introduction générale

---

## Introduction

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon... etc), la demande énergétique sans cesse croissante et voua augmenté , la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées dan le monde . Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Cette dernière a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique on générale est le spécialité de l'électronique de puissance spécifiquement. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT.

Donne Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le, l'énergie renouvelables (Eolien. Solaire. Biomasse.....), l'énergie photovoltaïque bien sûr et quel que

# Introduction générale

---

information sur le potentiel algérien et le future d'énergie photovoltaïque dans Algérie ;

- Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le GPV et le convertisseur statique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT;
- Le troisième chapitre, présentera le principe de la commande du système PV (commande MPPT.-PO-) et des études théoriques de ces méthodes;
- Le quatrième chapitre, résultats Et discussions.
- Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

# Introduction

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon... etc), la demande énergétique sans cesse croissante et voua augmenté , la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées dan le monde . Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Cette dernière a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique on générale est le spécialité de l'électronique de puissance spécifiquement. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT.

Donne Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le, l'énergie renouvelables (Eolien. Solaire. Biomasse.....), l'énergie photovoltaïque bien sûr et quel que information sur le potentiel algérien etle future d'énergie photovoltaïque dans Algérie ;

- Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque intégrantle GPV et le convertisseur statistique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT;
- Le troisième chapitre, présentera le principe de la commande du system PV(commande MPPT.-PO-)et des études théoriques de ces méthodes;
- Le quatrième chapitre, résultats Et discussions.
- Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art des énergies renouvelables**

## **Introduction**

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites.

Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables.

### **L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité) [5].

### **Fonctionnement d'une centrale hydraulique**

Le fonctionnement d'une centrale hydraulique ou barrage consiste à utiliser l'énergie donnée par une quantité d'eau en mouvement pour pouvoir produire de l'énergie électrique.

Un barrage est donc utilisé pour retenir une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue. Quand on veut produire de l'électricité, on ouvre les vannes du barrage, l'eau rentre par ces vannes et passe par une conduite dans le barrage qui va lui

permettre d'augmenter sa vitesse. Après cette conduite, l'eau, grâce à cette vitesse va faire tourner une turbine qui est reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend son cours normal [6].

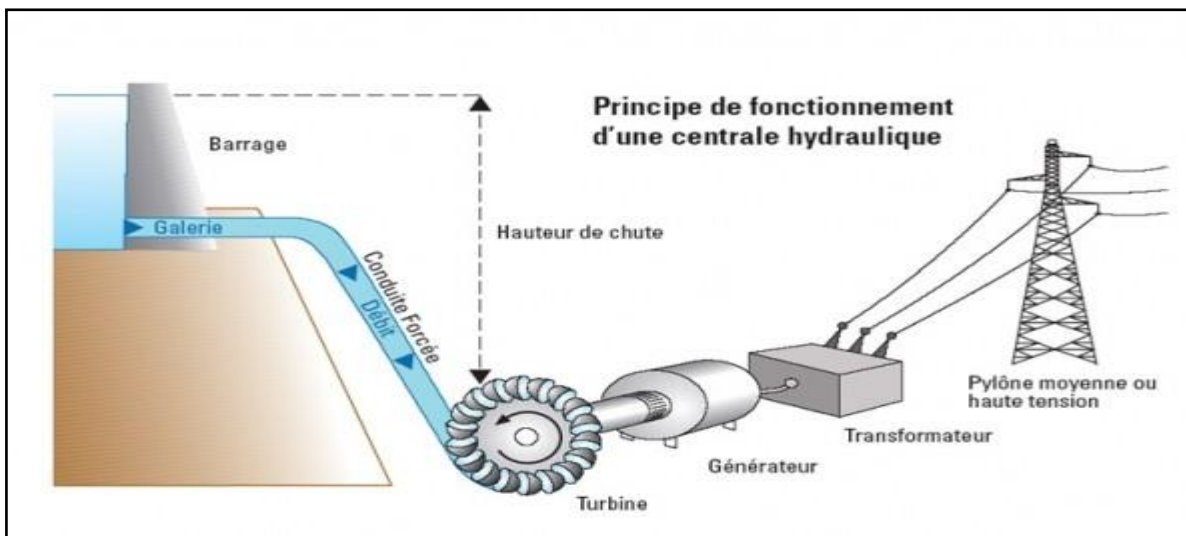


Fig1.1 : centrale hydraulique.

## L'énergie de la Géothermie

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple : en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

L'augmentation de la consommation et du coût des différentes énergies ainsi qu'une certaine volonté d'émettre moins de gaz à effet de serre la rendent plus attrayante. En 2007, en France le BRGM et l'Ademe ont créé un département géothermie pour la promouvoir, après s'être associés à différents programmes de recherche et de travaux de service public.

Deux de leurs filiales, CFG Services (services et ingénierie spécialisée) et Géothermie bouillante (qui exploite la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe), sont impliquées dans la géothermie[9].

## Principe de Fonctionnement de la Géothermie

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur [10].

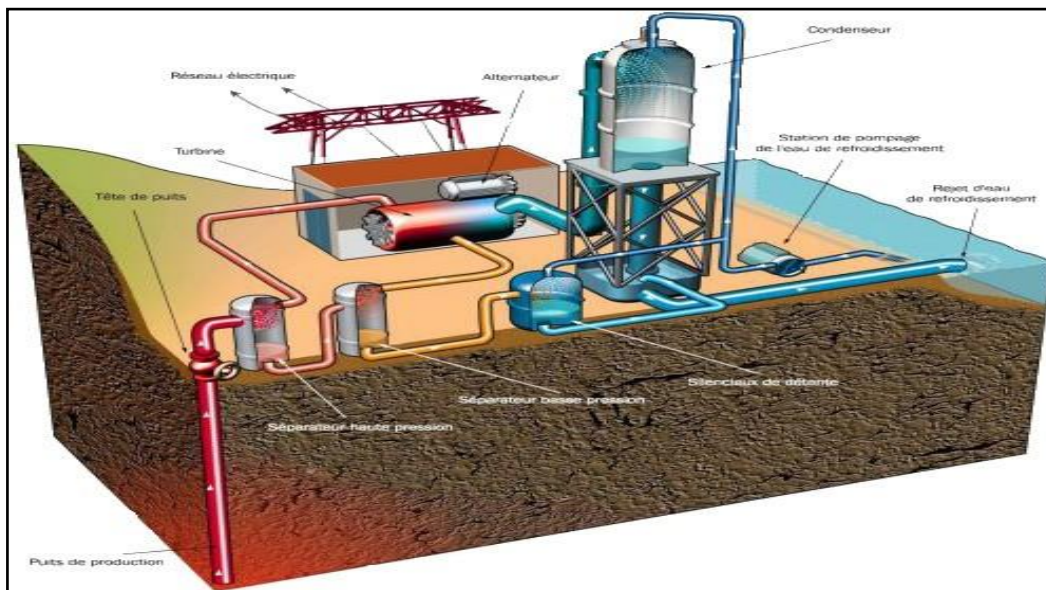


Fig1.2 : Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante (Guadeloupe) (© geothermie-perspectives.fr (ADEME/BRGM)).

## L'énergie de la Biomasse

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agro-carburant).

L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource, mise en péril de la fertilité du sol et tant qu'il n'y a pas de compétition excessive pour l'usage des ressources (terres arables, eau, etc), ni d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc. De plus, bien que présentant de nombreux avantages sur le plan écologique et du développement local, elle peut être polluante (CO, CO<sub>2</sub>, fumées, goudrons) si mal utilisée ou si la biomasse utilisée est



polluée par des métaux lourds, radionucléides, etc. (sachant que les ressources fossiles sont également naturellement contaminées par des métaux, souvent plus que le bois) [20].

### Principe de Fonctionnement

Le fonctionnement d'une centrale biomasse classique, l'énergie de la biomasse est transformée en énergie thermique par combustion. Cette énergie transforme de l'eau en vapeur, qui actionne ensuite une turbine à vapeur accouplée à un alternateur, qui transforme enfin l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de la vapeur ou énergie thermique restante peut être utilisée, par exemple, pour alimenter un circuit de chauffage. Il s'agit alors de cogénération [21].

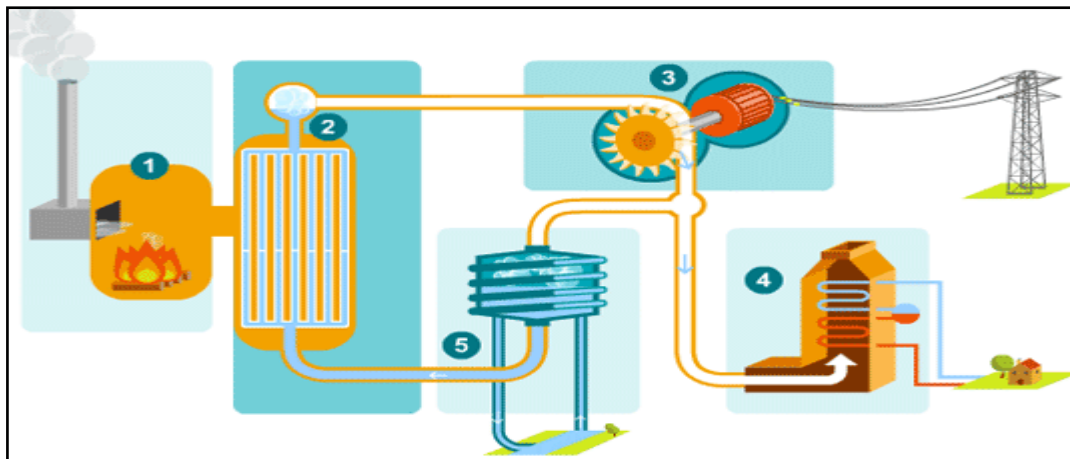


Fig1.3 : centrale biomasse.

### L'énergie de la Marine

L'énergie marine est une source d'énergie renouvelable qui dépend des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elle permet de fabriquer de l'électricité, essentiellement grâce aux mouvements de ces eaux.

L'eau recouvre en grande partie notre planète, principalement à travers les mers et les océans. Elle constitue donc une source d'énergie importante, aujourd'hui encore peu exploitée.

Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde [9].

### Principe de Fonctionnement d'une centrale hydrolienne

L'hydrolienne est une turbine hydraulique, qui utilise l'énergie des courants marins comme une éolienne utilise l'énergie du vent. La turbine de l'hydrolienne permet la

Transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur [10].

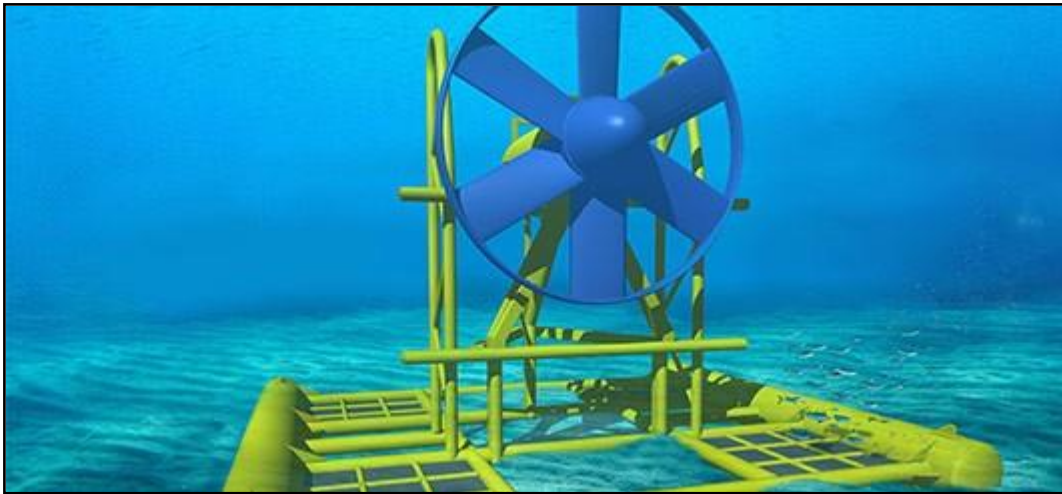


Fig1.4 : centrale hydrolienne.

## **L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [20].

### **Principe du fonctionnement**

La rotation des pales : sous l'effet du vent, L'hélice se mette en marche.

La production d'électricité : l'hélice entraîne un axe dans la nacelle, relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.

L'adaptation de la tension : un transformateur situé à l'intérieur du mât élevé la tension du courant électrique produit par l'alternateur [K].

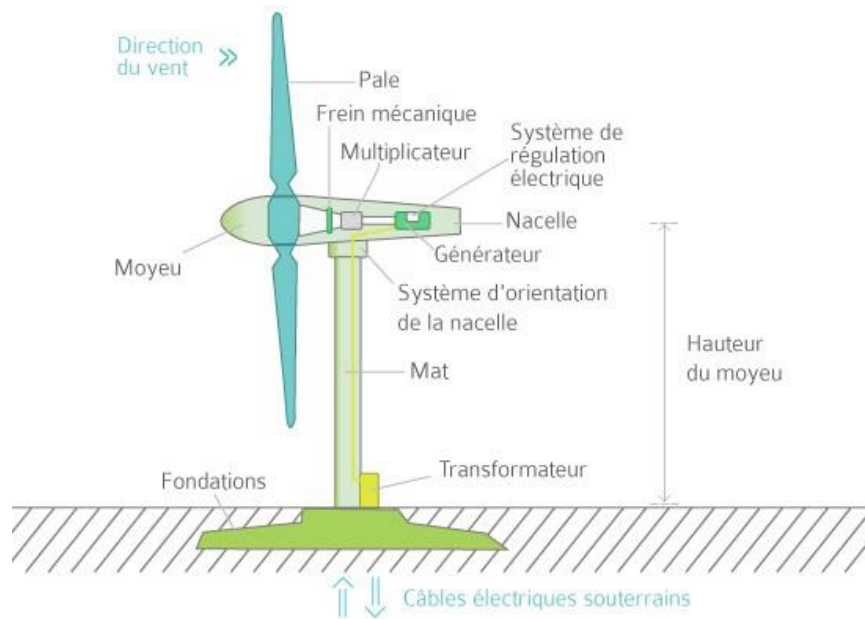


Fig1.5 :Une Eolienne.

## L'énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM) [2]. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$  [4].

## Fonctionnement d'une installation solaire

3 éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires, un onduleur et un compteur. Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le

soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau.

- Intégrés au toit, les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.
- Le compteur mesure la quantité de courant injectée dans le réseau [20].

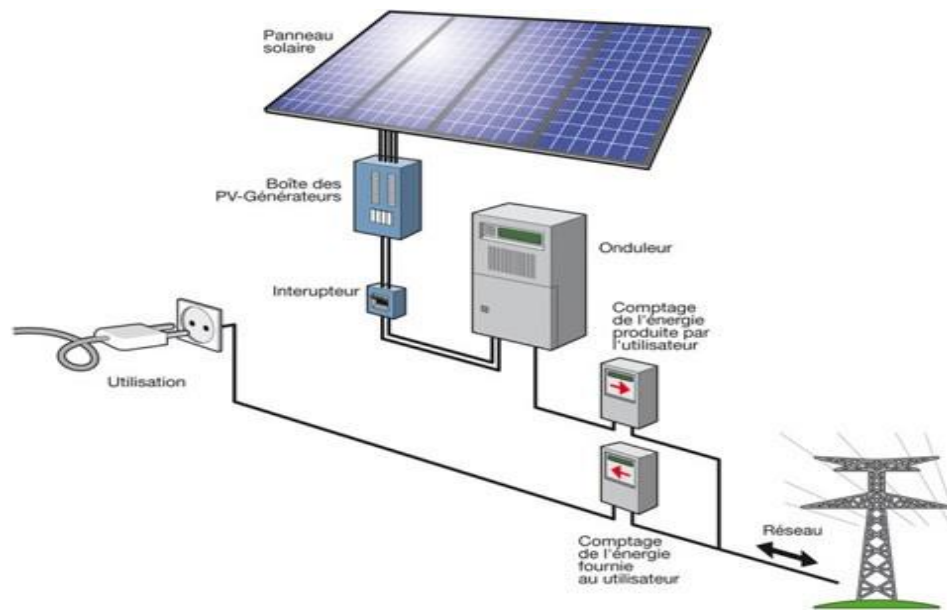


Fig1.6 : une installation solaire.

## L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque vient du Grec « phos, photos » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Ce terme est associé à la production d'une tension à partir de la lumière ; on s'y réfère souvent par l'abréviation « PV ». Un terme plus courant pour les cellules photovoltaïques est « piles solaires » malgré que celles-ci fonctionnent à partir de n'importe quelle source de lumière, et non uniquement celle du soleil. Donc ce phénomène consiste à établir une force électromotrice (énergie électrique de type continu directement utilisable) lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. [4].

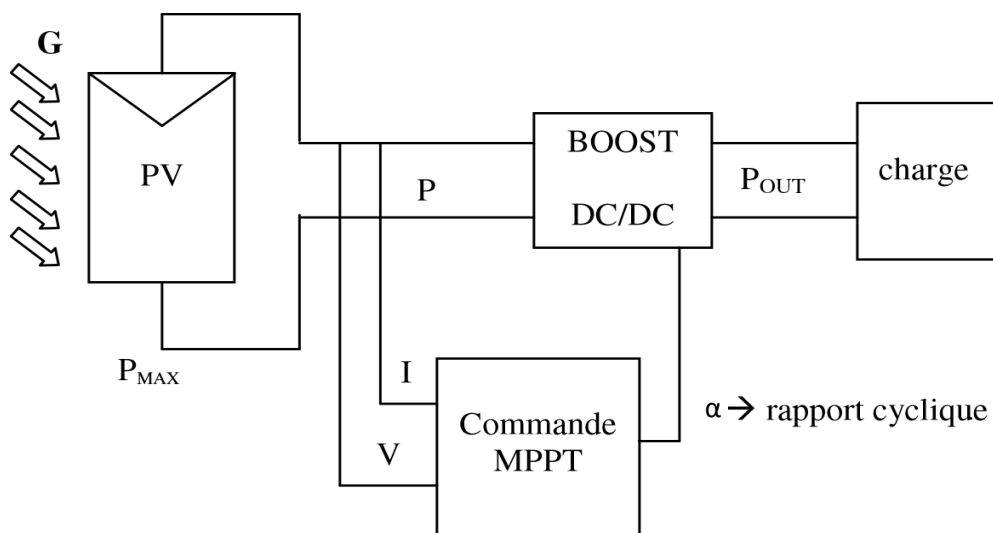


# **Chapitre II**

## **Modélisation D'un System Photovoltaïques**

## Introduction

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs éléments interconnectés destinés à réaliser une tâche bien déterminée, qui peut être fournir de l'électricité au réseau public de distribution, pomper de l'eau d'un puits, alimenter une petite calculatrice ou l'une des nombreuses utilisations possibles de l'électricité solaire .il est généralement constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur, d'une batterie, d'un récepteur « courant continu » et d'un onduleur si il existe un récepteur « courant alternatif ». La figure suivante décrit le système qui nous sera utilisé dans notretravail



**Figure II.1** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

## Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure II.2). Les modules PV sont habituellement branchés en série- parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [18].

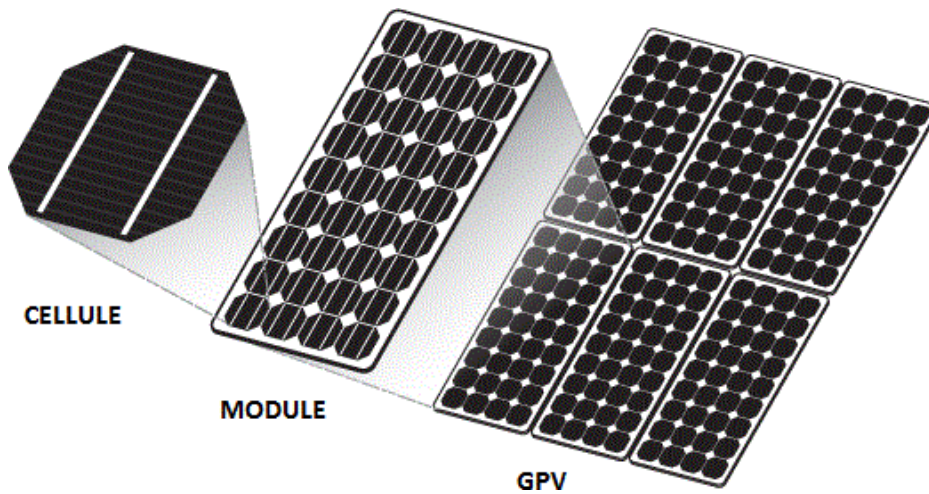


Figure II.2 Composants d'un GPV

## Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque

La caractéristique  $I-V$  du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par Figure II.3. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule comme un exemple.

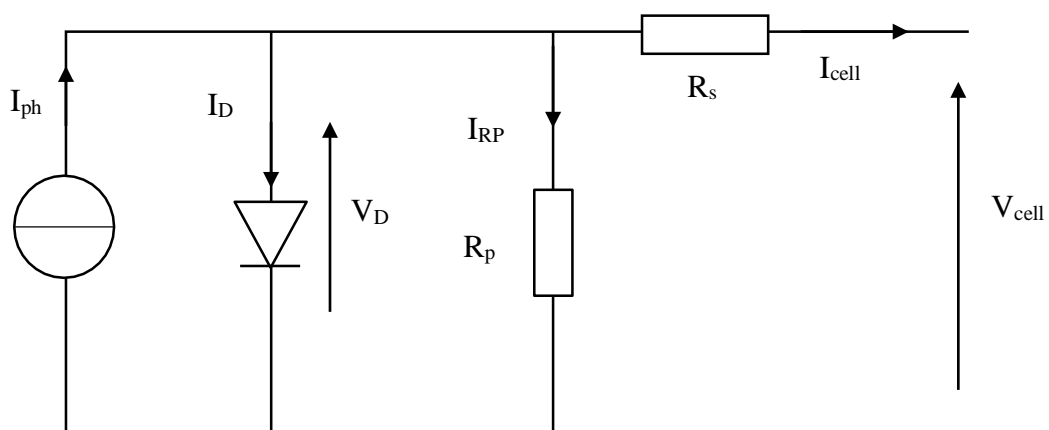


Figure II.3 Modèle électrique équivalent à la cellule solaire

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série  $R_s$  représente la résistance de



contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt  $R_P$  représente le courant de fuite. Une diode  $D$  en parallèle qui modélise la jonction PN. Ce circuit peut être utilisée aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [18].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cel} = I_{ph} - I_D - I_{RP} \quad (II-1)$$

$$I_{RP} = \frac{V_D}{R_P} \quad (II-2)$$

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_{TH}}} - 1 \right) \quad (II-3)$$

$$V_D = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad (II-4)$$

Alors :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (\text{II-5})$$

Avec

$I_s$  : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{kT}} \quad (\text{II-6})$$

$V_{th}$  tensions thermique à la température :

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (\text{II-7})$$

$q$  : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

$K$  : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/k)  $K_1$  : constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$ )

$T$  : température effective de la cellule en Kelvin

$V_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV )

Généralement la résistance ( $R_p$ ) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant  $I_{RP}$  [2-20], Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (\text{II-8})$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell} = -R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{cell} + I_s}{I_s} \right) \quad (\text{II-9})$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte. En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

Tableau II.1 Conditions de test.

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement $G_0=1000\text{W/m}^2$	Eclairement $G_{\text{nom}}=800\text{W/m}^2$
Température de la cellule $T_0=25^\circ\text{C}$	Température ambiante $T_{a,\text{nom}}=20^\circ\text{C}$

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- le courant de court-circuit  $I_{sc,0}$ .
- la tension de circuit ouvert  $V_{oc,0}$ .
- la puissance maximale  $P_{\text{max},0}$ .

Sous les conditions nominales, la température de la cellule  $T_{\text{NOCT}}$  (NOCT : Nominal Operating Cell Temperature) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

Le photo-courant  $I_{\text{ph}}$  est directement proportionnel à l'éclairement. Si  $I_{sc,0}$  est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quel autre valeur de  $G$ , est donné par :

$$I_{ph} : T_0 = G * \frac{I_{sc,0}}{G_0} = G1G \quad (\text{II-10})$$

Le photo-courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par .

$$I_{ph} = I_{ph_{T_0}} * (1 + K_0(T - T_0)) \quad (\text{II-11})$$

D'où

$$K_0 = \frac{I_{sc_{T_2}} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad (\text{II-12})$$

(II)

Avec  $k_0$  est le coefficient de température de  $I_{ph}$  (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius), et  $T_2 = 75^\circ\text{C}$

La température de fonctionnement de la cellule  $T^c$  dépend de l'éclairement  $G$  et de la température ambiante  $T_a$ , selon l'équation empirique suivante :

$$T^c = T_a + C_2 G \quad (\text{II-13})$$

Avec

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad (\text{II-14})$$

Si la température  $T_{NOCT}$  n'est pas connue, la constante  $C_2$  est approximée par  $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ . (en pratique  $C_2$  varie entre 0.01 et  $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ )

La tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{oc} = V_{oc,0} = C_3(T^c - T_0) \quad (\text{II-15})$$

Où  $C_3 = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$

Le courant de saturation  $I_s$  de la diode pour la température  $T_0$ , est donné par :

$$I_{s,0} = \frac{I_{sc,0}}{\left(e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{th,0}}} - 1\right)} \quad (\text{II-16})$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{s,0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/n} \cdot e^{\left(-\frac{qV_g}{nk}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (\text{II-17})$$

La résistance série  $R_s$  a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . La valeur de  $R_s$  est alors donnée en évaluant la pente  $dV/dI$  de la courbe  $I/V$  pour  $V = V_{oc}$ . L'expression de  $R_s$  est donnée en dérivant  $I$  et en réarrangeant en fonction de  $R_s$  :

$$I = I_{ph} - I_s(e^{(v+R_s I)/V_{th}} - 1) \quad (\text{II-18})$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}} (dv + R_s dI) e^{(v+R_s I)/V_{th}} \quad (\text{II-19})$$

$$R_s = \left(-\frac{dv}{dI}\right)_{v_{oc}, 0} - 1/X_v \quad (\text{II-20})$$

$$X_v = \frac{I_s \cdot 0}{V_{th} \cdot 0} e^{(V_{oc0}/V_{th0})} \quad (\text{II-21})$$

La résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_s|_{T_0} (1 + k_3 (T - T_0))$$

Avec  $k_3$  coefficient de température de la résistance série.

## Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque

En prend par exemple une cellule de module KC-60 Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m<sup>2</sup>) et 25°C.

Tableau II.2 Caractéristiques du module KC-60[22].

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension a circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
60 w	3.73 A	20 V	3.55 A	16.9 V

Les figures suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

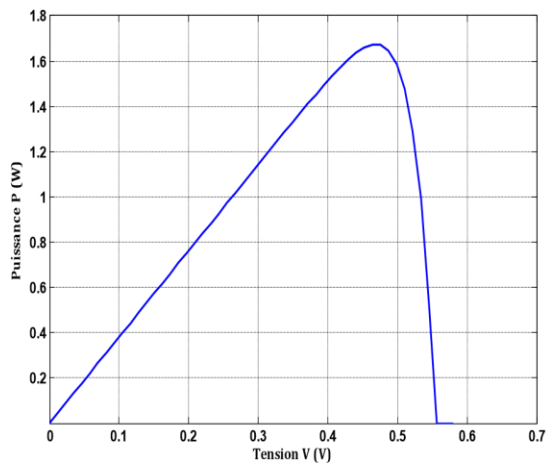


Figure.II.4 Caractéristique P-V d'une cellule

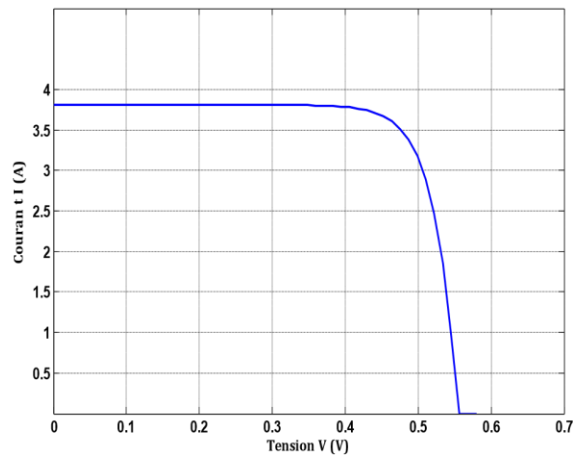


Figure.II.5 Caractéristique I-V d'une cellule

# Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique.

## Association De Cellules Photovoltaïques En Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure.II.6 montre la caractéristique résultante ( $I_{CS}$ ,  $V_{CS}$ ) obtenue en associant en série  $N_S$  cellules identiques ( $I_C$ ,  $V_C$ ) [23].

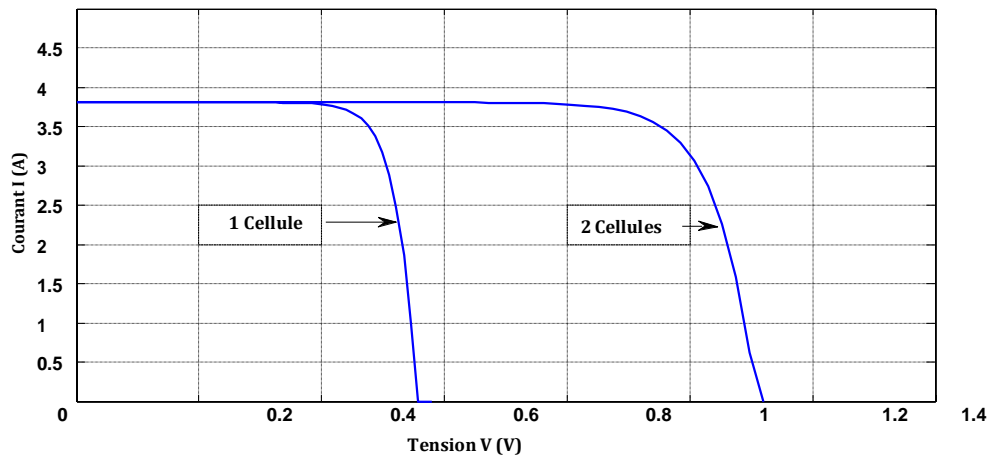


Figure.II.6 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

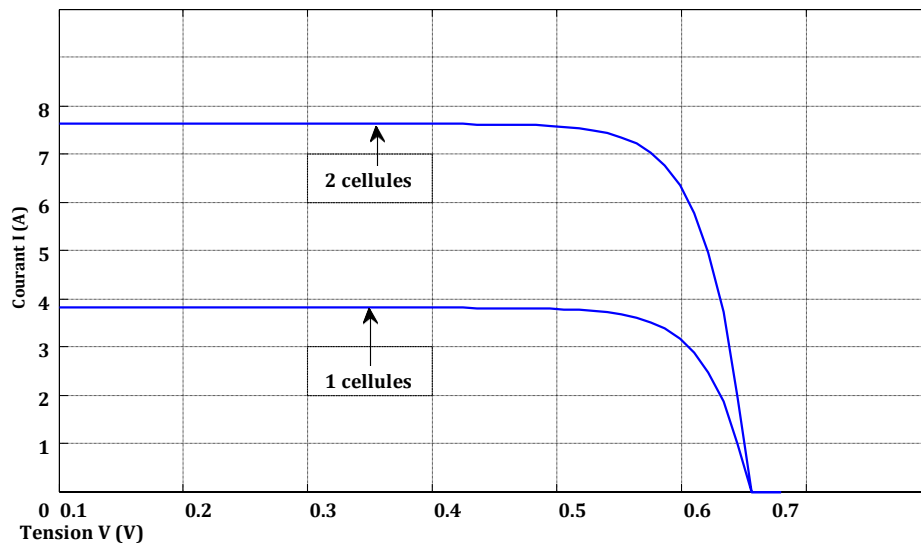
$$I_{CS} = I_C \quad (\text{II-23})$$

Et

$$V_{CS} = N_S V_C \quad (\text{II-24})$$

## Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. (Figure II.7) montre la caractéristique résultante ( $I_{CP}$ ,  $V_{CP}$ ) obtenue en associant en parallèle  $N_P$  cellules identiques ( $I_C$ ,  $V_C$ ) [23] :



**Figure.II.7** Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

$$I_{CP} = N_P I_C \quad (\text{II-25})$$

Et

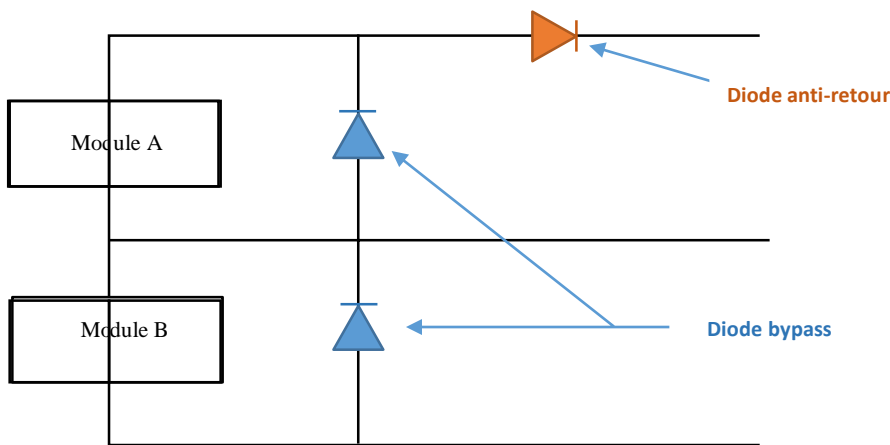
$$V_{CP} = V_C \quad (\text{II-26})$$

## Protections D'un Générateur

Le groupement des cellules photovoltaïque présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles [24-25].

Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (Figure II.8)





**Figure.II.8** Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairage n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

## Modélisation D'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{(V_{cell} + R_s I_{cell}) / V_{th}} - 1 \right) \quad (II-8)$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres,  $I_{ph}$  et  $I_s$  en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  et  $P_{max}$  qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [18] :

- le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{(V + IR_s) / V_{th}} \gg 1$  pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (3) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{(V_{cell} + R_s I_{cell}) / V_{th}} \quad (\text{II-27})$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right) \quad (\text{II-28})$$

D'où

$$I_s = I_{sc} * e^{\left(-\frac{V_{oc}}{V_{th}}\right)} \quad (\text{II-29})$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{\left(\frac{V - V_{oc} + I R_s}{V_{th}}\right)}\right) \quad (\text{II-30})$$

Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent  $N_p$  branches en parallèle, chacune avec  $N_s$  cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant  $I^p$ , généré par le module PV sera exprimé par:

$$I^p = N_p * I_{sc} * \left(1 - e^{\left(\frac{V^p - N_s V_{oc} + \left(\frac{N_s}{N_p}\right) * R_s I^p}{V_{th}}\right)}\right) \quad (\text{II-31})$$

## Caractéristique D'un Générateur PV

Les figures suivant présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de 1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

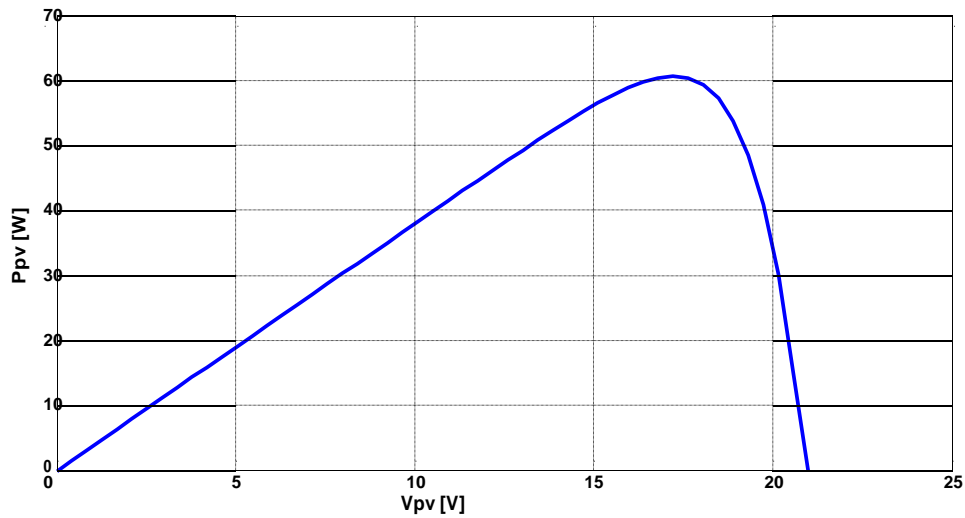


Figure.II.9 Caractéristique P/V d'un panneau PV

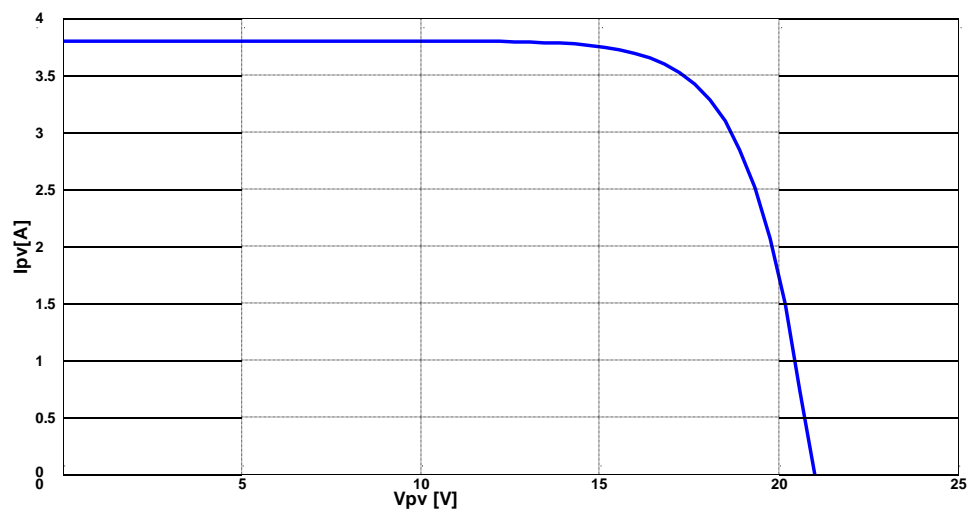
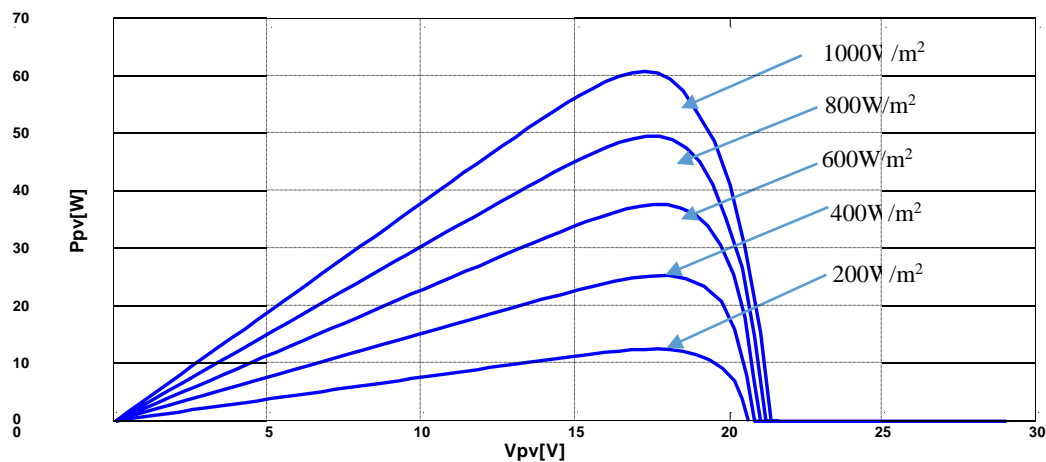


Figure.II.10 Caractéristique I/V d'un panneau PV

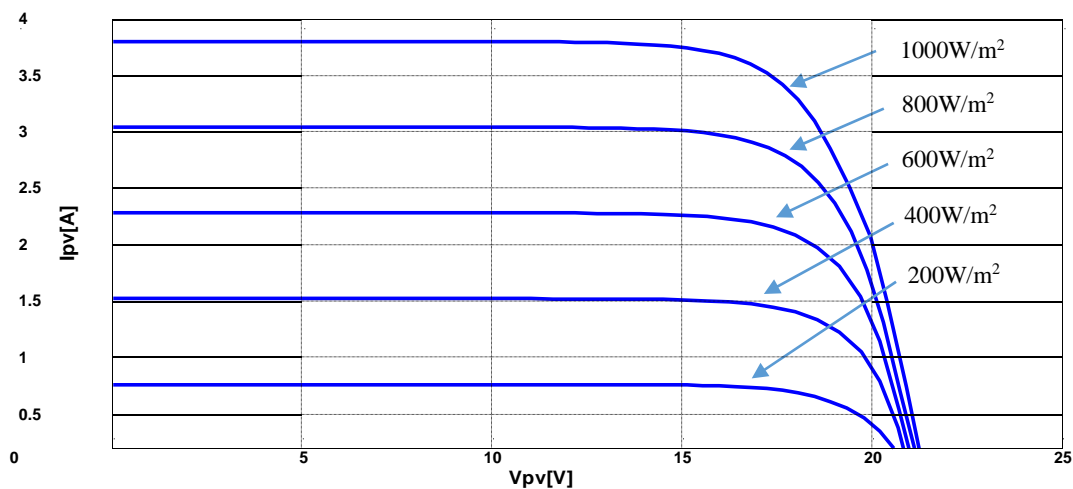
## Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV

### Influence De L'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangé. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photocourant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{CCM}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{COM}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures



**Figure.II.11** Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.



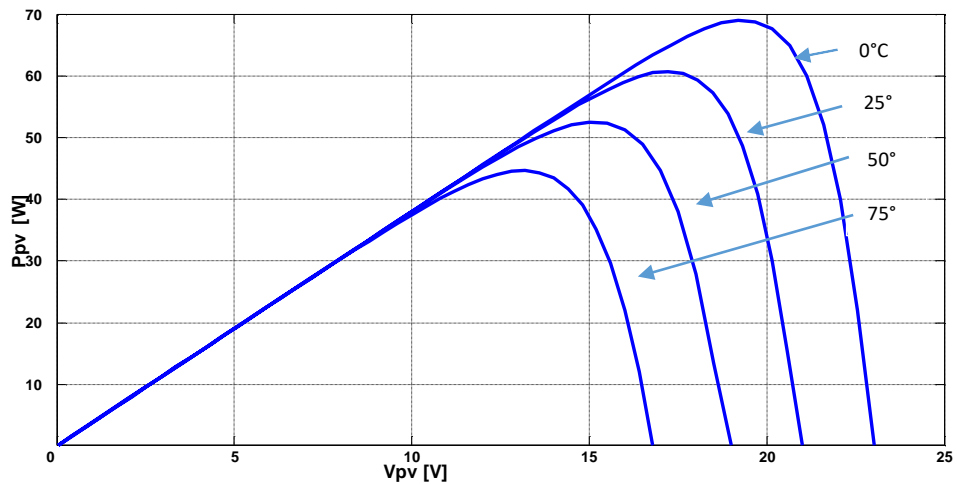
**Figure.II.12** Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule ( $P_{max}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

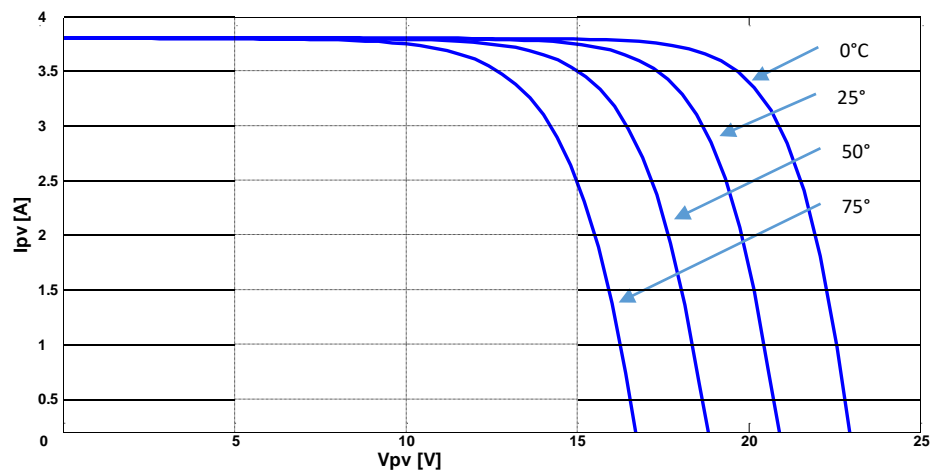
## Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C

à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer que l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV. Les figures suivantes représentent les caractéristiques Courant -Tension et Puissance-Tension pour un rayonnement constant et différentes températures.



**Figure.II.13** Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m<sup>2</sup> et une température variable.



**Figure.II.14** Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m<sup>2</sup> et une température variable.

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

## II.3 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

### II.3 .1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure II.15 Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{MAX}$  disponible [23].

GPV

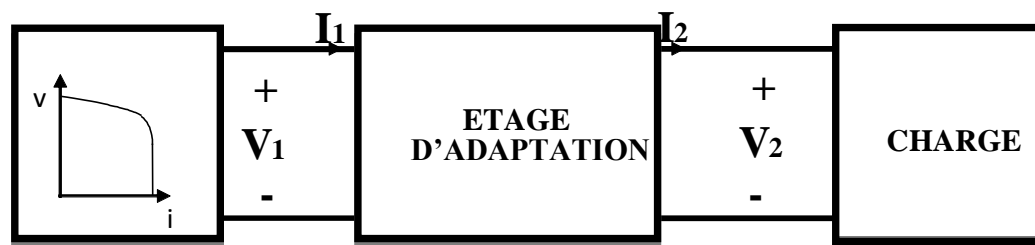
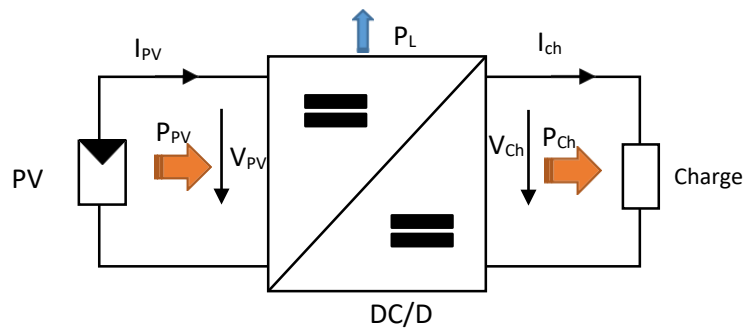


Figure.II.15 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

## .2 Convertisseur DC/DC

La figure.II.16 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.



**Figure.II.16** convertisseurs DC-DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [21].

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur

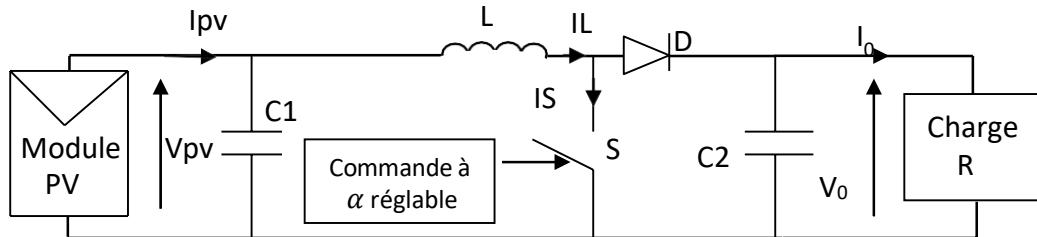
Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur 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 [26].

## Étage d'Adaptation de Type BOOST

Considérons l'exemple de la figure II.7 correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [21]:



**Figure.II.17** Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor ( $S$ ) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor ( $S$ ) s'ouvre et l'inductance ( $L$ ) s'opposant à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge ( $R$ ) à travers la diode ( $D$ ) [27].

## Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle  $\alpha T_s$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II-32})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II-33})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \quad (\text{II-34})$$



Pour le deuxième intervalle  $(1 - \alpha) T_s$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II-35})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II-36})$$

## Modèle approximé du convertisseur Boost

Les systèmes d'équations de base (II-39 à II-41) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques  $C_1, V_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ( $e^\xi \approx 1 + \xi$  si  $\xi \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

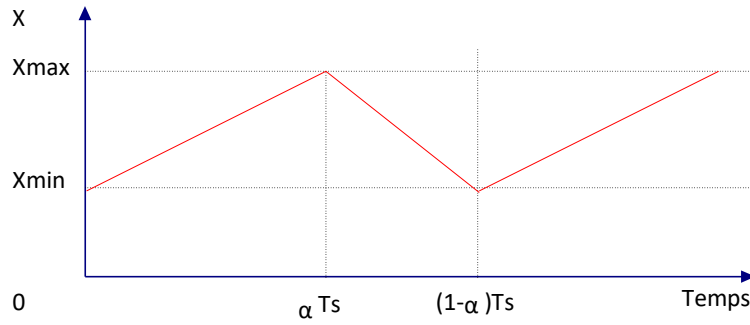
Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux intervalles du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$ :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II-38})$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur un intervalle  $T_s$ . Cette relation est valide si:

$\frac{dx}{dt}_{(\alpha T_s)}$  et  $\frac{dx}{dt}_{((1-\alpha)T_s)}$  sont constants sur les intervalles  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  respectivement

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de lacapacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.18.



**Figure II.18** Allure des variables dynamiques  $I_L$ .

En appliquant la relation (II-38) sur les systèmes d'équations (II-32 a II-37)) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \alpha T_s = (I_{PV} - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_{PV} - I_L) \quad (\text{II-39})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad (\text{II-40})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad (\text{II-41})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_L = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (\text{II-42})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II-43})$$

$$V_{PV} = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II-44})$$

### **Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)**

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique  $\alpha$  de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués.

Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT..

## **. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l' influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Pour la partie commande MPPT, nous présentons ce type de commande de manière beaucoup plus approfondie

# **Chapitre III**

Technique de commande de system PV  
(commande MPPT)

## Introduction

En ce qui concerne la conception des commandes MPPT, différentes approches d'adaptation sont disponibles : implantation analogique, analogique-numérique et numérique. Dans ce travail de thèse, nous avons opté pour l'approche d'adaptation par la commande MPPT numérique puisque sa technique de réalisation est simple malgré qu'elle est un peu plus coûteuse par rapport aux autres implantations.

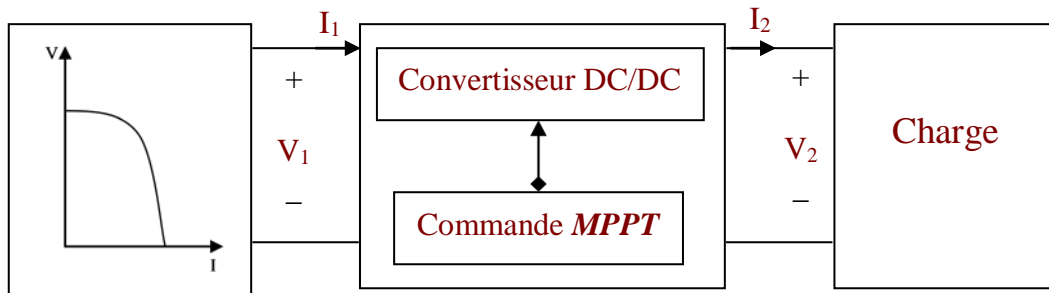


Fig 4.1 : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{MAX}$  du GPV.

## Généralité :

### Définition et principe de la recherche :

La commande **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge [18]. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

Dans ce contexte nous étudions la conception et le fonctionnement d'une commande numérique, de manière à ce que la puissance optimale délivrée par le panneau solaire soit quasiment transférée à la charge de façon automatique quelle que soit l'intensité d'éclairement et la valeur de la charge.

Prenons comme exemple, pour une puissance incidente  $W_1$ , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini :  $\alpha_{1opt}$  (point PPM1 sur la figure 4.2-A). Si la puissance incidente change :  $W_2$ , alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du GPV et le point Pf (figure 4.2-A) [17]. Pour converger vers le nouveau point PPM2, il faut ajuster le rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur  $\alpha_{2opt}$ . Il en sera de même lorsque la charge  $R_s$  change (figure 4.2-B) : le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM1); pour converger vers ce PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique  $\alpha$ . Donc, dans un système PV indépendant et autonome, cette régulation doit être réalisée automatiquement afin de poursuivre le point de fonctionnement optimal. En pratique, cette régulation est effectuée par la commande **MPPT** (figure 3-1).

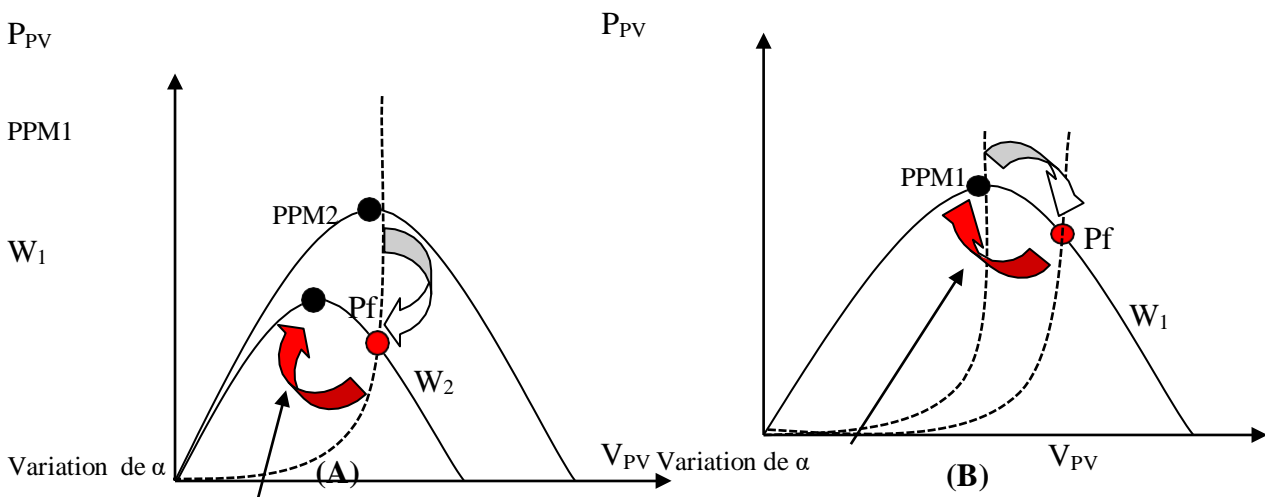


Fig 4.2 : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge  $R_s$ (B). ( ) Puissance à la sortie du GPV. ----

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV [16].

Etant donnée le grand nombre de publication dans ce domaine, nous ne présentons que le principe de base des premiers types de commandes pour ensuite décrire notre commande MPPT qui a été implémentée à l'aide d'un circuit électronique numérique.

### Les premiers types de commande MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières MPPT conçues était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à cette époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatiale avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

Appliqué au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F Boehringer[16]. La commande exposée dans cet article est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son PPM. Ce dernier est représenté en figure 4.3 et peut être implanté entièrement en numérique. La charge est une batterie d'accumulateurs.

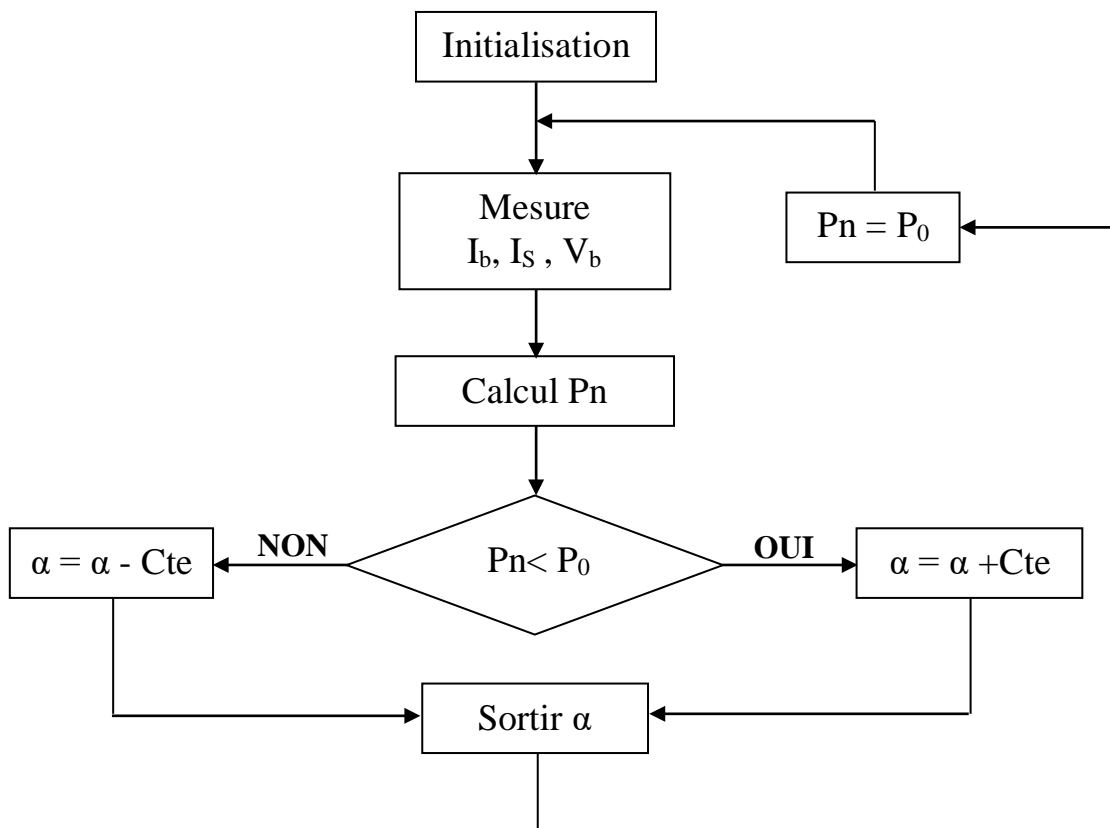
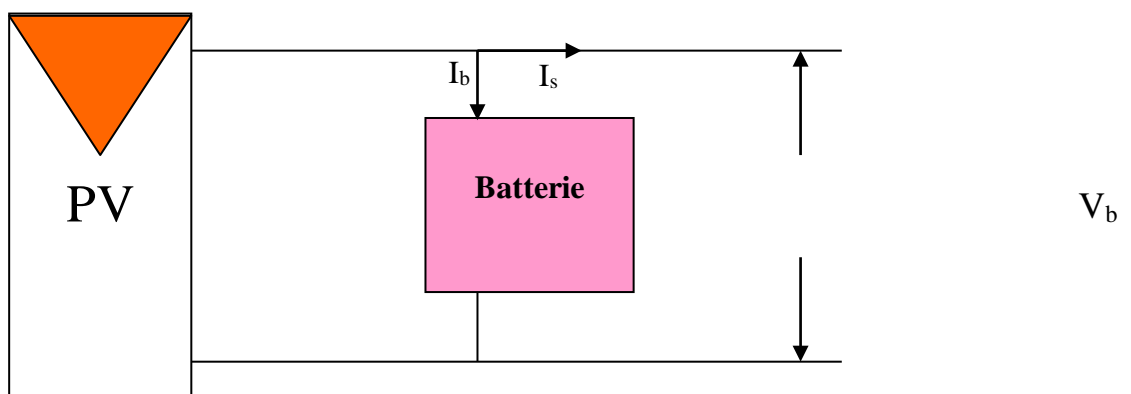


Fig 4.3 : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique  
Le système démarre d'un rapport cyclique initial  $\alpha_0$  et d'une puissance initiale  $P_0$ .

Après avoir effectué la mesure du courant  $I_b$  et de la tension  $V_b$  aux bornes de la batterie et du courant de charge  $I_s$ , le produit  $[(I_b + I_s) \cdot \alpha \cdot V_b]$  est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée  $P_n$  délivrée par le GPV à l'instant où la mesure a été effectuée.

Cette image est alors comparée à la puissance  $P_0$ , si  $P_n$  est inférieure à  $P_0$ , alors  $\alpha$  est incrémenté, sinon  $\alpha$  est réduit. Une fois  $\alpha$  modifié,  $P_0$  prend la valeur  $P_n$  et on effectue une nouvelle mesure de  $I_b$ ,  $V_b$  et  $I_s$  pour calculer la nouvelle puissance  $P_n$ .

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté.



#### **Evolution du point d'opération du GPV :**

Nous devons chercher le point de puissance maximal, pour cela nous comparons un point de puissance ( $P_2$ ) mesuré à l'instant ( $t$ ) avec un point de puissance ( $P_1$ ) mesuré à l'instant ( $t-1$ )(figure 4.4).

Si  $P_1 < P_2$ , la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du PPM, et si la dérivée de la puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le PPM.

Ainsi au démarrage du système, la recherche de PPM se fait progressivement, en cherchant le premier maximum.

La méthode de la commande MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent.



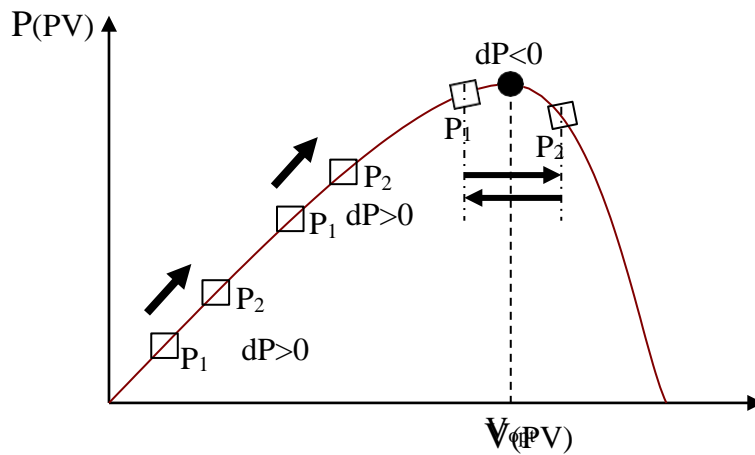


Fig 4.4 : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables.

Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir :

- La puissance délivrée par le GPV peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protection (diode by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.
- Des changements brutaux d'éclairement et de la charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le GPV peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure 4.5. Le point de fonctionnement ( $P_1$ ) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance (A) avant le changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de  $P_1$  à  $P_2$  qui se trouve sur la courbe de puissance (B). En comparant la puissance  $P_2$  et  $P_1$ , on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le PPM, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

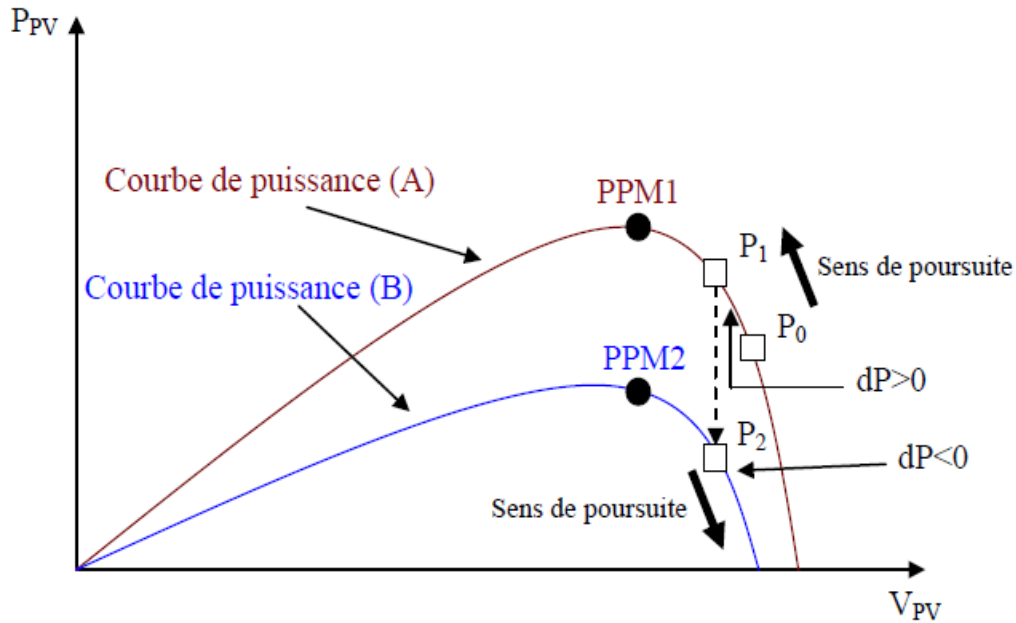


Fig 4.5 : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un GPV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

### Différents types de commandes MPPT :

Si l'on veut poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension  $V_{pv}$  à la sortie du panneau et le courant  $I_{pv}$  qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique ( $P = V_{pv} * I_{pv}$ ), on pourra utiliser différents algorithmes de contrôle pour suivre le PPM du module PV [1]. Trois implantations de commande MPPT sont possibles[19] :

- Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis à vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire. L'autre avantage de cette commande est sa capacité de fonctionner à des fréquences de découpages élevées. Elle peut dépasser facilement le 1MHz. Cela permet donc de réduire considérablement la taille des composants passifs (capacités et inductances) constituant le convertisseur d'énergie.

- Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor). Ce concept a été développé par S. Singer dans le cas général de source de puissance fortement non linéaire [1].

- Commandes MPPT à implantation numérique faisant intervenir que des composants
- digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande.

Ainsi, parmi les nouvelles MPPT publiées récemment, on peut citer la commande MPPT de type numérique proposée par M. Matsui . Celle-ci est basée sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost [19]. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction de son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source- charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement.

Ces commandes numériques se basent sur des algorithmes de contrôle adaptatifs, permettant de maintenir le système à son PPM. Ainsi, nous allons présenter dans le paragraphe suivant une distinction entre plusieurs algorithmes.

### **Les différents algorithmes de contrôle MPPT :**

#### **Méthode de perturbation et observation (P&O) :**

Cette méthode consiste à perturber l'un des paramètres d'entrées du convertisseur statique (généralement la tension  $V_{pv}$ ), et d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du système, donc tous les algorithmes qui contiennent une action de commande associée à une action de recherche sont regroupés sous cette dénomination.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT.

Pour expliquer le principe de cette commande extrême, partant d'une commande avec un rapport cyclique petit, et à chaque cycle, en ajustant  $\alpha$  régulièrement,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurée afin de calculer  $P(K)$ , la valeur obtenue est comparée avec la valeur  $P(K-1)$  calculée au cycle précédent, selon cette comparaison,  $V_{pv}$  est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée. De cette manière, la puissance va alors

augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer ; dès détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé... Finalement, le système se place en oscillation autour du maximum .

Cette oscillation permet au système de pilotage de vérifier que le maximum ne s'est pas déplacé et dans le cas échéant de le suivre mais elle entraîne une perte de rendement qui augmente avec le pas d'incrémentation de la perturbation, le point de fonctionnement moyen étant en dessous du maximum. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. Le rendement de cette technique est d'environ 85% .

La Figure 4.6 représente l'algorithme de la méthode P&O. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques (comme une journée nuageuse avec éclaircies), cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction fautive et les pertes de puissance risquent d'être encore plus importantes; cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise, et avant que de nouvelles perturbations soient effectuées il est nécessaire que le convertisseur statique fonctionne en régime établi c'est pour cela cette méthode est jugée trop lente à retrouver le nouveau point de fonctionnement.

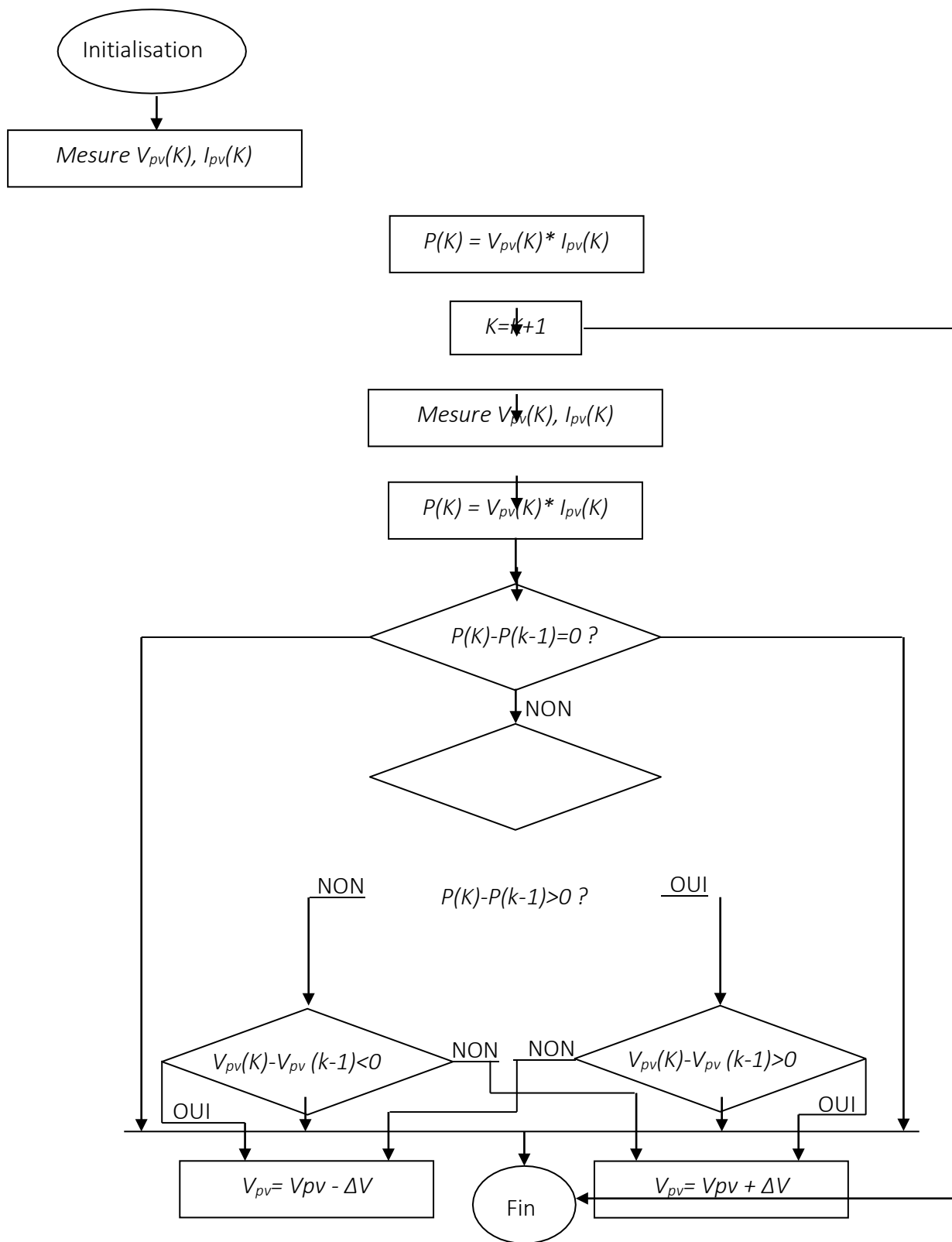


Fig. 4.6 : Organigramme de la méthode P&O.

## 4.5 Simulation des méthodes MPPT

Le modèle de simulation utilisé pour la recherche de point maximum de puissance et cela pour deux technique de recherche MPP à savoir la méthode perturbe & observe et régulateurPI

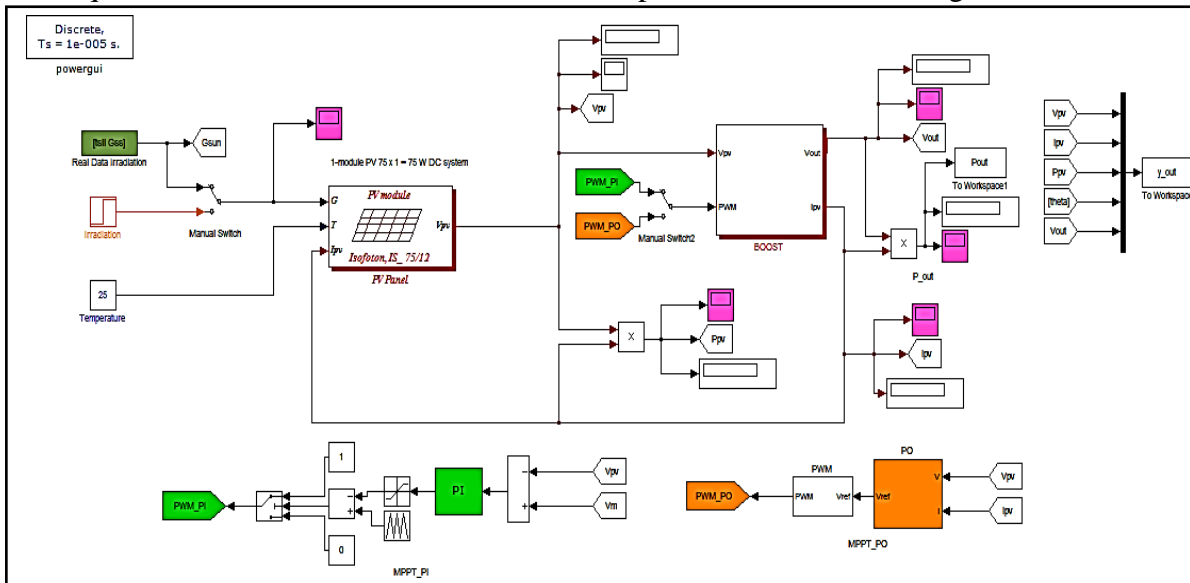


Fig.4.11 Implantation du système MPPT dans Matlab-simulink.

La recherche du MPPT est réalisée par simulation et cela pour deux techniques perturbe and observe et régulateur PI à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. La chaîne de conversion photovoltaïque a été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Elle est composée de blocs fonctionnels programmés et simulés qui sont :

‘GPV’, simulant le fonctionnement d’un module et/ou d’un panneau photovoltaïque, Un hacheur Boost Commande’, simulant la commande MPPT appliquée au convertisseur (P&O, régulateurPI)

La charge est égale à 50 Ω.

les conditions d’ensoleillement et de température extérieure.

Donnée du panneau : pv de 75w

- tension du circuit ouvert 21.6 A
- courant du circuit ouvert 4.67 A
- tension au point de puissance max 17.3 V
- courant au point de puissance max 4.34 A

**Méthode de perturbe et observe (P&O) :**

Pour l'éclairement fixe :  $E=1000 \text{ w/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{c}$  on retient les caractéristiques suivante

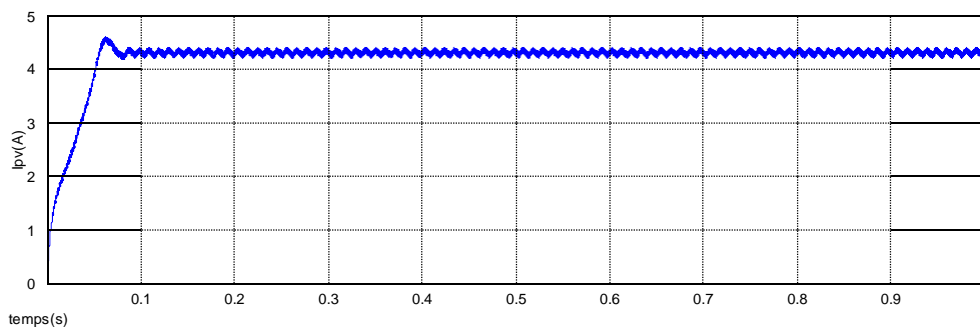


Fig.4.12 : variation du courant du panneau

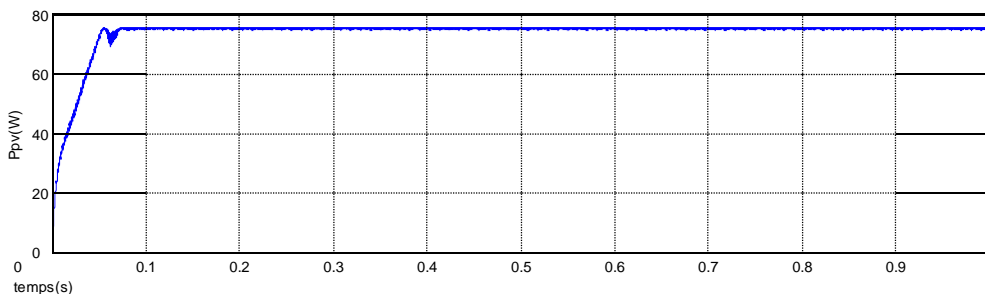
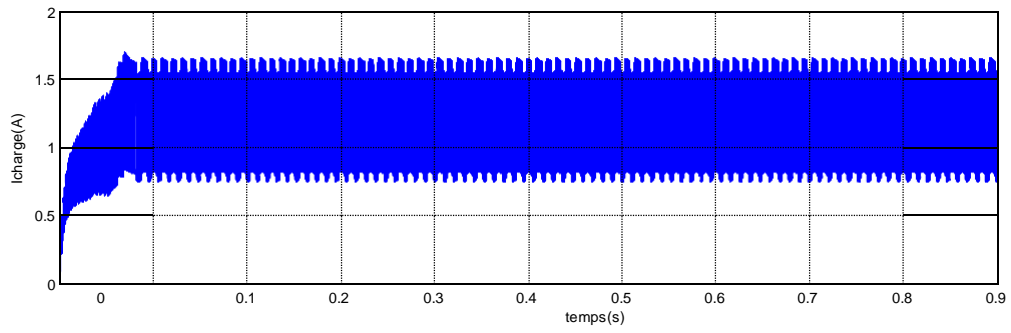
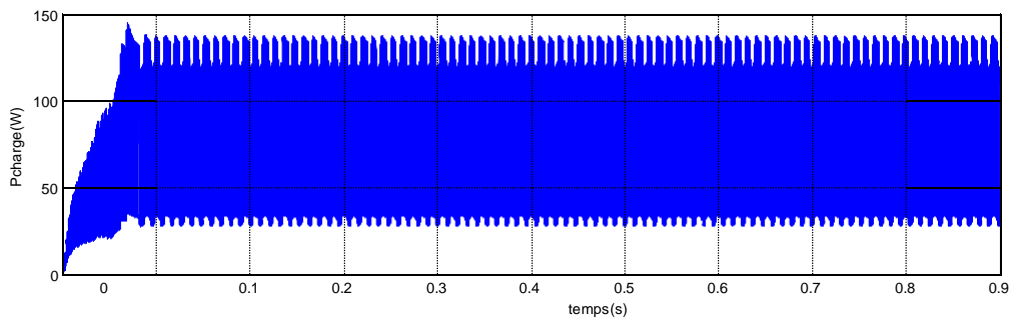


Fig.4.13 variation de la puissance du panneau



1

Fig.4.14 : variation du courant de la charge



1

Fig.4.15 : variation de la puissance de la charge



Pour l'éclairement variable de :  $E= 400-1000 \text{ w/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{c}$  on retient les caractéristiquessuivante

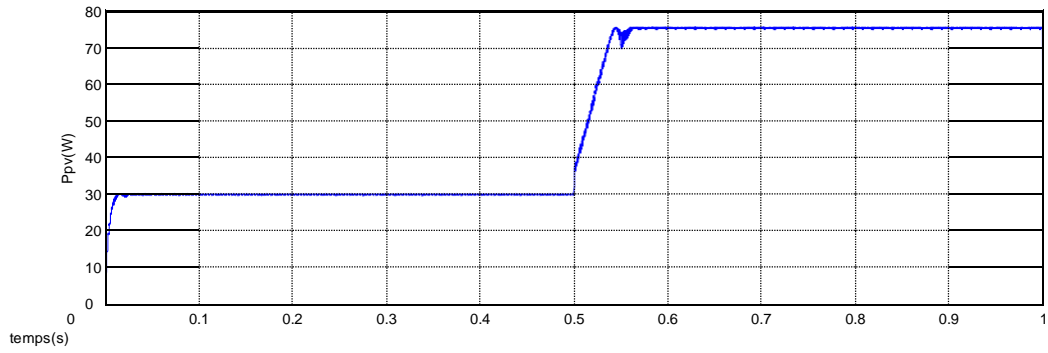


Fig.4.16 : variation de la puissance du panneau

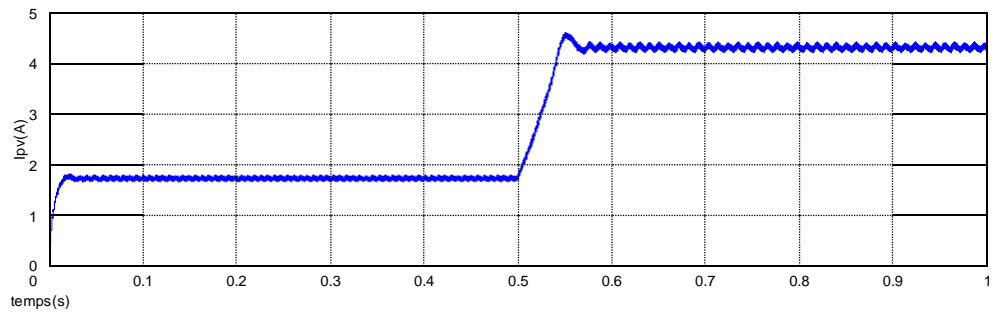


Fig.4.17 : variation de courant du panneau

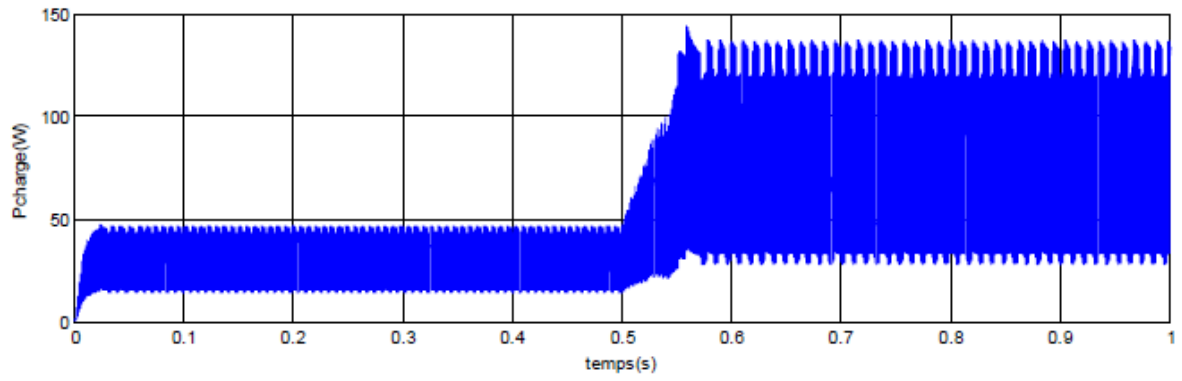


Fig.4.18 : variation de la puissance de la charge

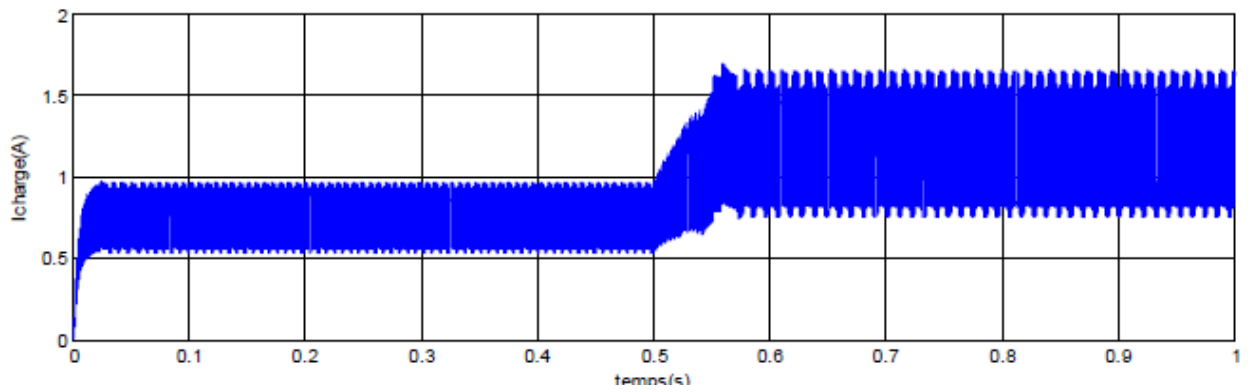


Fig.4.19 : variation du courant de la charge

# **Chapitre IV**

## **Simulation, résultat et discussions**

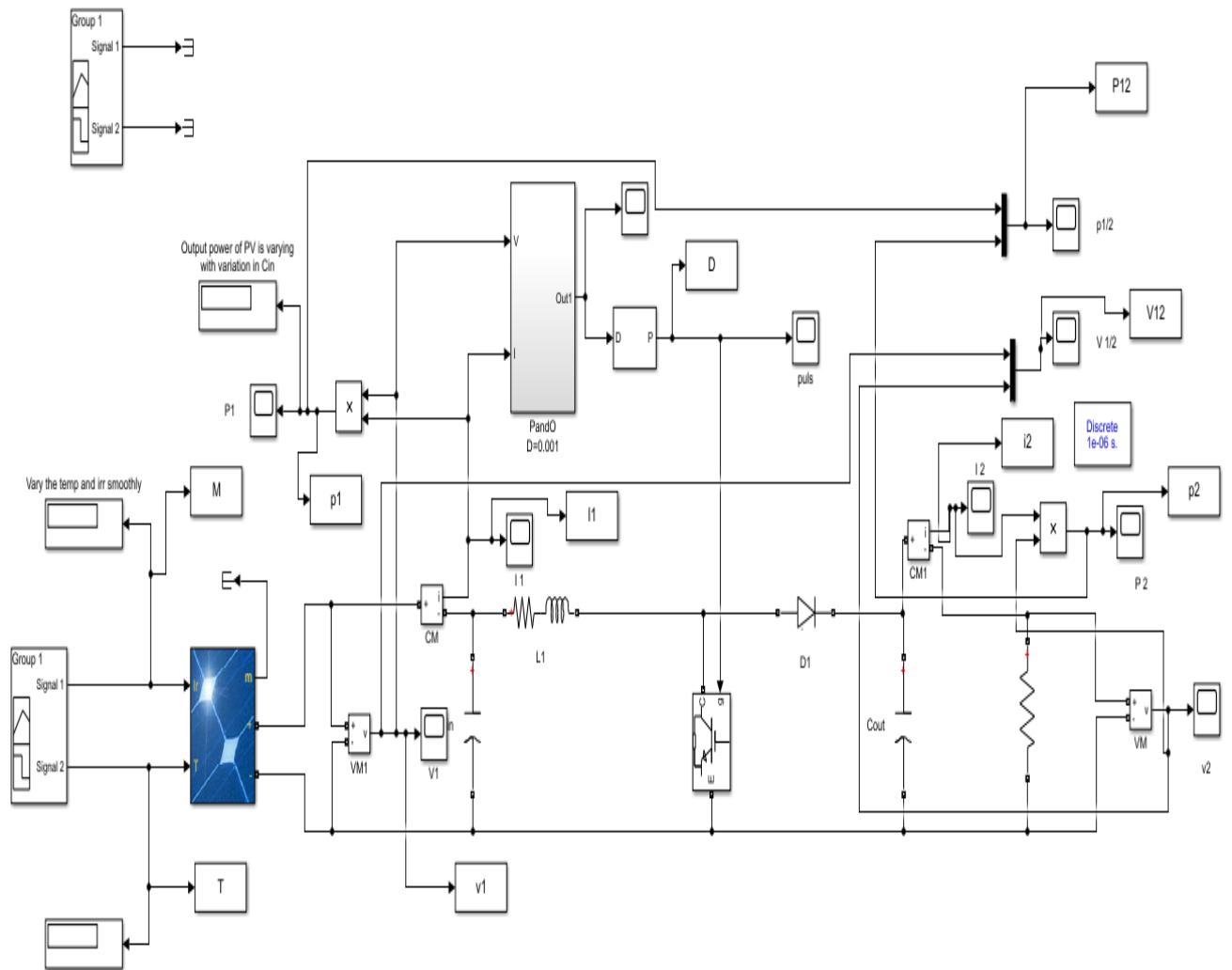
## **Introduction**

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. V que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale.

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre l'entrer et de sortir de simuler un certain système.

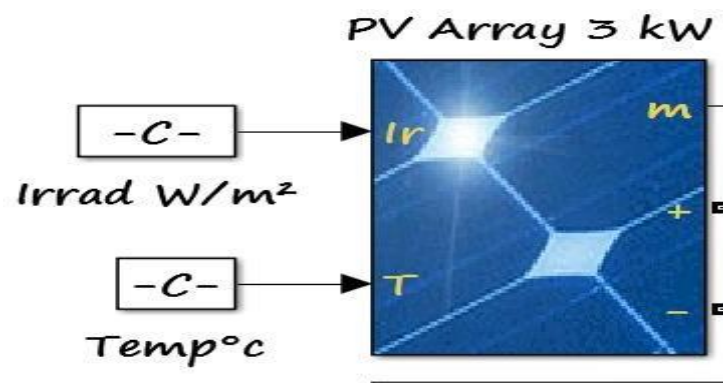
### **Simulation du système photovoltaïque 3kw**

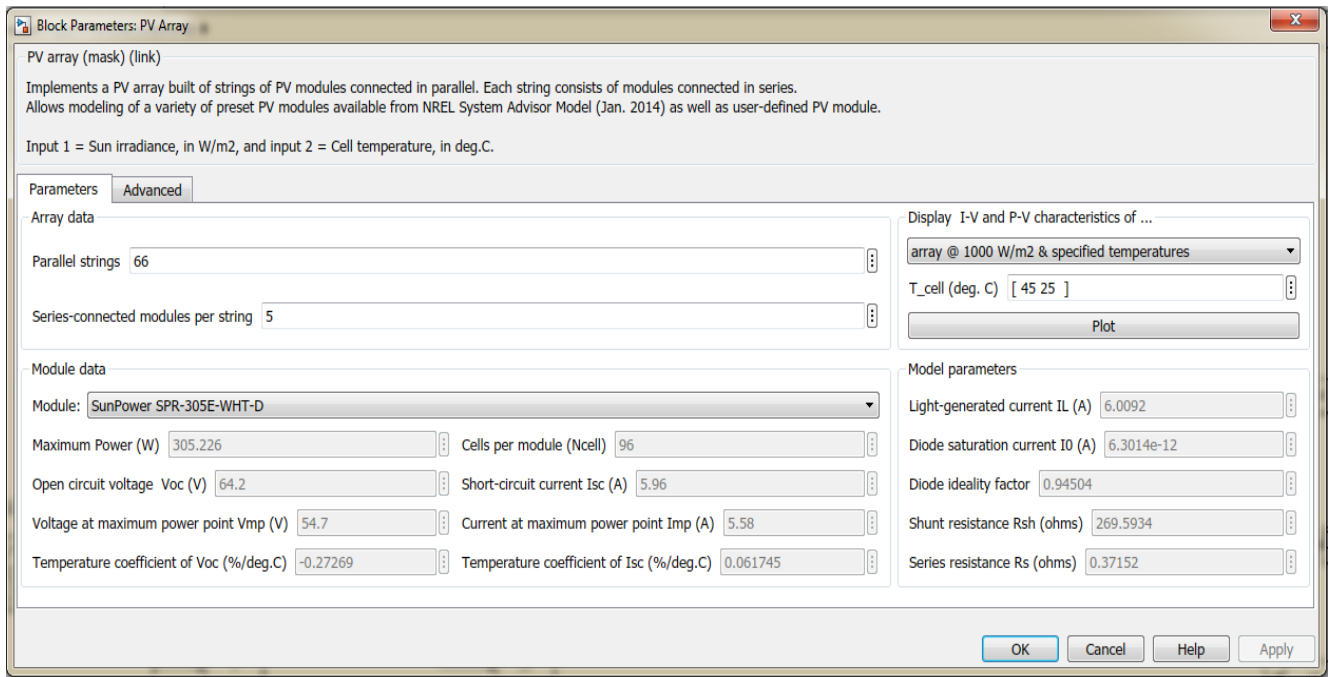
La Figure 4-1 donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés



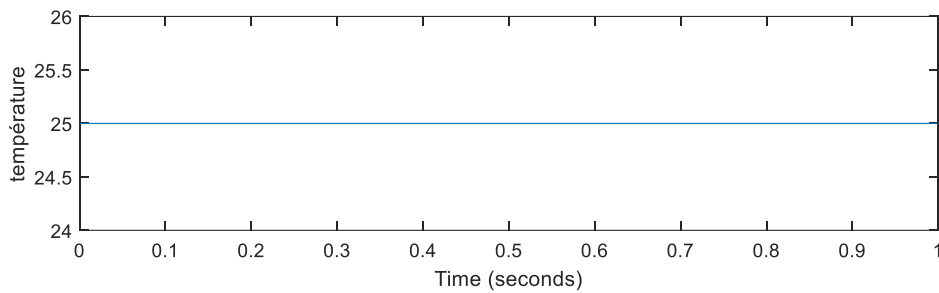
### Simulation d'un GPV

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink sous Simulink du block PV Array

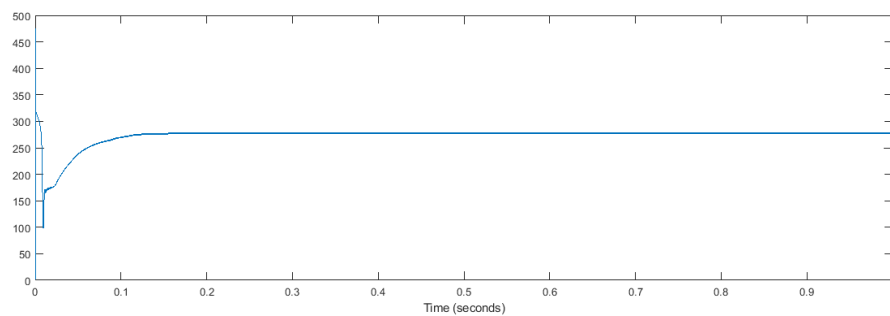




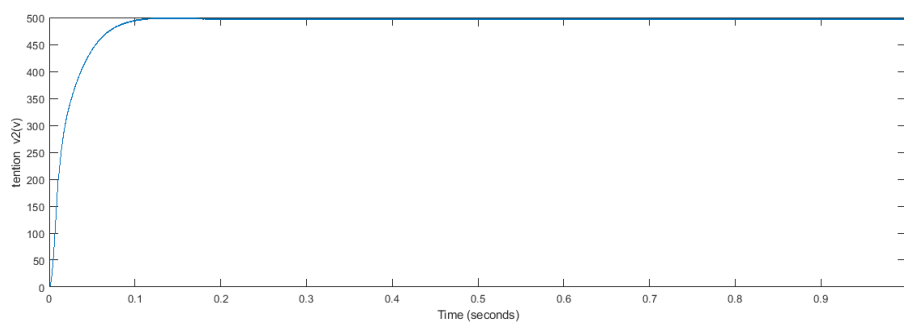
**Figure 4.2** Schéma bloc sous Simulink du PV Array



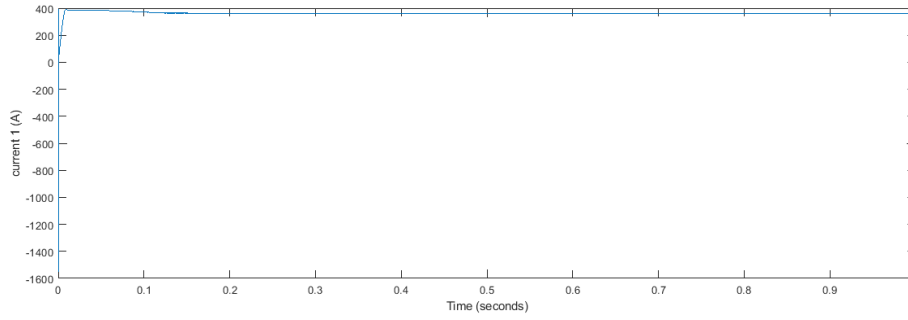
**Figure 4.3** de temperature



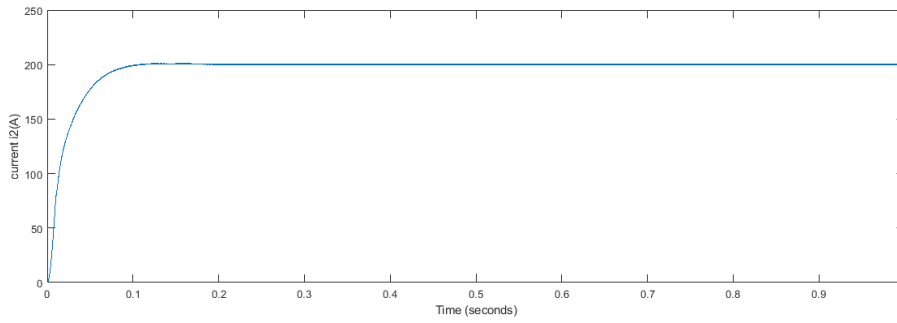
**Figure4.4** Tention de entrér



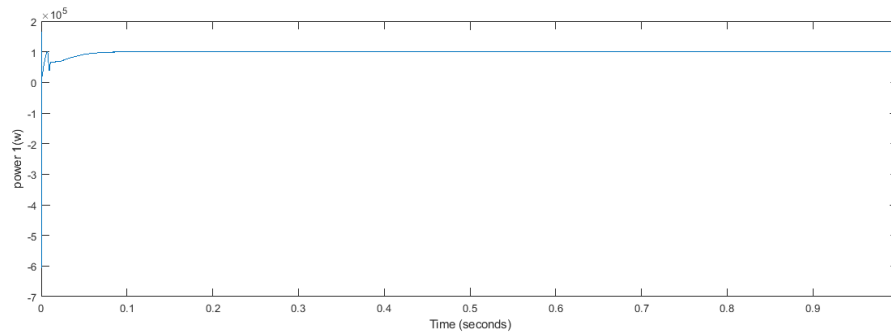
**Figure4.5 Tentione de sortir**



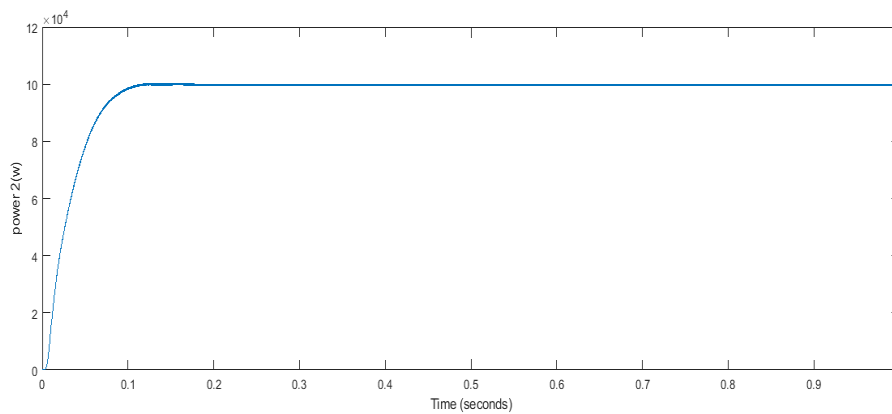
**Figure4.6 Courant de entrér**



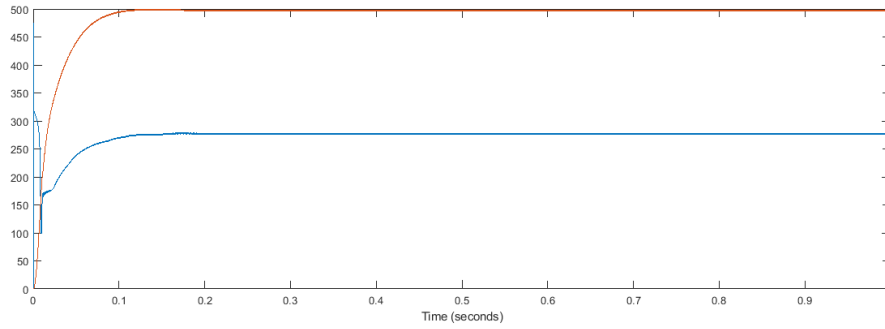
**Figure4.7 Courant de sortir**



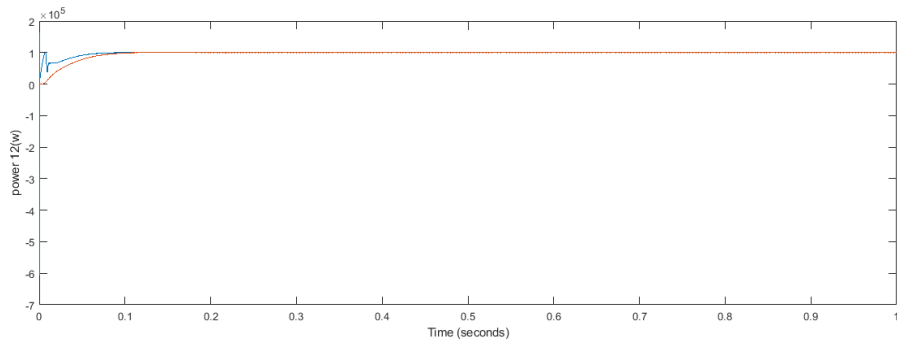
**Figure 4.8 Puissance d' entrér**



**Figure4.9 Puissance de sortir**



**Figure4.10 compare entre la tensions de entrer et la sortir**



**Figure4.11 la comparisant entr les deux puissance entrer et sortir**

Nous observons que la tension et la puissance fournie par le générateur photoélectrique est instable, Par conséquent, MPPT doit être utilisé pour tracer les valeurs maximales de la puissance

Il est clair que les commandes basées sur la P/O(Perturbateur Observateur) sont si pas mieux que les autres commandes. Mais pour une étude plus préside, il fau utiles autre méthode mppt



## **Conclusion**

Don Ce chapitre on a fait une simulation développées sous l'environnement Matlab/Simulink dans un premier pour la mise en place du système photovoltaïque mais la résultat généralement pas bien et l'algorithme P&O sont plus grandes et Le temps de suivit du l'algorithme perturbe andobserve et Plu tarde.

Pour fait un meilleur comportement que la P&O et bien sur la commande MPPT La poursuite du point maximum est bien accomplie avec un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minime. Face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres ; ce qui implique une amélioration du rendement du système par conséquence

# Conclusion général

Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink). Nous avons procédé à cette étude en quatre étapes : état de l'art des énergies renouvelables appropriées (photovoltaïque), la modélisation du système photovoltaïque, les convertisseurs statiques, la méthode de poursuite de point de puissance maximale et système photovoltaïque connecté au réseau électrique enfin : la simulation de tout l'ensemble.

L'état de l'art des énergies renouvelables (photovoltaïque) joue un rôle prépondérant dans un tel travail. Nous avons commencé par une étude théorique des caractéristiques d'une source primaire (ensoleillement), ensuite nous avons intéressé aux modes d'intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant : la source primaire (température et ensoleillement), Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT.

De plus, en raison de leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont des générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale, qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque.

Pour avoir l'échange d'énergie entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique pendant une journée, et de faire une comparaison entre les grandeurs

simulées et celles mesurées où les conditions météorologiques (éclairage et température) sont variables.

La simulation sous le logiciel MATLAB peut être appliquée à un éclairage moyen électrique pendant une journée, et de faire une comparaison entre les grandeurs simulées et celles mesurées où les conditions météorologiques (éclairage et température) sont variables.

La simulation sous le logiciel MATLAB peut être appliquée à un éclairage moyen mensuel ou annuel pour prédire l'énergie injectée mensuellement ou annuellement dans le réseau. Ce type de prédiction est important lors de l'étude de faisabilité d'une centrale photovoltaïque. Une analyse des résultats de simulation obtenus : Les oscillations de MPPT pour l'algorithme P&O sont plus grandes. Le temps de suivi de l'algorithme perturbe and observe et Plu tarde. mais cet un conventions. Donc il faut ravier par un note méthode.

## Références bibliographiques :

### Chapetre I

[1] Abdelhak AZIZ « Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire » UNIVERSITE TOULOUSE

[2] Tetsuya Taima, Susumu Toyoshima, Kohjiro Hara, Kiyoshi Yase « Control of measurment environment for high-efficiency organic photovoltaic cells » Japanese Journal of applied physics vol .45 n° 8-2006.

[3] A.AZIZ, K.KASSMI, F.OLIVIE, G.SARRABAYROUSE « Synthèses bibliographiques sur les chaines photovoltaïques » Rapport LAAS N°04348,27p, Juin2004.

[4] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook" IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0- 85274-311-4

### Les liens :

[5] <http://www.futura-sciences.com/>

[6] <https://prezi.com/>

[10] <http://fr.wikipedia.org/>

[20] <http://jeunes.edf.com/>

[9] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse\\_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie))

[21] [http://www.voltalia.com/fr/biomasse/presentation\\_88.html](http://www.voltalia.com/fr/biomasse/presentation_88.html)

[22] <http://energie.edf.com/>

### chapeotr II

[1] Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la météorologie 8<sup>e</sup> série - n° 31 - septembre 2000

[2] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.

Eric Schiller - publ. En collab. Avec : iepf, université d'ottawa, eier, crepa. « le

pompage photovoltaïque: manuel de cours a l' intention des ingénieurs et des techniciens »

[3] Joukoff, Alexandre « climatologie du rayonnement solaire » institut royal météorologique, 1991

[4] Yves Roulet-Ingénieur Environnement « différentes utilisations de l'énergie solaire et intégration des capteurs solaires » département des infrastructures service des bâtiments, monuments et archéologie, mai 2005

[5] Olivier Delbard « dictionnaire de l'environnement et du développement durable » univers poche, 2011

[6] wikipedia.org

[7] Saint Priest « électricité solaire avenir solaire » sma solar technology ag – 2012

[8] Brahim Lakehal « étude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure schottky » magister en microélectronique, université de batna, 2009.

[9] Salaheddine Bensalem « effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » magister en énergétique et mécanique des fluides université ferhat abbas, setif, 2011

[10] Dossier Thématique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » énergies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000

[11] Mornay Thomas, Vernay Alexis, Volle Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005

[12] Agence d'études et de promotion de l'isère, rapport sur « la filière photovoltaïque - enjeux et perspectives » septembre 2010

M. Kara Abdelfattah « dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de

[13] Joukoff, Alexandre « climatologie du rayonnement solaire » institut royal météorologique, 1991

[14] Yves Roulet-Ingénieur Environnement « différentes utilisations de l'énergie solaire et intégration des capteurs solaires » département des infrastructures

service des bâtiments, monuments et archéologie, mai 2005

[15] Olivier Delbard « dictionnaire de l'environnement et du développement durable » univers poche, 2011

[16] wikipedia.org

[17] Saint Priest « électricité solaire avenir solaire » sma solar technology ag – 2012

[18] Brahim Lakehal « étude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky » magister en microélectronique, université de batna, 2009.

[19] Salaheddine Bensalem « effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » magister en énergétique et mécanique des fluides université ferhat abbas, sétif, 2011

[20] Dossier Thématique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » énergies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000

[21] Mornay Thomas, Vernay Alexis, Volle Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005

[22] Agence d'études et de promotion de l'isère, rapport sur « la filière photovoltaïque - enjeux et perspectives » septembre 2010

[23] M. Kara Abdelfattah « dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en algérie » l'université de sétif1, 2014

[29] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006

[30] Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kirnamayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012

[31] Ahmad Zbeeb, "a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications" for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.

[32] d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy, "an improved mppt converter using current

[24] Joukoff, Alexandre « climatologie du rayonnement solaire » institut royal météorologique, 1991

- [25] Yves Roulet-Ingénieur Environnement « différentes utilisations de l'énergie solaire et intégration des capteurs solaires » département des infrastructures service des bâtiments, monuments et archéologie, mai 2005
- [26] Olivier Delbard « dictionnaire de l'environnement et du développement durable » univers poche, 2011
- [27] wikipedia.org
- [28] Saint Priest « électricité solaire avenir solaire » sma solar technology ag – 2012
- [29] Brahim Lakehal « étude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure schottky » magister en microélectronique, université de batna, 2009.
- [30] Salaheddine Bensalem « effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » magister en énergétique et mécanique des fluides université ferhat abbas, setif, 2011
- [31] Dossier Thématique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » énergies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000
- [32] Mornay Thomas, Vernay Alexis, Volle Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005
- [33] Agence d'études et de promotion de l'isère, rapport sur « la filière photovoltaïque - enjeux et perspectives » septembre 2010
- [34] M. Kara Abdelfattah « dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en algérie » l'université de sétif1, 2014
- [29] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006
- [32] Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kirannmayi r-jawaharlal nehru technological university , 2012
- [33] Ahmad Zbeeb, "a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications" for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.
- [32] d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy, "an improved mppt converter using current
- [35] production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en algérie » l'université de sétif1, 2014



- [36] Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la météorologie 8<sup>e</sup> série - n° 31 - septembre 2000
- [37] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productive informatique 2010/2011.
- [38] Eric Schiller - publ. En collab. Avec : iepf, université d'ottawa, eier, crepa. « le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens » 1998. compensation method for small scaled pv-applications," IEEE applied power electronics conf. Andexposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003
- [33] Akihiro Oi, " design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of cali-fornia polytechnic state university, 2005
- [34] Hajar Bagheri "advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa), 2015
- [35] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi "active power control for a single-phase grid connected pv system " , international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [36] Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, el-harrach, algérie, 2012
- [37] Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « étude d'une chaîne de conversion photovoltaïque », diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, université de m'sila, 2010
- [38] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva "energy comparison of seven mppt techniques for pv systems", scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;
- [39]. M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque". jcge'08 lyon, 2008.
- [40] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk, "risc-microcontroller builtin fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered lightflasher applications", industrial electronics society, 2004.
- [41] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, "a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", IEEE power electronics specialists conference, pesc'94, pp. 396-403, jun. 1994.
- [42] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, "feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller", IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, july

2002.

[43] Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim, “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.

[44] Trishan ESRAM And Patrick “comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 200

### Chapetre III

[5] Abdelhak AZIZ « Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d’une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l’énergie solaire » UNIVERSITE TOULOUSE

[6] Tetsuya Taima, Susumu Toyoshima, Kohjiro Hara, Kiyoshi Yase « Control of measurement environment for high-efficiency organic photovoltaic cells » Japanese Journal of applied physics vol .45 n° 8-2006.

[7] A.AZIZ, K.KASSMI, F.OLIVIE, G.SARRABAYROUSE « Synthèses bibliographiques sur les chaînes photovoltaïques » Rapport LAAS N°04348,27p, Juin 2004.

[8] F. Lasnier, T.G. Ang, “Photovoltaic Engineering Handbook” IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0- 85274-311-4

[7] W. Herrman, W. Wiesner, W. Vaaben, “Hot spot investigations on PV modules – New concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes” 26th PVSC, Sept. 30 – Oct. 1997, Anaheim, CA.

[8] R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.

[11] Leyva, R., Queinnec I., Alonso, C., Cid-Pastor, A., Lagrange D. and Martinez-Salamero L., “MPPT of photovoltaic systems using extremum seeking control” IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No, 1, pp 249-258, Jan. 2006.

[12] Hussein, K.H.; Muta, I.; Hoshino, T.; Osakada, M.; “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions” Generation, IEE Proceedings Transmission and Distribution. Vol. 142, No. 1, Jan. 1995 pp:59 – 64

[13] H. Valderrama-Blavi, C. Alonso, L. Martínez-Salamero, M. F. Shraif, A. Cid-Pastor, R. Pedrola, J. Caliente, “Multilevel Inverters Adapted to Photovoltaic Energy conversion” . EPE-PEMC 2002 Dubrovnik & Cavtat, Sept. 2002.

[14] A. Aziz K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivier « Composants de puissance utilisés dans les convertisseurs des chaînes PV en régime de commutation » Rapport LAAS n° 04758, 27p Toulouse-France sep 2004.

[15] CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES ELECTRONIQUES M. Angel

Cid Pastor. l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[16] <http://www.futura-sciences.com/>

[17] <https://prezi.com/>

[10]<http://fr.wikipedia.org/>